

Казахский национальный исследовательский технический
университет имени К.И. Сатпаева

УДК 621.01

На правах рукописи

ДЮСЕБАЕВ ИЛЬЯС МУРЗАХАНОВИЧ

**Разработка и исследование конструкций ветровой установки с
неподвижной вертикальной осью с целью совершенствования технологии
производства**

6D071200 – Машиностроение

Диссертация на соискание степени
доктора философии (PhD)

Отечественный научный
консультант:
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор
Елемесов Касым Коптлеуевич

Зарубежный научный консультант:
кандидат технических наук,
ассоциированный профессор
Ефременков Егор Алексеевич

Республика Казахстан
Алматы, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ.....	3
ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ.....	4
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ТЕОРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	9
1.1 Исторические аспекты и развитие ветроустановок.....	9
1.2 Классификация ВЭУ.....	16
1.3 Классификация по типу применяемой ветротурбины.....	21
1.4 Механические характеристики ветротурбин.....	26
2 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СХЕМ И КОНСТРУКЦИИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ.....	45
2.1 Методология разработки критерия выбора конструкций ВЭУ.....	45
2.2 Разработка и оптимизация ротора с ВО ВЭУ.....	51
2.3 Расчет момента ветроустановки.....	55
2.4 Критерии выбора различных схем и конструкций ВЭУ.....	58
3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЭУ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО КРИТЕРИЯ.....	70
3.1 Модель ветроколеса конструкции ВЭУ с неподвижной вертикальной осью вращения ротора.....	70
3.2 Имитационные модели ветроколеса.....	74
3.3 Разработка методики математического моделирования.....	82
3.4 Разработка рекомендаций по использованию современных ветротурбин.....	85
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	93
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	95

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты и нормативные документы:

ГОСТ Р 50891–96 Редукторы общемашиностроительного применения. Общие технические условия

ГОСТ Р 50968–96 Мотор–редукторы. Общие технические условия
ГОСТ Р 51991–2002 Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Общие технические требования

ГОСТ Р 54418.1–2012 (МЭК 61400–1–2005) Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования

ГОСТ 25301–95 Редукторы цилиндрические. Параметры

ГОСТ 27701–88 Редукторы червячные цилиндрические. Основные параметры
ГОСТ 29285–92 Редукторы и мотор–редукторы. Общие требования к методам испытаний

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВО – вертикальная ось

ВЭУ – ветроэнергетическая установка

ВИЭ – возобновляемые источники энергии

СНГ – содружество независимых государств

ВЭС – ветроэнергетические станции

НАН – Национальная Академия Наук

РК – Республика Казахстан

ГЭЭ – государственная экологическая экспертиза

СЭС – санитарно–эпидемиологическая служба

КПД – коэффициент полезного действия

МДВ – метод дискретных вихрей

V – скорость ветра

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Энергия ветра имеет множество преимуществ, что объясняет, почему это один из самых быстрорастущих направлений энергии в мире.

Ветер – это чистый источник возобновляемой энергии, который не загрязняет воздух, как электростанции, которые работают на сжигании ископаемого топлива, такого как уголь или природный газ, которые выделяют твердые частицы, оксиды азота и диоксид серы, вызывая проблемы со здоровьем человека и причиняя экономический ущерб. Ветровые турбины не производят выбросов в атмосферу, которые вызывают кислотные дожди, смог или парниковые газы. А так как ветер рентабелен и не имеет цену, эксплуатационные расходы после установки ветроэнергетической установки практически равны нулю. Массовое производство и технический прогресс удешевляют ветроэнергетические установки, и многие страны мира предлагают налоговые льготы для стимулирования развития ветроэнергетики.

Сейчас ветроэнергетика переживает небывалый подъем. Благодаря мировым усилиям по борьбе с изменением климата, таким как Парижское соглашение, возобновляемые источники энергии переживают бум роста, причем энергия ветра лидирует. С 2000 по 2015 год совокупная ветровая мощность во всем мире увеличилась с 17 000 мегаватт до более чем 430 000 мегаватт. В 2015 году Китай также обогнал ЕС по количеству установленных ветряных турбин и продолжает лидировать в установке.

По прогнозам экспертов, в данной области, если такие темпы роста сохранятся, к 2050 году одна треть мировых потребностей в электроэнергии будет удовлетворяться за счет энергии ветра.

Ветроэнергетические установки, существующие в США и в Европе, имеют большую мощность и дорогую себестоимость. Для большинства областей Казахстана характерны среднегодовые скорости ветра до 5 м/с. Существующие ветроустановки рассчитаны на более мощные скорости ветра (8–10 м/с) и предназначены для использования в приморских районах.

Существуют и ряд проблем в ветроэнергетических установках. Ветроэнергетика по-прежнему должна конкурировать с традиционными источниками генерации по стоимости. Несмотря на то, что стоимость ветроэнергетики резко снизилась за последние несколько десятилетий, ветровые проекты должны иметь возможность экономически конкурировать с самым дешевым источником электроэнергии, а в некоторых местах может быть недостаточно ветров, чтобы быть конкурентоспособными по стоимости.

Хорошие наземные ветряные станции часто расположены в удаленных местах, вдали от городов, где требуется электричество.

Освоение ветровых ресурсов может быть не самым прибыльным видом использования земли. Земля, подходящая для установки ветряных турбин,

должна конкурировать с альтернативными видами использования земли, которые могут быть более ценными, чем производство электроэнергии.

Турбины могут вызывать шум и эстетическое загрязнение. Хотя ветряные электростанции оказывают относительно небольшое воздействие на окружающую среду по сравнению с обычными электростанциями, существует озабоченность по поводу шума, производимого лопастями турбины, и визуального воздействия на ландшафт.

Существующие методы проектирования ветроустановок ориентированы в основном, на установки горизонтального типа большой мощности.

В условиях высокого потребления энергии в Казахстане и вовлеченности в глобальные процессы динамичного развития возобновляемых источников энергии (ВИЭ), сфера ветроэнергетики становится крайне актуальной. В данном случае значение имеет, как ряд преимуществ и, в том числе, конкурентоспособность данного вида энергопроизводства, так и большой потенциал Казахстана в его развитии с точки зрения географического положения республики [1].

В соответствии с Национальной Программой развития ветроэнергетики Республики Казахстан на годы с перспективой до 2024 года были поставлены цели использования ветроэнергетического потенциала Казахстана для производства электроэнергии в объёме 900 млн. кВтч в год к 2015 г. и 5 млрд. кВтч. к 2024г в свете задач, поставленных в Концепции перехода Республики Казахстан к устойчивому развитию на годы и Стратегии индустриально–инновационного развития Республики Казахстан на годы по сохранению природных ресурсов и окружающей среды [2]. Необходимость внедрения ветрогенераторов в Республике Казахстан обусловлена тем, что предприятия, вырабатывающие электроэнергию еще со времен СССР, технически устарели, а строительство новых требовало больших материальных затрат. Сказалось и то, что по причине отсутствия комплектующих, строительство новых энергоснабжающих предприятий оказалось практически невозможным [1].

Установкам малой мощности с вертикальной осью уделено меньше внимания. Мало изучен выбор схем и структуры ветроустановки, работающих при малой скорости ветра. Актуальность проблемы создания методов синтеза и анализа параметров вертикальных ветроустановок, при небольших скоростях ветра, массы и габаритов устройства.

Нужно отметить, что в диапазоне скоростей от 2 до 5 м/с выходная мощность существующих ветродвигателей используется лишь малая часть принимаемой энергии ветра. Исходя из того, что при превышении расчетной скорости частоту вращения искусственно занижают, используя только часть энергии ветра, можно объяснить низкий коэффициент использования энергии ветра (0,41–0,47) современных ветроэнергетических установок. В связи с этим **актуальность** данной работы не вызывает сомнений и в научном плане является необходимостью разработки и единого подхода к целому ряду ВЭУ малой мощности с вертикальной осью вращения, технологии изготовления оси и самой лопасти.

Цель работы. Исследование конструкций ветровой установки с неподвижной вертикальной осью, разработка конструкторско–технологических решений и технологии производства и строительства ВЭУ.

Задачи исследований:

- обосновать необходимость методологического подхода к разработке и созданию вертикально–осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ);
- изготовить модель конструкции с ВО ВЭУ детально с целью получения максимальной простоты;
- оптимизировать конструкцию ВО ВЭУ по детально с целью получения максимальной выработки энергии;
- разработать технологические процессы изготовления компонентов ветроэнергетической установки.

Объект исследования – ветроустановки малой мощности.

Предмет исследования – методы проектирования ветроустановок малой мощности.

Методы исследования:

- применение известных теоретических положений теории механизмов и машин;
- аналитические методы функционально–структурного анализа прикладной аэродинамики;
- метод сравнения результатов теоретических и экспериментальных исследований;
- метод критической оценки научных результатов исследований ученых ближнего и дальнего зарубежья.

Научная новизна результатов исследования:

1. Разработаны 3Д модели ветроустановок с неподвижной осью, основанные на классификации по назначению, способу использования ветрового потока, переменности площади ветроприемника.
2. Теоретически и экспериментально обосновано применение методики расчета полых полуцилиндрических крыльев к расчету ветроустановки при динамическом синтезе ветроустановки с полыми полуцилиндрическими лопастями
3. Разработан коэффициент использования энергии ветрового потока при малых скоростях ветра.

Практическая ценность работы:

- разработанные методики расчета использованы при проектировании ветроустановок малой мощности и выборе их параметров;
- предложенные конструкции ветроустановок с дополнительными поворотными элементами отличаются меньшей массой и габаритами, и лучшими энергетическими характеристиками, чем существующие;
- результаты исследования использованы в практике научно–производственных объединений Республики Казахстан;
- результаты исследования использованы в учебном процессе и магистерских диссертациях.

На защиту выносятся:

1. 3Д модели модель ветроустановок, позволяющая вести синтез наиболее рациональных схем ветроустановок.
2. Методика синтеза схем ветроустановок на основе функционально–структурной модели.
3. Методика расчета схемы ветроустановки с полуцилиндрическими лопастями.

Апробация результатов исследования

Основные положения диссертации обсуждались и докладывались на международных конференциях и трудах, рекомендованных КОКСОН МОН: МНПК «Сатпаевские чтения» г. 2019, 2020– Алматы: КазНИТУ им К.И. Сатпаева; XII Международная научно – практическая конференции «Современные проблемы машиностроения» 2019 г. Томск: ТПУ, Россия; VIII МНПК «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2020: CENTRAL ASIA» – Нур–Султан, 2020, Казахстан ISSN 2664–2271; Вестник КазАТК, 2020. –№1 (112) ISSN 1609–1817; INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2021: CENTRAL ASIA» NUR–SULTAN, KAZAKHSTAN, DECEMBER 2021; Bulletin of the Tomsk Polytechnic University (TPU), 2019 (Russia).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 11 научных статей, из них 4 статьи международные конференции внутри страны, 1 статья зарубежной международной конференции, 4 статьи в журналах, рекомендованных КОКСОН МОН РК, 2 статьи в базе данных SCOPUS (процентиль 43).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из трех глав, содержит список использованных источников из 100 наименований, изложена на 100 страницах, содержит 42 рисунка, 7 таблиц.

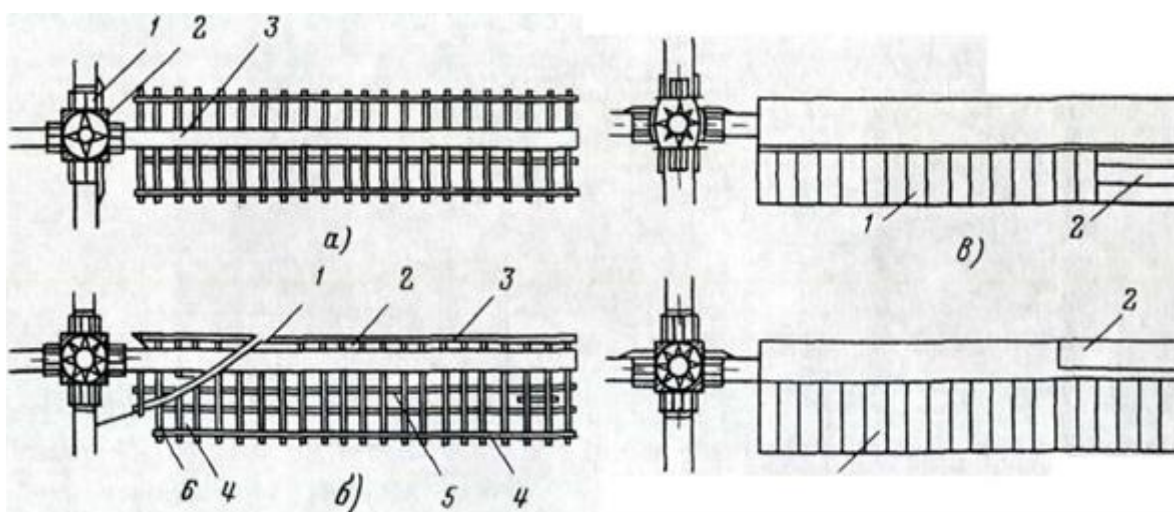
1 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СОЗДАНИЯ, ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1 Исторические аспекты и развитие ветроустановок

Ранние ветроустановки появились еще во времена древних цивилизаций, таких как Египет, Персия и Китай. С помощью этих установок перемалывали различные зерновые культуры. Использование таких ветроустановок с горизонтальной осью вращения получило широкое распространение по всему Ближнему Востоку. Немного позднее была разработана ветроустановка с горизонтальной осью вращения.

Позже уже в средневековой Европе начали совершенствовать конструкции ветряных мельниц и широкого применения их в различных сферах. Голландцы привнесли множество различных изменений в конструкции ветряных мельниц, а в основном ветроколеса.

В XVI в. примитивные поперечные паруса на деревянных полках были заменены парусами, закрепленными на деревянных брусках с двух сторон маха (рисунок 1.1). Позже для улучшения аэродинамической формы лопасти бруски были прикреплены к ее задней кромке. В более поздних конструкциях паруса были заменены тонким листовым металлом, использовались стальные махи и различные типы жалюзи и щитков для регулирования частоты вращения ветроколеса при больших скоростях ветра [?].



а – наиболее старинный тип с двусторонним расположением крыла: 1 – клинья; 2 – срезанный конец; 3 – мах; б – традиционная форма старинного датского типа (одна опорная полка вынесена вперед): 1 – убирающееся полотнище паруса; 2 – опорная полка; 3 – передняя кромка; 4 – концевая планка; 5 – продольные связи; 6 – рейка; в – крыло с жалюзи и воздушным тормозом: 1 – жалюзи; 2 – тормозные жалюзи; г – крыло с жалюзи и щитком: 1 – жалюзи; 2 – щиток

Рисунок 1.1 – Типы парусных крыльев

В XIX — начало XX веках отмечился бурным промышленным ростом и использованием ветроустановок в народном хозяйстве в Европейских странах Великобритании, Дании, Голландии, Франции и США. В этот период были разработано большинство конструктивных схем, схем компоновки ветроэнергетических установок.

В США к середине XX века было установлено несколько миллионов малых ветроэнергетических установок с единичной мощностью до 0,75 кВт. Они обычно выполнялись с двух- или трехлопастным ветроколесом крыльчатого типа, соединенным через редуктор с генератором постоянного тока. Конструкции снабжались аккумуляторной батареей. Исследовав влияние размеров ветроэнергетических установок на их эффективность, в 1930 г. американские ученые пришли к выводу, что для получения минимальной стоимости вырабатываемой электрической энергии необходимы ветроэнергетические установки больших размеров. Было спроектировано и испытано в работе двухлопастное ветроколесо крыльчатого типа диаметром 53 м и массой 16 т, которое развивало мощность 1,25 МВт при расчетной частоте вращения 28 об/мин, но ее использование было прекращено из-за трудностей, возникших при эксплуатации.

В 1925 г. во Франции был запатентован новый тип ветродвигателя рисунок 1.2, однако технические данные для его изготовления появились лишь в 60-е годы XX века.

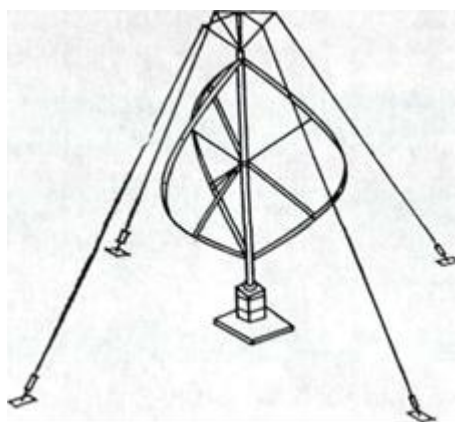
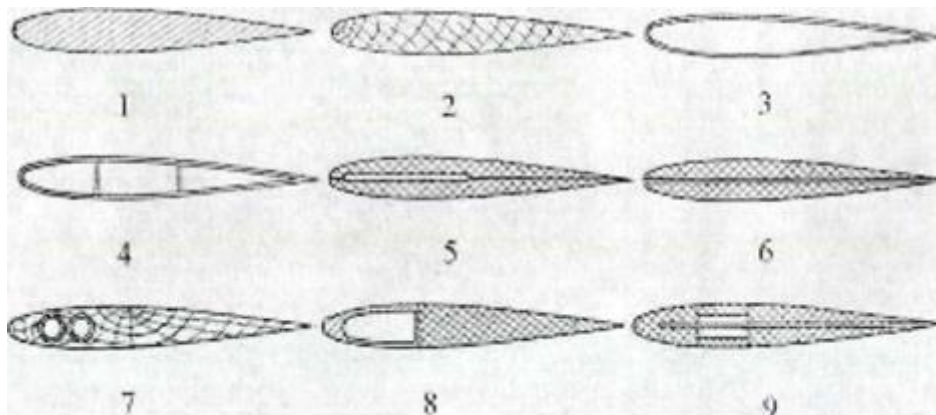


Рисунок 1.2 – Схематическое изображение ветродвигателя Дарье

Все подобные ветроустановки имеют в конструкции центральный вал, закрепленную растяжками, которые соединяются со стержневыми или консольными опорами на роторе. Принципиальное значение опорной системы состоит в том, что сравнительно легко можно достичь требуемой жесткости опоры, существенно снизить действующие на мачту изгибающие моменты от аэродинамических нагрузок, упростить конструкцию. Главный недостаток состоит в трудности получения просвета между лопастями и наклонными растяжками, в увеличении занимаемой площади, в возникновении дополнительных осевых нагрузок на мачту, изготовление самого вала и опорные подшипники, а также в возможной вибрации тросов.

Одновременно с конструкцией ветроустановки разрабатывались конструкции профиля лопасти для обеспечения максимальных несущих возможностей при минимальной себестоимости и массе [3, 108]. Различные конструктивные варианты исполнения лопастей представлены на рисунке 1.3.



1 – алюминий или пластмасса; 2 – слоистое дерево монолитная конструкция; 3 – металл, профилированный на листогибочной машине; 4 – прессованный алюминий; 5 – сталь, пенопласт, стеклопластик; 6 – алюминий, пенопласт, стеклопластик; 7 – сталь, дерево, стеклопластик; 8 – прессованный алюминий, бумажные соты, стеклопластик; 9 – алюминий, пенопласт, волокно, обшивка из термоусадочной пленки

Рисунок 1.3 – Конструкции лопастей ветроэнергетических установок

Исследования ветроэнергетических установок вертикального типа получили интенсивное развитие с начала 80-х годов XX века. В последнее десятилетие в зарубежной литературе появляется все больше работ, посвященных вертикально осевым ветроэнергетическим установкам, в первую очередь с ротором Савониуса.(52р.)

Ротор Савониуса работает аналогично чашечному анемометру, преимущественно по принципу сопротивления. Он состоит из двух лопаток в виде полуцилиндров –ковшей, которые открыты в различных направлениях (рисунок 1.4). В зоне оси ковши несколько перекрываются, так что ветер после отклонения на одном ковше устремляется на другой ковш. Благодаря этому при малых размерах используется принцип подъемной силы, т.е. КПД ротора Савониуса несколько лучше, чем чистого ротора с сопротивлением, но хуже рабочего колеса на подъемной силе. При оптимальной форме ротора Савониуса максимальная величина коэффициента использования энергии ветра достигает величин порядка 0,25 [64]. Преимуществом ротора Савониуса является то, что он начинает работать при незначительных скоростях ветра. Поэтому он применяется для вытяжной вентиляции на фабричных зданиях, грузовых автомобилях или в качестве разгонного вспомогательного устройства для ротора Дарье. Но при плохом КПД роторы Савониуса материалоемкие агрегаты и не относятся к классу больших мощностей.

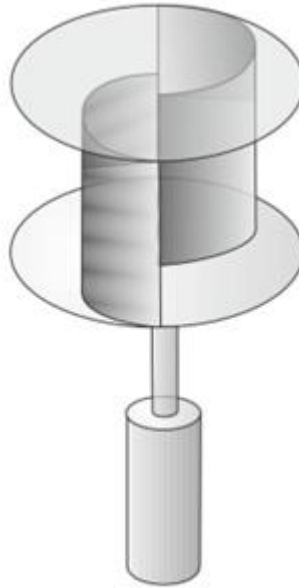
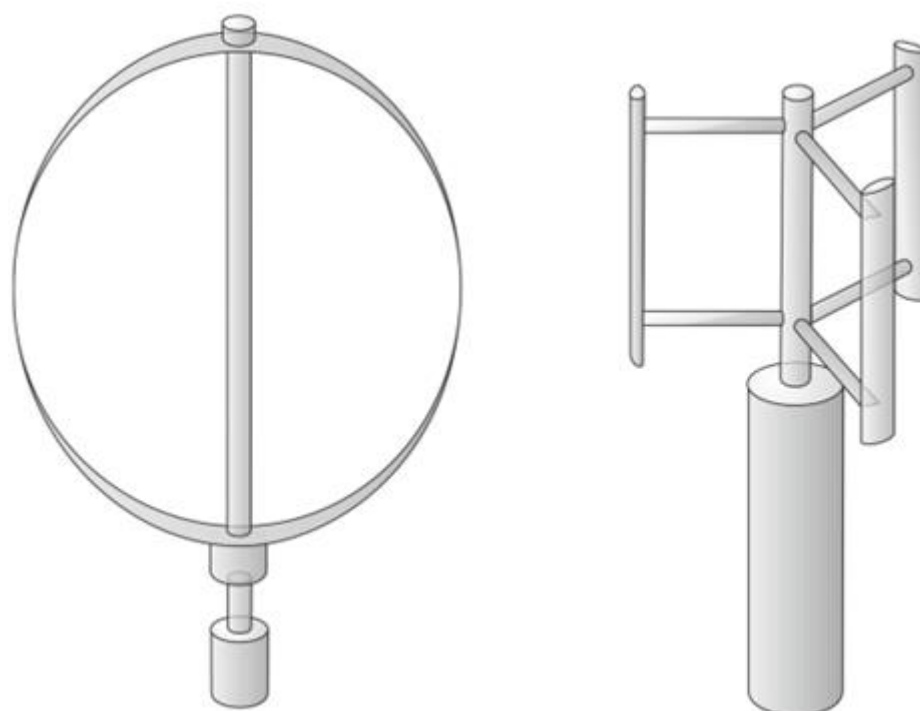


Рисунок 1.4 – Ротор Савониуса

На сегодняшний день большое распространение получили вертикально–осевые ВЭУ с ротором Дарье.

Ротор Дарье. Ротор Дарье основан на Патенте 1929 г. француза Г. Дарье [64]. Он состоит из двух или трех лопастей в форме параболы. Профиль роторных лопастей соответствует рабочему колесу (на принципе подъемной силы). Благодаря вертикальной оси вращения в противоположность ротору с горизонтальной осью вращения, здесь постоянно меняется угол атаки. КПД ротора Дарье значительно выше КПД ротора Савониуса, но достигает только 75% КПД роторов с горизонтальной осью вращения. Серьезным недостатком ротора Дарье является то, что он не в состоянии сам запуститься. Для этого используется приводной двигатель или подключается ротор Савониуса.

Дальнейшей разработкой ротора Дарье является Н–ротор, также называемый Н–Дарье–рот. Этот ротор фирмой Heidelberg–Motor обозначается как ротор Гейдельберга (рисунок 1.5). На этом роторе электрический генератор с постоянным возбуждением непосредственно интегрирован в структуру ротора и обходится без редуктора. Как и ротор Дарье он работает подобно рабочему колесу с использованием подъемной силы.



а) ротор Дарье

б) Н-ротор

Рисунок 1.5 – Семейство Дарье

Диапазон мощностей ВО ВЭУ непрерывно расширяется и достиг 4 МВт. Ветрогенераторные установки в Европейских странах получили широкое распространение уже в конце 20-го века (рисунок 1.6). Это было связано с несколькими факторами, такими как обеспечение экологической безопасности, уход от энергозависимости от России и уменьшение традиционных источников энергии. Такое большое количество ветрогенераторных установок объясняется их назначением и техническими параметрами, а также природно-климатическими условиями. Опыт Европейских стран показывает, что наиболее оптимальным условием является скорость ветра 15 м/сек. Исследования показали, что мощность ветрогенераторных установок увеличивается в восемь раз при изменении скорости ветра с 5 м/сек до 10 м/сек. Также важными параметрами являются высота монтажа ветрогенераторных установок и площадь вращения лопастей генератора.

На рисунке 1.7 представлена диаграмма выработки энергии ветром в гигаватт-часах в наиболее продвинутых странах в 2018 году.

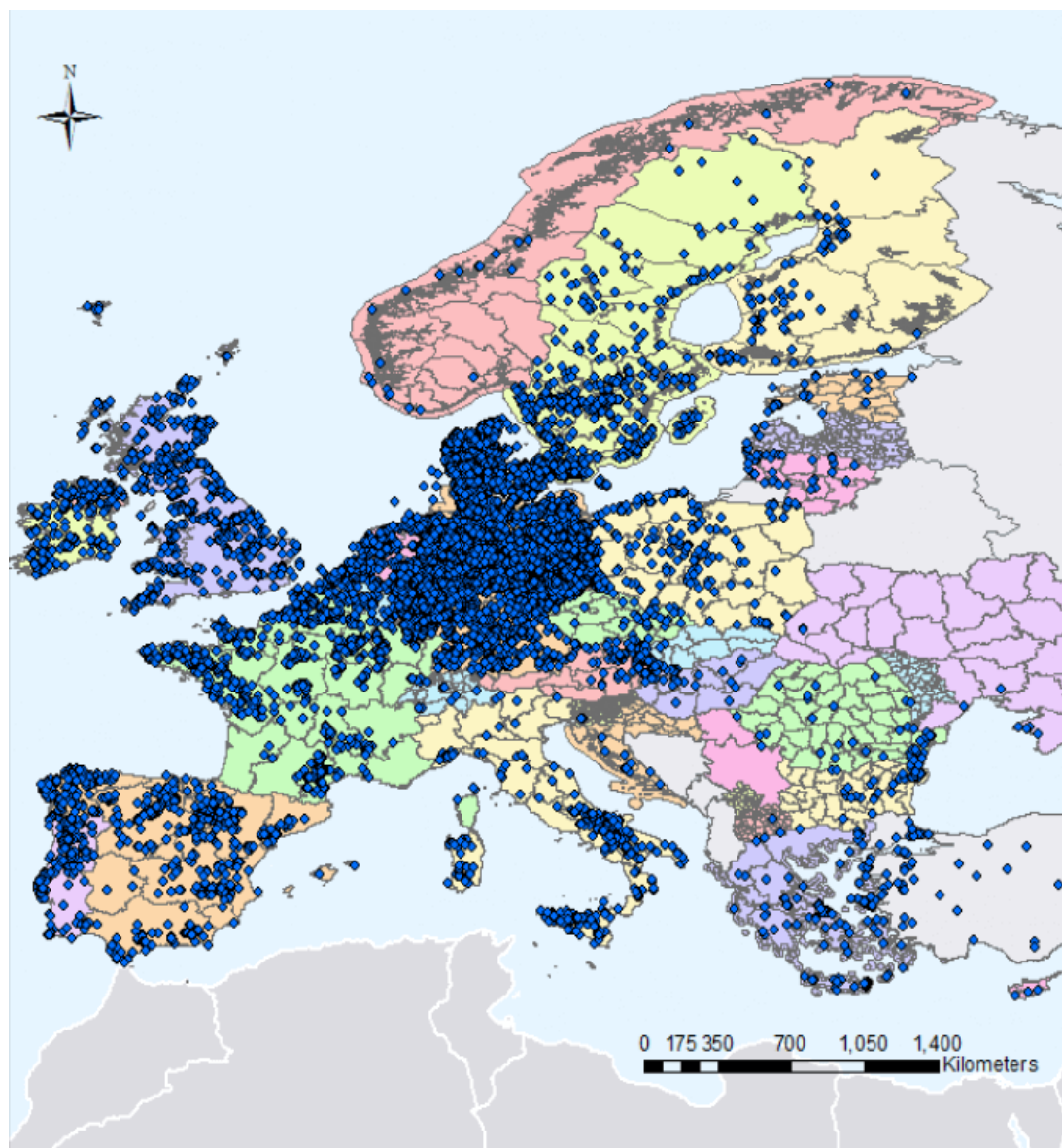


Рисунок 1.6 – Карта расположения ветрогенераторных установок в Европе

Как ранее было отмечено для выработки электроэнергии ветрогенераторными установками необходимы определенные условия. Как показали исследования наиболее перспективными местами для производства электрической энергии считаются прибрежные морские зоны, где в течении года образуются мощные воздушные потоки. Республика Казахстан тоже имеет выход к морю. Однако учитывая тот факт, что Каспийское море является внутренним закрытым водоемом скорость ветра здесь ограничена и достигается в лучшем случае 7 м/сек. Этот фактор ставит перед отечественными учеными серьезную задачу в поиске новых подходов в проектировании ветрогенераторных установок, способных вырабатывать энергию при таких условиях.

Wind Generation in Gigawatt Hours

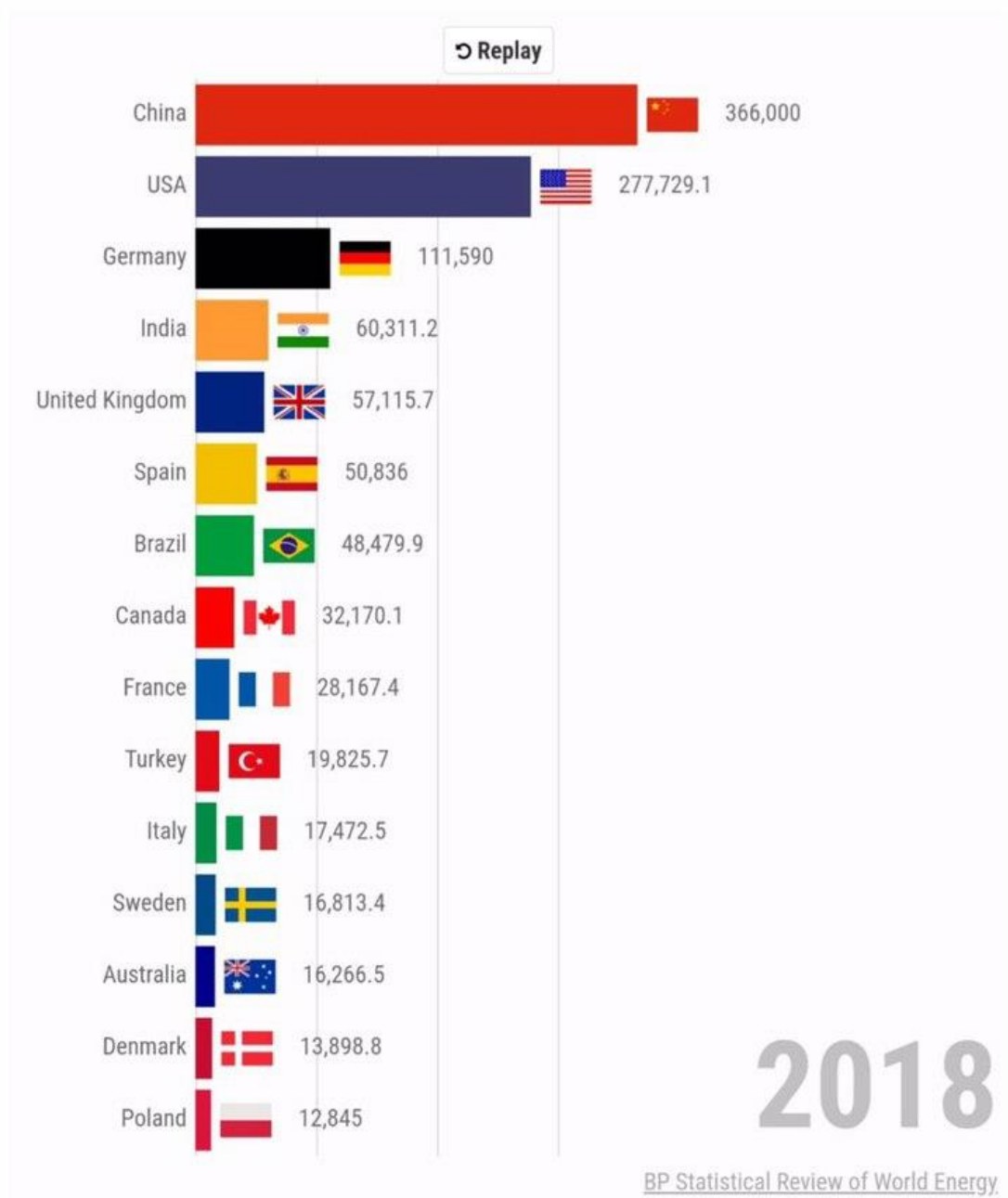


Рисунок 1.7 – Диаграмма выработки энергии ветром в гигаватт–часах в наиболее продвинутых странах в 2018 году

Во многих странах мира увеличивается интерес к малым ВЭУ все больше в связи с рядом причин (стремление потребителей к автономному энергоснабжению, доступность и простота монтажа, обслуживания, ремонта и т.д.). При этом стоимость малых ВЭУ, используемых для автономного энергоснабжения, неуклонно снижается за счет развития технологий производства комплектующих, снижения монтажных расходов и т.д. Наблюдается тенденция приближения малых ВЭУ к местам проживания человека (стремление установить ВЭУ на крыше загородного коттеджа или

многоэтажного дома, строения или сооружении). Такие решения весьма привлекательны как с технической, так и экономической точки зрения, и реализованы в США, Канаде, Европе, Индии, Китае.

В Казахстане эта тенденция также прослеживается тенденция развития малой ветроэнергетики, что подтверждается растущим объемом заявок от потенциальных потребителей на размещение ВЭУ до 3–5 кВт непосредственно на жилых домах. Кроме этого, в Казахстане растет активность агропромышленного сектора в части внедрения автономного энергоснабжения удаленных автономных объектов (энергопитание фермерских хозяйств, тепличных комплексов, пастбищ и т.д.). В связи с этим развитие малой ветроэнергетики, по мнению ряда казахстанских и зарубежных экспертов, является одной из приоритетных задач ветроэнергетики и требует детального изучения, систематизации и совершенствования ВЭУ.

1.2 Классификация ВЭУ

Казахстан является девятой крупнейшей по занимаемой площади страной в мире (2,7 млн. км²). Западная часть страны в основном занята обширными низинами, включая Каспийское и Аральское море, а центральная часть занята невысокими горами, достигающими 1 565 м в высоту. Юго–восточная и юго–западная части страны граничат с горными хребтами. Примерно 10% территории страны занята горами (рисунок 1.8). Таким образом, географические и топологические особенности страны указывают на наличие потенциального ресурса ветровой энергии, доступного к освоению.

В таблице 1.1 приводится ветряной потенциал трех наиболее благоприятных для установки ветряных электростанций регионов Казахстана.

Самым низким потенциалом для реализации проектов ветряных электростанции обладают восточные области Казахстана, поскольку средняя скорость в этих районах составляет всего 5 м/с. Однако, обычная ветряная турбина может генерировать электроэнергию и в этих условиях.

Таблица 1.1 – Генерирующий потенциал ветряной энергетики РК

Регионы передающие сетей	Потенциал ВЭС (МВт)
Западный	2200
Северный	11 878
Южный, Юго–Восточный	8162
Итого	22 240

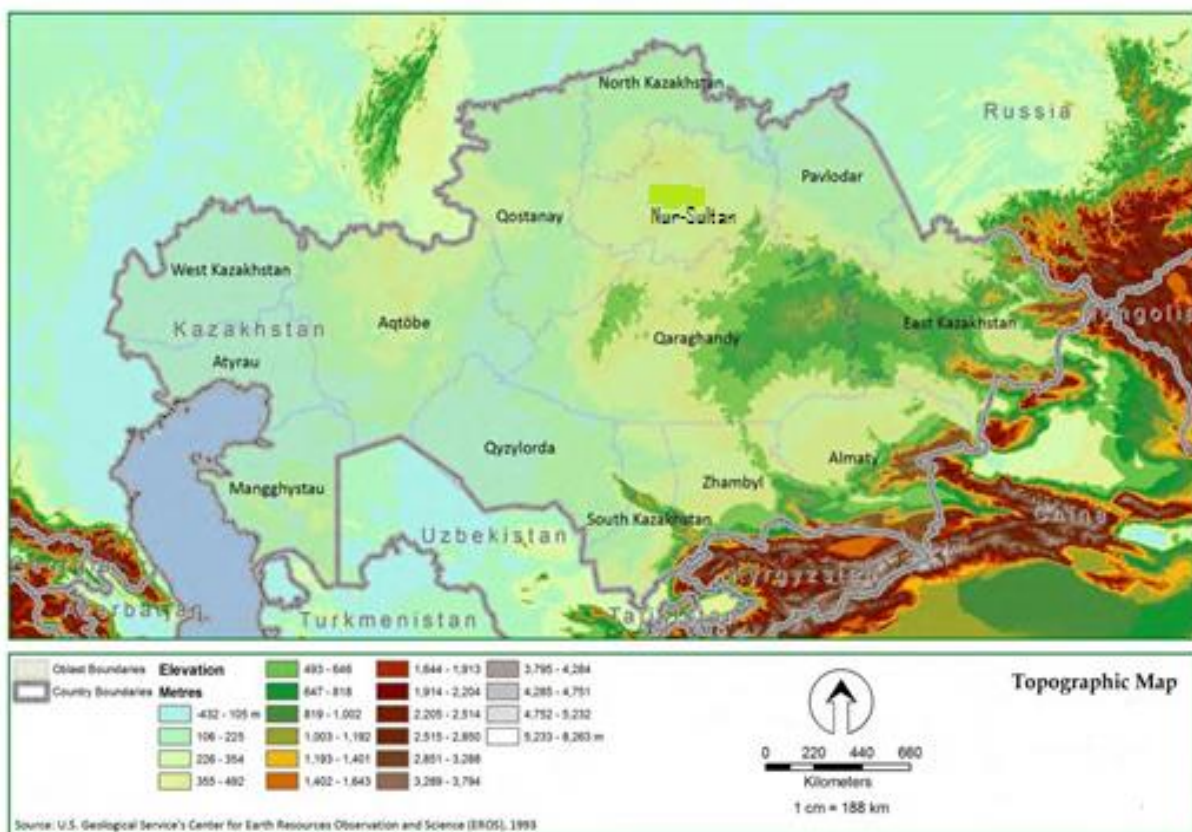


Рисунок 1.8 –Топографическая карта Казахстана

Казахстан богат ресурсами, необходимыми для развития ветровой энергии, а также свободными земельными площадями для строительства ветряных станций.

В рамках инициативы по развитию рынка ветряной энергетики в Казахстане, курируемой Программой развития ООН (ПРООН) и Глобальным экологическим фондом (ГЭФ), был разработан ветровой атлас Казахстана (рисунок 1.9). В атласе указаны значения средних многолетних скоростей ветра на высоте 80 м от поверхности земли (с разрешением в 9 км для большинства регионов и 100 м для девяти особенно перспективных районов). Зоны более слабых ветров отмечены зеленым цветом, красным – зоны более сильных ветров. Стоит отметить, что ветровой атлас указывает средние скорости ветра в различных регионах Казахстана. Периоды повышенных скоростей не учитываются. Исследования показали, что скорости ветра в республике более высокие в период с декабря по январь.

Обычная ветряная турбина может генерировать электроэнергию при скорости ветра от 3,5 до 25 м/с. Оптимальным для генерации считается скорость ветра 14 м/с. Согласно ветровому атласу, участки с высоким потенциалом ветровой энергии (7–8 м/с) занимают около 50 000 км² и расположены в 9 из 14 областей Казахстана. Наиболее высоким потенциалом обладают северные регионы (Акмолинская и Северо-Казахстанская области), где средняя скорость ветра составляет 8 м/с. Алматинская область в южной

части страны также является территорией с высоким ветряным потенциалом (средняя скорость обычно ветра достигает 8–9 м/с и >9 м/с в горных районах).

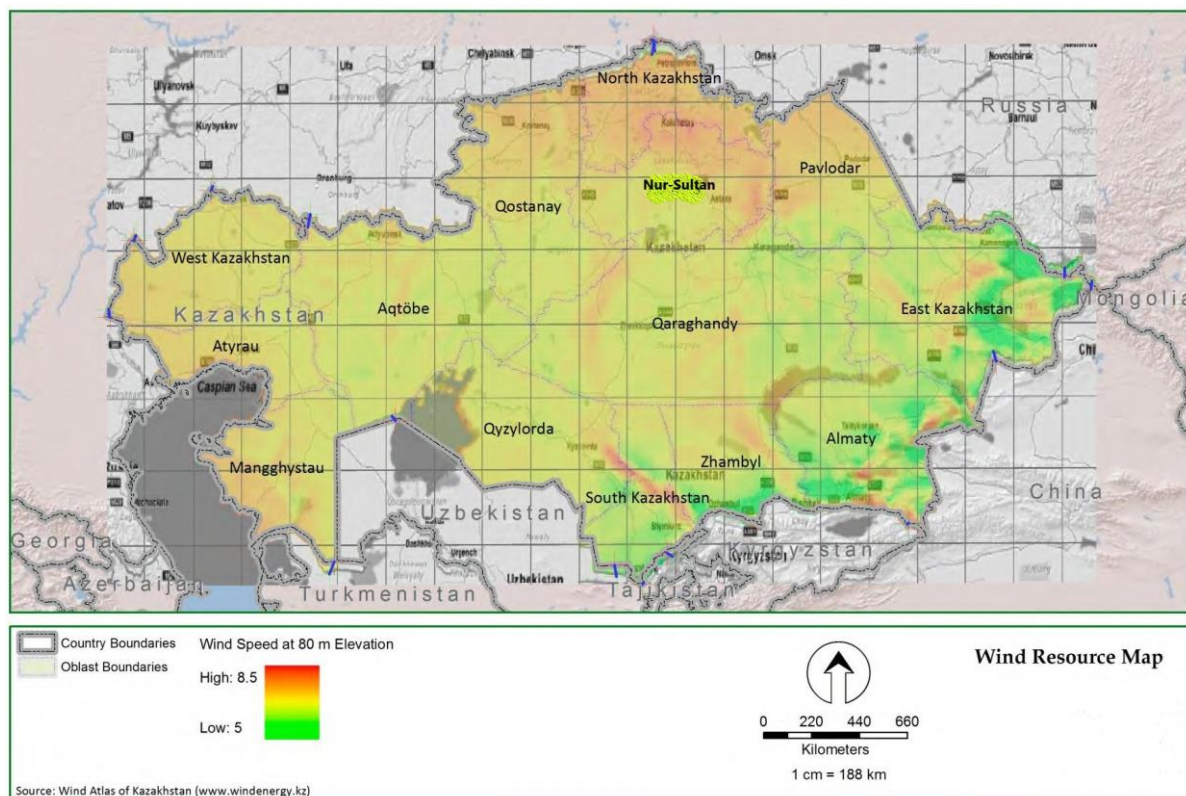


Рисунок 1.9 – Ветровой атлас Казахстана

В связи с имеющимся у страны потенциалом ветряной энергетики и растущей потребностью в электроэнергии, Министерством энергетики и минеральных ресурсов Казахстана при поддержке Программы развития ООН была разработана программа развития ветряных энергетических установок. Инициатива по развитию рынка ветряной энергии Казахстана осуществлялась в период с декабря 2015 г. по июнь 2030 г. Финансирование проекта осуществлялось Глобальным экологическим фондом (ГЭФ) при участии ПРООН и Министерства энергетики и минеральных ресурсов Правительства РК.

На основе данной программы, а также ряда других инициатив, правительство страны определило необходимые мероприятия и целевые показатели развития национальной ветряной энергетики в период с 2015 по 2030 годы, согласно которым предусматривается строительство ветряных установок общей мощностью до 2000 МВт к 2030 г. При успешной реализации этого плана к 2030 г до 5 ТВт–ч.

Казахстан обладает значительными запасами угля, нефти, газа и урана, которые активно разрабатываются в настоящее время. Более того, страна занимает третье место в центральноазиатском регионе по добыче сырой нефти после России и Китая, и имеет третьи по величине запасы, не считая членов ОПЕК. Наличие значительных запасов горючих полезных ископаемых

определяло недостаточную заинтересованность Казахстана в развитии альтернативных источников энергии. Именно поэтому следует выявлять другие стимулы, например, экономические преимущества, а также необходимость сокращения выбросов парниковых газов, стремление к увеличению мощностей местных объектов энергоснабжения.

Проекты в сфере ветряной энергетики следует размещать в непосредственной близости к существующим линиям электропередач, мощность которых позволяет принимать вырабатываемую потенциальными проектами энергию.

Освоение площадок, значительно удаленных от городских центров и магистральных ЛЭП, может быть целесообразной только в случае реализации крупных проектов, высокая затратность которых нивелируется другими преимуществами.

В таблице 1.2 показатели, характеризующие потенциальной ветряной энергии, предполагаемую мощность новых проектов к 2030 г. согласно плану МЭМР/ПРООН и мощность сетей в различных регионах.

Таблица 1.2 – Потенциал ветряной энергетики и мощность сетей в Казахстане

Регион	Потенциал ветряной энергетики, МВт	Мощность сетей, МВт	Мощность планируемых станций к 2030 г. (ПРООН), МВт
Западный	2200	601	250
Северный	11878	1270	800
Южный, Юго–Восточный	8462	818	950
Итого	22 240	4124	2000

Требования Казахстанских нормативных документов

Требования к порядку проведению оценки воздействия на окружающую среду (ОВОС) для всех видов экономической деятельности установлены «Инструкцией по проведению оценки воздействия на окружающую среду для разработки документации предварительно намечаемой, планируемой деятельности, предпроектной и проектной документации». Эта инструкция включает:

- перечень видов деятельности, для которых требуется проведение процедуры ОВОС в полном объеме;
- перечень видов деятельности, для которых необходимость полной процедуры ОВОС определяется органами, проводящими государственную экологическую экспертизу (ГЭЭ), на основании предварительной экспертизы или посредством применения пороговых уровней (набора критериев), определяемых нормативными документами;

– перечень видов деятельности, для которых достаточно подготовить.

«Заявление об экологических последствиях» и предоставить его рабочий вариант в ГЭЭ.

Проекты в Казахстане классифицируются с использованием критериев санитарной классификации производственных объектов, устанавливаемой Санитарно–эпидемиологической службой (СЭС).

Министерства здравоохранения, исходя из соображений риска для здоровья и безопасности человека, в соответствии с пятью уровнями (классами) опасности, из которых I класс – самый высокий. Чувствительность проектов оценивается в зависимости от отнесения соответствующих объектов к санитарным классам опасности:

– Проекты, отнесенные к 1 и 2 классам, характеризуются высокой степенью опасности и должны проходить полную процедуру ОВОС.

– Проекты, отнесенные к 3 классу, имеют меньшую степень опасности, в силу чего допускается неполная процедура оценки, которая, тем не менее, включает процедуру экологической оценки.

– Проекты, отнесенные к 4 и 5 классу, представляют собой существенно меньшие риски опасности и обычно не требуют более сложных, чем первоначальный скрининг, процедур оценки.

Деятельность, для которой осуществляется оценка воздействия на окружающую среду, по значимости и полноте оценки разделяется на 4 категории, с которыми соотносится санитарная классификация производственных объектов. Категории в целях проведения ОВОС определены следующим образом:

– Категория I – виды деятельности, относящиеся к 1 и 2 классам опасности согласно санитарной классификации производственных объектов, а также разведка и добыча полезных ископаемых, кроме общераспространенных. Риски высоки и требуется согласование с МООС. Для проектов категории I, включая проекты строительства автомагистралей с четырьмя и более полосами, в обязательном порядке требуется проведение полномасштабной процедуры ОВОС.

– Категория II – виды деятельности, относящиеся к 3 классу опасности согласно санитарной классификации производственных объектов, а также добыча общераспространенных полезных ископаемых, все виды лесопользования и специального водопользования. Риски ранжируются в диапазоне относительно высоких. Требуется согласование территориальных природоохранных органов.

– Категория III – виды деятельности, относящиеся к 4 классу опасности согласно санитарной классификации производственных объектов. Риски рассматриваются как низкие. Требуется согласование территориальных природоохранных органов.

– Категория IV – виды деятельности, относящиеся к 5 классу опасности согласно санитарной классификации производственных объектов, а также все виды использования объектов животного мира, за исключением любительского

(спортивного) рыболовства и охоты. Риски рассматриваются как низкие. Требуется согласование местных администраций.

ГЭЭ проводится по окончании каждого этапа процесса перед принятием решения о переходе на следующий этап. Экспертиза проводится сначала на областном уровне, а затем Министерством окружающей среды и водных ресурсов (МОСВР) и другими государственными органами, в зависимости от характера проекта и его категоризации с точки зрения проведения ОВОС. В соответствии с законодательством Казахстана процесс ОВОС имеет три этапа:

- Предварительная оценка воздействия на окружающую среду (ПредОВОС).
- Оценка воздействия на окружающую среду (ОВОС). ОВОС является обязательной для крупномасштабных проектов.
- Подготовка раздела «Охрана окружающей среды». Раздел «Охрана окружающей среды» разрабатывается на стадии рабочего проектирования в случае, если требуется реализация мероприятий по снижению воздействия, рекомендованных в ходе проведения ОВОС.

1.3 Классификация по типу применяемой ветротурбины

Основа проектирования ветроустановок, как и любых других машин, основывается на методах синтеза и анализа теории механизмов и машин, основа которых, в первую очередь, заложена в трудах П. Л. Чебышева, который предложил плодотворный метод аналитического синтеза механизмов, а также синтез механизмов по методу приближения функций.

Основываясь на эти методы анализа и синтеза можно предположить три этапа:

1. Вычисление параметров синтеза из условия минимума отклонения от заданной функции.
2. Выбор основного синтеза.
3. Упрощения аналитического выражения основного условия синтеза в виде отклонения от заданной функции.

Методы синтеза развивались в отечественной школе теории механизмов и машин. Особенности способа Лагранжа в синтезе механизмов рассмотрены Н.И. Левитским, Ю.Л. Саркисяном. Синтезу рычажных механизмов и систем управления машинами–автоматами посвящены работы С.А. Черкудинова. Выбор параметров синтеза из соотношений, определяющих наилучшее приближение шатунной кривой к дуге окружности, рассмотрен в работах И.И. Артоболевского, Н.И. Левитского, С.А. Черкудинова [4, 45, 114].

Начало структурного синтеза механизмов положено Л.В. Ассуром и продолжено в трудах А.П. Малышева, И.И. Артоболевского. В.В. Добровольский предложил единую систему механизмов, в которые механизмы объединяются в однородные группы по структурным и кинематическим признакам. Л.Т. Дворников разработал общий метод синтеза плоских рычажных механизмов на основе аналитической зависимости. Э.Е. Пейсах

обобщил исследования по синтезу структурных групп асура, составил атлас групп Асура.

Методы динамического синтеза механизмов рассматривались в трудах Л.Эйлера, решившего ряд задач динамики механизмов и предложившего первый метод численного решения дифференциальных уравнений механизмов. Я.Л. Геронимуса решил многие задачи динамического синтеза механизмов с использованием методов приближения функций. М.З. Коловский создал научную школу в динамике машин. И.И. Вульфсона рассматривал динамику машин с упругими звеньями, динамические расчеты цикловых механизмов. Е.В. Герц, В.П. Зенченко, Г.В. Крейнин использовали ЭВМ для поиска упрощений двоичных функций с любым числом переменных при синтезе пневматических приводов [4, 45, 48, 114]. Синтез самоустанавливающихся механизмов представлен в работах Л. Н. Решетова [106].

Динамический синтез механизмов в настоящее время является одним из наиболее актуальных разделов теории механизмов и машин. Исследования по структурному, кинематическому и динамическому синтезу являются основой для решения поставленной задачи синтеза ветроустановки.

Выбор структуры целесообразно вести с применением методов функционально–стоимостного анализа, в приложении к задачам машиностроения рассматривавшийся в трудах Н.К. Моисеевой, М.Г. Карпунина [50, 51], А.И. Половинкина [1, 101], В.Н. Гринберга [23, 24]. Н. Е. Жуковский, внесший большой вклад в развитие динамики машин, создал теоретические основы расчета ветродвигателей. В дальнейшем этой проблемой занимались В.Н. Андрианов, Г.Х. Сабинин, Н.В. Красовский, Е.М. Фатеев [3, 108, 111, 112]. Е.М. Фатеевым разработаны основы теории агрегатирования ветродвигателей с различными сельскохозяйственными машинами и методы эксплуатации ветроустановок в сельском хозяйстве. В.Н. Андриановым [3] разработаны основы параллельной работы ветроэлектрических станций с не ветровыми электростанциями.

Разработкой перспективных конструктивно–компоновочных схем занимались ряд исследователей: А.И. Кузнецов, В.П. Овечкин, А.С. Артамонов, Ю.М. Антонов, Г.П. Герасимов, А.С. Алиев, Г.В. Викторов, В.Н. Толмачев [70–94]. Целесообразность применения различных ветроэнергетических установок рассматривали Л.А. Преображенская [103], И.А. Сиданов [109], Я.И. Шевтер [118], а также иностранные исследователи Т. Ackermann [122], Erich Nau [125], R. Gasch [126], R.L. Hills [127], P. Rosas [130]. Проблемами аэродинамики занимались О. Martin [128], J.N. Sorensen [132]. Вопросы, связанные с прочностью лопастей ветроэнергетических установок, рассматривает R.M. Mayer [129].

Линейные приближения в основном используют полученные соотношения мощности, крутящего момента и силы сопротивления.

Ветровые электростанции активно стали внедряться с начала 2000–х годов. С точки зрения улучшения экологической обстановки нашей планеты, данный вид энергии имеет статус наиболее значимых решений – это энергии будущего.

За период 2000–2010 годов производство электроэнергии с помощью ВЭС (ветреные электростанции) в мире возросло на 30–35% [1]. Однако уже с 2010 по 2015 года эта цифра составила весьма внушительные показатели. Например, в Казахстане за 5 лет с 2010 по 2015 год, количество выработанной электроэнергии ВЭС увеличилось на 231%. Такой показатель являлся на то время лучшим среди постсоветских республик. Общее количество получаемой энергии составило 70 МВт, что сопоставимо 148-ми % гидроэлектростанций (ГЭС) мощностью до 10 МВт, расположенных на реках Республики Казахстан. Это же количество энергии не даст сжечь 100 тысяч тонн угля [2]. Одна из крупных ВЭС Казахстана «Ерейментауская», рассчитана на мощность 45 МВт, однако, имеются проекты по расширению данной станции до 115 МВт, и в перспективе до 310 МВт. И эта станция будет способствовать прекращению дефицита электроэнергии в Акмолинской области. Ещё одной из крупных ВЭС является «Кордайская» [3], что расположена в очень удачном месте с круглогодичным потоком ветра скоростью около 12 м/с. Находится на возвышенности, и имеет потенциал в 45 МВт. Она расположена вне населенного пункта и не несет опасности для окружающих, обладает мощностью в 53,7 МВт и способна снабжать электроэнергией два города размером с Капчагай.

«Сары–Булак» и «Сары–Булак 2», ветропарк находится близ города Капчагай, совокупная мощность составляет 9 МВт, в составе 11 ветрогенераторов, способных выдать 14 млн. кВтч, помимо этого рядом еще и солнечная электростанция «Капшагай» мощностью в 3 МВт и 4 млн. кВтч. За 9 месяцев 2020 года парк ветрогенераторов «Сары–Булак» выработал 15 млн. кВтч, на общую сумму в 390 млн. тенге [4].

В 2016 году «ветряки» в Казахстане впервые преодолели планку в 100 млн. кВтч. Сегодня эта цифра уже никого не удивляет. Например, в Германии, Дании и Нидерландах ВЭС вырабатывают вплоть до 40% всей электроэнергии. В странах СНГ ситуация несколько хуже, здесь больше рассматривается вариант установки «ветряков» для отдельных хозяйств или отдельного региона [1–3].

В настоящее время исследованием и разработкой ВЭС занимаются ученые Казахстана – ученики академика НАН РК, д.т.н., профессора Болотова А.В. Единственным фактором, сдерживающим дальнейшее развитие работ многих ученых, в том числе и казахстанских является их дороговизна. Мы предлагаем внедрение отечественных разработок, в которых возможно понижение цены за счет моделирования оптимального режима работы существующих ветрогенераторов с целью разработки Программы вычислений, что является краеугольным камнем диссертационной работы автора. Некоторые ученые предлагают свои разработки, которые проще в изготовлении и дешевле зарубежных аналогов. Данные аналоги имеют конструктивные отличия и проще в использовании.

Основным недостатком ветроэнергетических установок ВЭУ является сложность изготовления длинного вала и его вертикальный монтаж в

подшипниковых опорах. Изготовление опор также сложная технологическая задача: требуется обеспечить соосность опер и их жесткость. Также недостатком конструкции является большая масса вала, которая давит на нижнюю вращательную опору, создает большой момент трения, который уменьшает коэффициент полезного действия. Некоторые авторы находят решение этой задачи, применяя модульное исполнение ВЭУ. Ее делают из нескольких частей–модулей, а затем собирают на месте. Например в работе [4] автор предлагает простейший механизм , имеющий вращательное звено – вал с ротором. Ротор должен вращаться от кинетической энергии ветра и вместе с ним вращается вал. Вал передает вращение на генератор.

На рисунке 1.10 представлена схема ветровой энергетической установки (ВЭУ) с вертикальной осью вращения ротора.

Рассмотрим известную старую схему (рисунок 1.10), длинный вал 1 должен быть установлен в двух вращательных опорах 2, установленных в корпусе 3. Расстояние между опорами 2 достаточно большое. Неточности изготовления вала 1 и опор 2, деформации не позволят валу 1 свободно вращаться вместе с ротором 4 и вращать генератор 5.

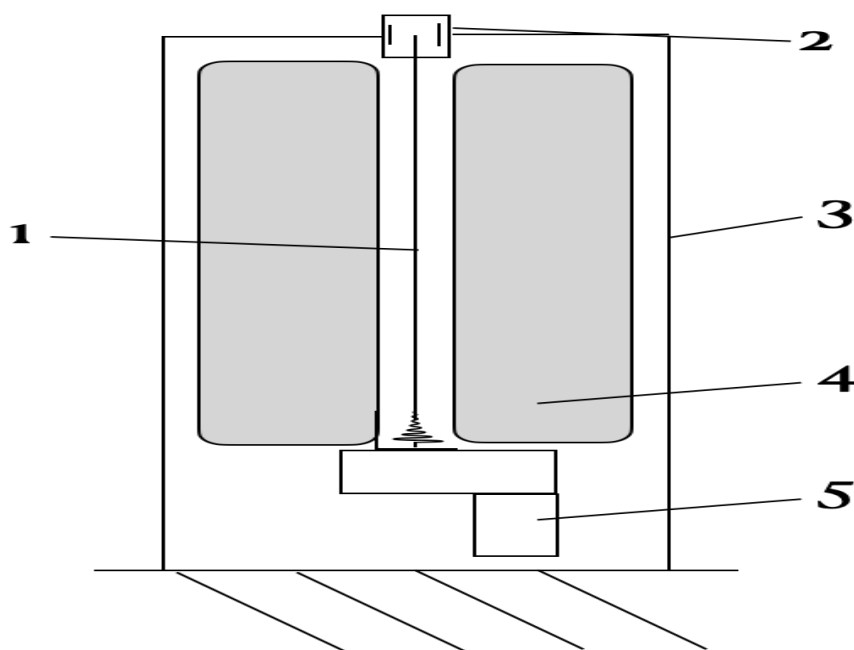


Рисунок 1.10 – Ранее используемая конструкция ВЭУ

Предлагаемая схема (рисунок 1.11) позволяет компенсировать погрешности неподвижной оси 1 за счет независимого вращения втулок 2 и изменения ротора 3, что позволит вращаться генератору 4.

Применение такой конструкции ветровой системы позволит упростить технологию изготовления. В прежней конструкции необходимо было иметь длинный вращающийся вертикальный вал, который должен быть закреплен в двух местах внизу и сверху. Для ВЭУ мощностью 3 кВт необходим вал длиной около 8 метров. Длина вала практически равна длине ротора. Сверху вал не мог

быть короче ротора, так как необходимо обеспечить крепление верхней опоры вала, обычно это были туго натянутые тросы. Изготовить такой вал с обеспечением соосности и жесткости сложная технологическая задача. Необходим специальный токарный станок, способный обрабатывать такие длинные заготовки с необходимой точностью. Такой вал трудно монтировать и обеспечить опору в верхней точке (рисунок 1.10). В работе [4] предлагается новая конструкция, достоинством которой является то, что на основание ставится неподвижная жесткая ось, в которой необходимо обеспечить соосность в местах установки втулок. Расстояние между втулками может быть меньше высоты ротора в 2–3 раза, при высоте ротора 8 м, расстояние между втулками может быть 3 м. В этой конструкции втулки вращаются вокруг жесткой относительно короткой оси длиной 3 м. несоосность втулок в пределах 2–3 мм может компенсироваться упругостью и гибкостью конструкции лопастей (рисунок 1.9).

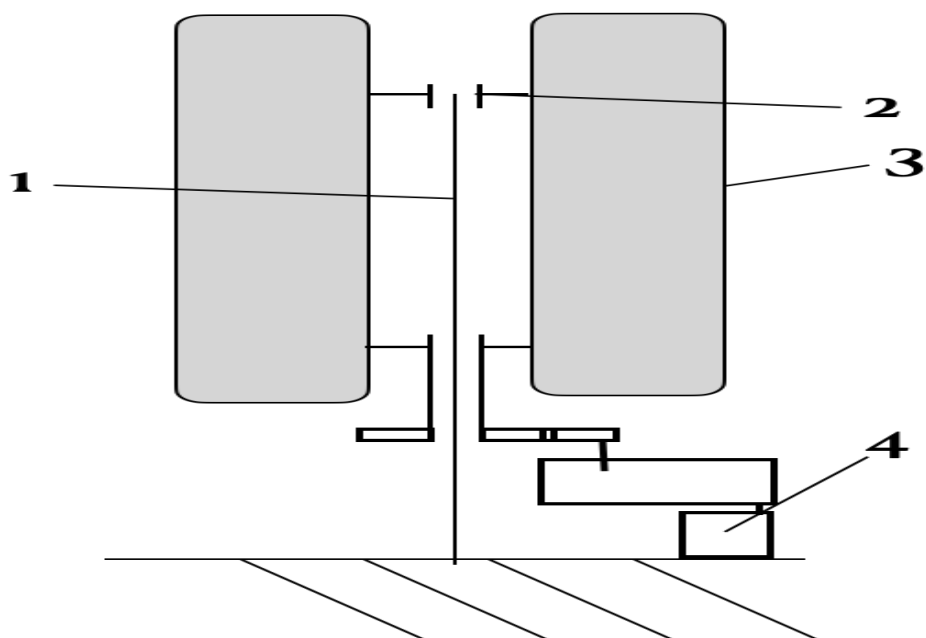


Рисунок 1.11 – Новая схема ВЭУ

Для оси не требуется опоры в верхней точке. Все эти факторы значительно упрощают технологию изготовления ВЭУ, примерно на 25 %. Следует отметить, что именно проблема длинного вертикального вала является основной, сдерживающей широкое применение роторных ВЭУ на практике. Также масса втулок намного меньше массы длинного вала, следовательно сила их веса будет создавать меньший момент трения в нижней вращательной опоре, что несомненно повысит коэффициент полезного действия (КПД) установок. Данное решение может быть применено в любой схеме ВЭУ с вертикальной осью вращения ротора, например схема Савониуса, Дарье, Эванса, Масгрува, карусельная и т.д.

1.4 Механические характеристики ветротурбин

Установки Буктукова Н.С., А.В. Болотов, Ш.А. Ершин могут работать при любом направлении ветра и скорости – от 3 до 60–80 м/с, все 300–330 дней в году. Основным недостатком ВЭУ – это, сложность изготовления длинного вала, сложность самой конструкции, громоздкость конструкции, сложность ее в обслуживании, и доставка до места установки монтажа в подшипниковых опорах, большая металлоемкость при высокой цене за металл. Опоры сложны в изготовлении, а также непростая технологическая задача, требующая в обеспечении соосности опор, их жесткость. Еще одним недостатком данного вида конструкции является большая масса вала, которая имеет усилие на нижнюю вращательную опору, создает большой момент трения и износа, который уменьшает коэффициент полезного действия установки. Для изготовления технологически сложного вала необходимы специализированные станки, для обработки от 3 м до 9 м валов и их установки в корпус непростая задача.

Еще один вариант Буктукова Н.С. (рисунок 1.12) имеет ряд преимуществ, а также множество недостатков таких как высокая трудоемкость при изготовлении и необходимость высокой точности изготовления деталей для ее надежной работы, поскольку имеет место большое количество амортизационных устройств; сложное устройство выравнивания силы взаимодействия потока на лопасть при больших скоростях и колебаниях скорости ветра, что ведет к значительному удорожанию и снижению надежности работы, а также низкая работоспособность при малых скоростях ветра. Все это ведет к высокой цене его производства, а также неконкурентоспособность на рынке.

Ветроэлектростанция состоит (рисунок 1.12) из двух и более лопастей 7, вала 4, опорной оси 5, грузиков 11, осей 6, траверс 3, шарнирного крепления (подшипников) 8, V –образных рычагов 9, тяг 10, роликов 12, генераторов 13, фундаментов 14 генераторов 13, наружных 15 и внутренних парусов 16, верхнего кольца 1 и нижнего опорного кольца 2. Причем диаметр верхнего кольца 1, например, меньше диаметра нижнего опорного кольца 2. Верхнее кольцо 1 через траверсы 3 жестко соединен с валом 4. Вал 4 шарнирно соединен с опорной осью 5 (Фиг. 1), которая жестко крепится к фундаменту (на чертеже не показан). Верхнее кольцо 1 и нижнее опорное кольцо 2 жестко соединены осями 6 лопастей 7. Лопастей 7 выполнены в виде сегментов конического цилиндра и между внешней и внутренней кромкой по торцам посредством шарнирного крепления (подшипников) 8 присоединены к осям 6. К корпусу подшипника 8 лопастей 7 жестко прикреплены центральной частью V–образные рычаги 9. V–образные рычаги 9 шарнирно соединены между собой тягами [61].

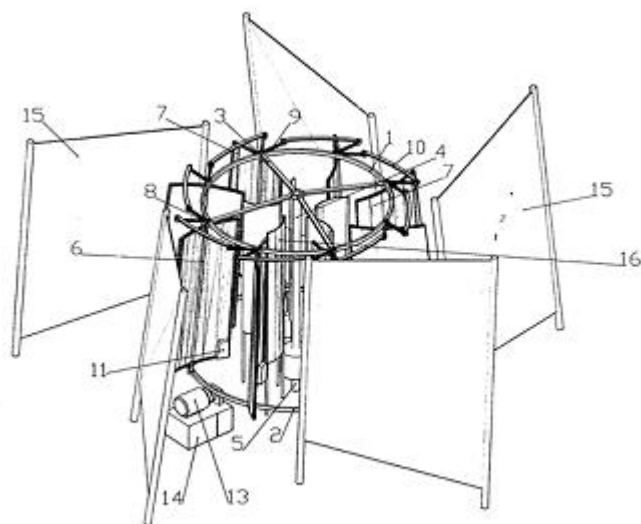


Рисунок 1.12 – Ветроэлектростанция Буктукова

Установки Быкова Е.Н., Елистратова В.В., Жатесова С.С. Согласно проведенным исследованиям модели новых ветроэнергетических установок, предложен ряд конструктивных изменений в существующих конструкциях с целью повышения общей энергетической эффективности установки. Опираясь на проведенный анализ угла установки лопасти можно предложить установку лопастей, приводящую к обратному вращению ротора.

Для дополнительного повышения эффективности предлагается установка дополнительного концентратора потока, который жестко крепится на середине лопастей, вследствие чего вращается вместе с ними. Конструкция концентратора потока, представляет собой диффузор с аэродинамической формой стенки, т. е. сечение имеет вид аэродинамического профиля крыла.

Для уменьшения влияния (турбулизации) турбулентности потока дугой крепления, предлагается выполнить ее таким образом, чтобы ее сечение имело хорошо обтекаемую аэродинамическую форму [?].

Однако имеются большие недостатки данной конструкции – это высокая цена на изготовление и необходимы специализированные станки и оборудование для изготовления геометрически сложного крыла на данный тип ВЭУ. Технологически трудные задачи для их выполнения на данный момент в существующих реалий на местных предприятиях города Алматы. Также недостатком данных ВЭУ со спиральной формой крыла является не имеет жесткости по длине вала так как закреплено в плоскости вращения, невозможность эксплуатации при сильных ветрах и отбор ветра только кинетической энергии у ветрового потока [58].

Установка Журинова М.Ж., Надирова Н.К., Солодова Е.В. Ветроустановки с вертикальной осью вращения с подвижными лопастями, регуляторами скорости. Под действием силы ветра лопасти ветроколеса изменяют угол наклона вокруг горизонтальной оси, есть установки и с вертикальной осью. Принимая на себя напор ветра, в то время как на противоположной стороне

ветроколеса они находятся в плоскости. Такое расположение лопастей позволяет снизить сопротивления ветра и значительно снизить тормозящее давление на ветроколесо. Известна ветроэлектростанция Буктукова [57] с вертикальной осью вращения, имеющая вал и лопасти в виде двух и более сегментов трубы, при этом каждая лопасть шарнирно прикреплена к кронштейну в торце между внутренней кромкой и центром.

К недостаткам таких устройства можно отнести неполное использование энергии ветра вследствие его тормозящего воздействия на поверхность ветроколеса, относительная сложность изготовления устройства. Кроме того, подобные конструкции могут работать, очевидно, лишь при достаточно сильном напоре (скорости) ветра.

Известен роторный вертикальный ветродвигатель [62], приемники энергии которого (лопасти) выполнены в виде шторок парусного типа, один край которых закреплен по образующим неподвижным колоннам, а другой край связан с соответствующим краем шторки противоположной колонны тягами, что обеспечивает заворачивание шторки вокруг одной колонны и разворачивание шторки вокруг противоположной колонны (рисунок 1.13).

Ветроустановка содержит ветроколесо с вертикальной осью вращения – валом 1, лопастями 2, подвижно закрепленными на кронштейнах–осях 3, на валу жестко закреплен опорный диск 4, на котором расположен центробежный регулятор скорости 5, в нижней части установки расположено зубчатое колесо 6, редуктор 7, электрогенератор 8, основание вала опирается на подшипник 9.

Ветроустановка работает следующим образом. При отсутствии ветра лопасти находятся в сложенном положении, и ветроколесо в профиль выглядит как горизонтально расположенный диск, закрепленный на валу 1 (фиг.1). Лопасти 2 в нерабочем положении расположены под углом к горизонту (5 – 10) с помощью упоров 10, образуя зазор между лопастью и горизонтальной плоскостью – диском 4. Под действием ветра лопасти 2 с левой стороны ветроколеса (вращение по часовой стрелке) поднимаются над горизонтальной плоскостью на 80–85°, принимая на себя напор ветрового потока, – колесо начинает вращаться, при этом лопасти совершают маховых движения – вверх–вниз. Подъему лопасти выше заданного значения препятствует ограничитель 11. С правой стороны ветроколеса лопасти остаются в положении, близком к горизонтальному, за счет собственной массы и вследствие давления на них потока ветра. Поэтому нерабочая (правая) сторона ветроколеса не испытывает какого–либо значительного тормозящего действия ветра, как это имеет место в известных устройствах подобного типа. В случае резкого возрастания скорости ветра срабатывает регулятор скорости 5 – груз регулятора вместе с прикрепленным к нему штоком 12 начинает перемещаться, преодолевая сопротивление пружины 13, и шток 12 входит в отверстие на ограничителе 11, препятствуя подъему лопасти до максимального значения, уменьшая угол ее наклона к горизонту – вплоть до минимального значения, – частота вращения ветроколеса резко падает.

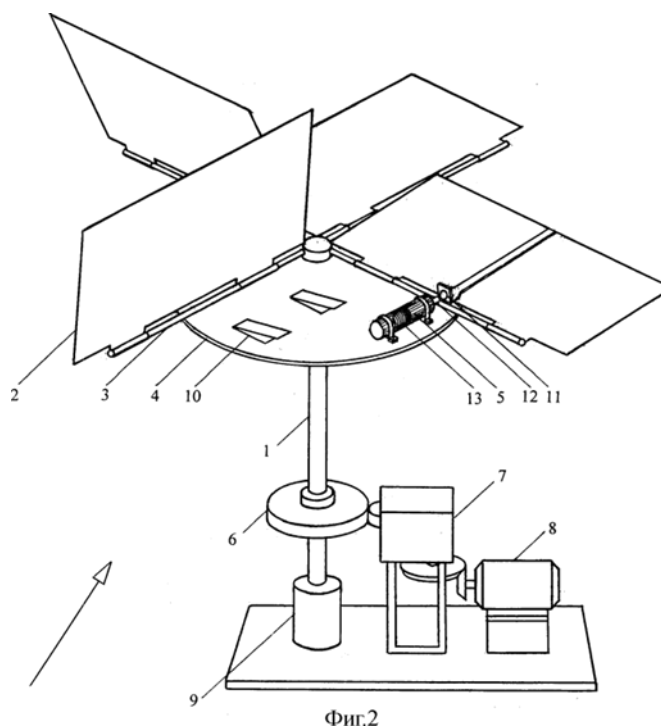


Рисунок 1.13 – Общий вид ветроустановки в нерабочем положении (вид сбоку)

Недостаток известного устройства – усложненность конструкции и относительно невысокие прочностные характеристики ветродвигателя: наличие тяг, гибких шторок, подразумевающее их постоянное сворачивание и разворачивание, что требует достаточной прочности на износ применяемого материала; отсутствует также возможность регулирования частоты вращения ротора. Кроме того, не полностью используется энергия ветра, поскольку присутствует тормозящее действие ветрового потока на значительную часть ротора. [62],

Известно устройство для преобразования потока воздуха в механическую работу [59], содержащее прямоугольные лопасти, подвижно установленные на горизонтальном коленчатом валу, на каждом конце которого закреплено водило, шарнирно соединенное с лопастью с помощью серьги, длина которой равна радиусу кривошипа коленчатого вала, при этом радиус кривошипа равен $1/4$ ширины лопасти, коленчатый вал и водило соединены с трансмиссионным валом с помощью замкнутых цепей через звездочки с передаточным отношением 1:2. 2

Недостаток известного устройства – усложненность конструкции, наличие многочисленных передаточных узлов, что создает определенное дополнительное сопротивление ветровому потоку при воздействии на лопасть при изменении ее положения, а также предназначение устройства как преобразователя энергии ветра только в механическую работу.

Известна ветроэнергетическая установка Буктукова Н.С., Озерова Г.И. ([60], ротор ветродвигателя [61],

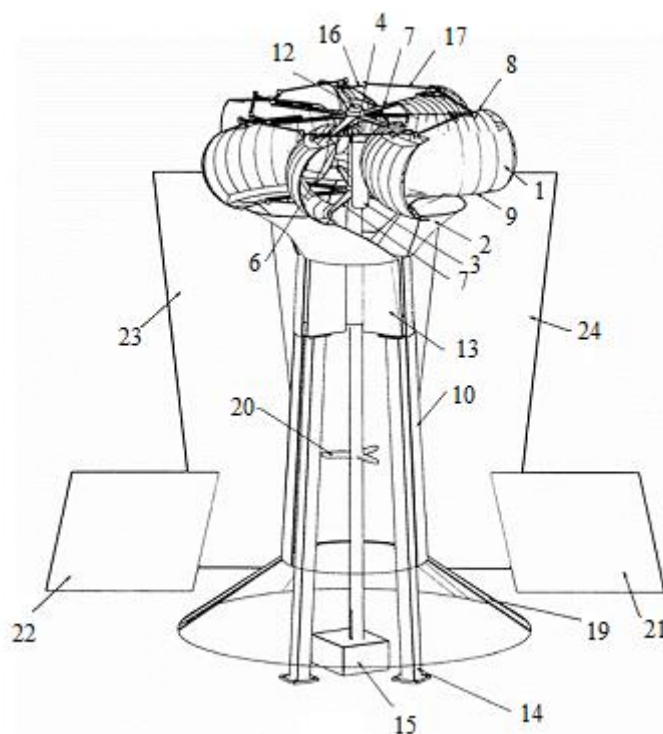


Рисунок 1.14 – ВЭУ Буктукова–Озерова

Технический результат – выработка электроэнергии при отсутствии ветра в ясную погоду, повышение коэффициента использования энергии ветра во времени вне зависимости от его направления и скорости, упрощение конструкции и улучшение эксплуатационных характеристик, снижение стоимости изготовления и эксплуатационных расходов, повышение надежности при повышении единичной мощности ветроэлектростанции.

Это достигается тем, что электростанция имеет груз, кронштейны, лопасти, выполненные в виде двух или более сегментов наружной части полого тора и имеющие верхние и нижние кромки, а также внутренние и внешние торцы. Каждая лопасть между внутренней и внешней торцами со стороны нижних и верхних кромок шарнирно закреплена к кронштейну. Кронштейны жестко прикреплены к валу, к верхней части вала между кронштейнами жестко прикреплен отрезок трубы рисунок 1.14. Вал соединен с электромеханической установкой. Над отрезком трубы жестко к валу прикреплена ось шкива, на которую шарнирно насажен шкив, через шкив переброшена гибкая тяга. Один конец гибкой тяги соединен с верхней кромкой лопасти у внутреннего торца лопасти, а другой конец соединен с грузом, груз свободно расположен внутри отрезка трубы. Ниже кронштейнов установлен подшипниковый узел, корпус подшипникового узла жестко соединен с опорами. В шарнирном креплении к каждой лопасти над верхней кромкой жестко закреплены V-образные рычаги, концы которых шарнирно соединены между собой тягами. На опоры закреплена обшивка, к верхней части обшивки между опорами жестко закреплены изогнутые воздуховоды. Нижняя часть обшивки расширена в форме конуса широким основанием к земле и установлена выше поверхности

земли. Поверхность под конусом и половина обшивки по всей высоте и воздухопроводы окрашены в черный цвет, а противоположная сторона обшивки и конусообразная часть выполнены прозрачными. Недостатком данного технического решения является невозможность выработки электроэнергии в безветренную ясную погоду, а также наличие штоков, рычагов со стойкой, г-образного рычага с грузом, что создает громоздкость конструкции. Сложная конфигурация лопасти трудна в изготовлении. Громоздкость конструкции ведет к большой металлоемкости и высокой цене и опять, как и во многих установках проблемой конструкции является длинный вал и обслуживание узлов и деталей. Также данная конструкция сложна в монтаже и доставке до места установки.

ВЭС состоит (рисунок 1.14) из лопастей 1, воздухопроводов 2, отрезка трубы 3, шкива 4, груза 5, гибкой тяги 6, кронштейнов 7. Лопасти 1, выполнены в виде сегментов наружной части полого тора и имеют верхние 8 и нижние 9 кромки, а также внутренние 10 и внешние 11 торцы. Каждая лопасть 1 между внутренней 10 и внешней 11 торцами со стороны нижних 9 и верхних 8 кромок шарнирно закреплена к кронштейнам 7. Кронштейны 7 жестко закреплены к валу 12. Вал 12 вращается внутри подшипникового узла 13. Корпус подшипникового узла 13 прикреплен к опорам 14. Вал 12 соединен снизу с электромеханической установкой 15. В шарнирном креплении каждой лопасти 1 над верхней кромкой 8 жестко закреплены V-образные рычаги 16, концы которых шарнирно соединены между собой тягами 17. К валу 12 между кронштейнами 7 жестко прикреплен отрезок трубы 3, над которой жестко прикреплена ось шкива 4. На эту ось шарнирно насажен шкив 4, через шкив переброшена гибкая тяга 6, один конец гибкой тяги 6 соединен с верхней кромкой 8 лопасти 1 у внутреннего торца 10 лопасти 1, а другой конец соединен с грузом 5. Груз 5 свободно расположен внутри отрезка трубы 3. На опоры 14 закреплена обшивка 18, к верхней части обшивки между опорами жестко закреплены изогнутые воздухопроводы 2. Нижняя часть обшивки 18 расширена в форме конуса 19 и установлена выше поверхности земли. Поверхность под конусом и половина обшивки 18 по всей высоте и воздухопроводы 2 окрашены в черный цвет, а противоположная сторона обшивки 18 и конусообразная часть 19 выполнены прозрачными.

К валу 12 прикреплены, через обгонную муфту, дополнительные лопасти 20.

С окрашенной стороны по обеим сторонам ВЭС к земле прикреплены зеркала 21 и 22. С покрашенной стороны обшивки 18 по обе стороны от ВЭС установлены на земле зеркала 23 и 24 до верхней кромки воздухопроводов 2.

Предлагается иной метод и схема, где на основание ставится неподвижная жесткая ось, в которой необходимо обеспечить соосность в местах установки втулок. Расстояние между втулками может быть меньше высоты ротора в 2–3 раза, при высоте ротора 8 м, расстояние между втулками может быть 3,0 м. В новой конструкции вращаются втулки вокруг жесткой относительно короткой оси длиной 3,0 м. Несоосность втулок также может иметь достаточно большие значения 2–3 мм. Эта погрешность будет компенсироваться упругостью и

гибкостью самой конструкции лопастей. Для изготовления жесткой неподвижной оси понадобится цельнотянутая бесшовная труба ГОСТ 8732–79 диаметром 89 мм толщиной стенки 8 мм ст. 20, длиной 6м, по рыночной стоимости 350–380 тысяч тг. за 1т. Вес трубы составит 96 кг, дополнительный металл на втулки и расходный материал составит 20 000 тенге. Нет необходимости в специализированных станках, можно изготовить в любых условиях, без применения специализированных оснасток.

Применение предлагаемой конструкции ветроустановки позволит упростить технологию изготовления установки и, следовательно, ее стоимость. В конструкции описанной выше необходимо было иметь одну неподвижную ось, длина которой ограничена требованиями точности, жесткости и транспортировки конструкции. Возможность упрощения в механической обработке, использование легко доступных материалов, заготовок, а также удешевление самой конструкции. Применение составной оси ветровой установки позволит изготовить ветровую установку с практически неограниченной длиной оси, с невысокой стоимостью. Облегчение транспортировки и монтажа на месте эксплуатации.

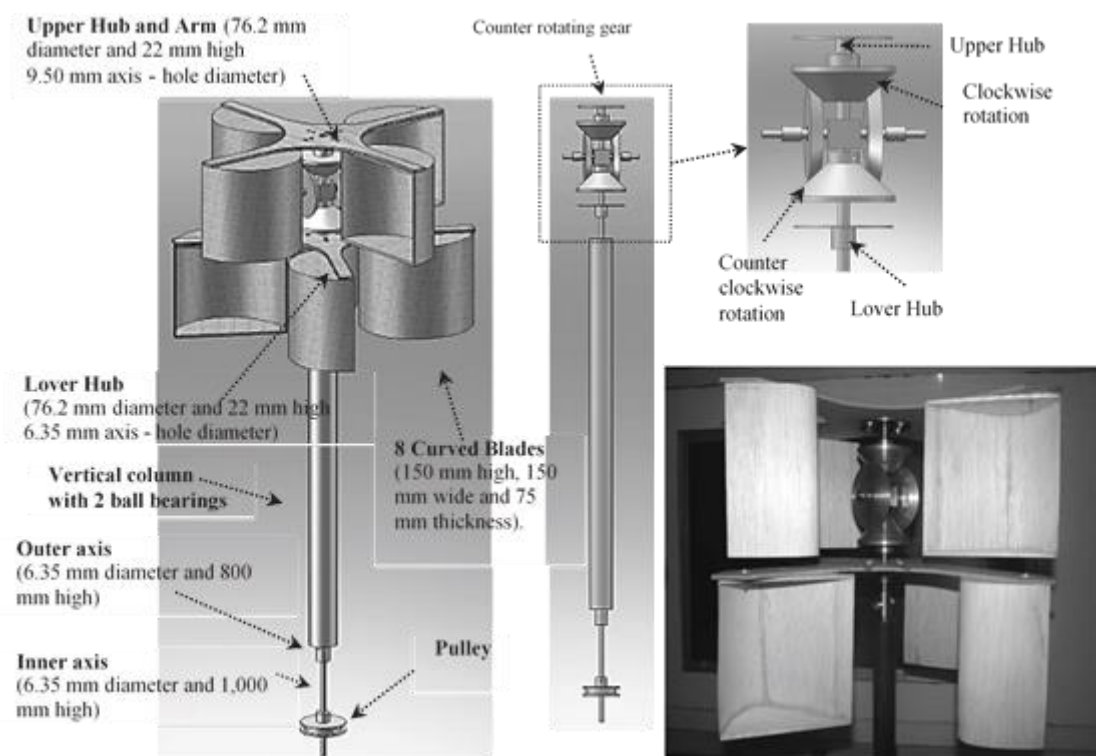


Рисунок 1.15 – Двух вальная ко–осевая противовращающаяся ветряная турбина CR–VAWT

На рисунке 1.15 показана установка по Патенту Tanate Chaichanaa*, Sumrun Chaiteerв из Университета Чиангмай, Таиланд.

Двух вальная ко–осевая противовращающаяся ветряная турбина (CR–VAWT) состояла из 2 роторов, по 4 лопасти из дерева на ротор. Модель клинка

имеет форму полого полуцилиндра высотой 300 мм, шириной 150 мм и толщиной 1 мм. Оба конца изогнутого лезвия прикреплены полукруглыми пластинами одинаковой толщины. Диаметр обоих роторов составляет 150 мм, а развертка – 0,045 м². Внутренняя ось вращается по часовой стрелке, а внешняя ось вращается против часовой стрелки. Внутренняя и внешняя оси находятся на одной оси и имеют одинаковую ось вращения. Вращающаяся шестеренка использовалась для соединения 2 внутренней и внешней оси. Внутренняя ось соединялась со шкивом для измерения выходной мощности.

Ветровая энергоустановка Аскарва Е.С. с вертикальной осью вращения двух ветровых роторов (рисунок 1.16), содержащая лопасти, основание, генератор, лопасти крепятся на втулки, которые соосно установлены на неподвижную вертикальную ось с возможностью свободного проворота, ось жестко закреплена в основании, втулки кинематически связаны с ротором генератора, отличающаяся, тем что имеются дополнительные лопасти, повернутые в другую сторону относительно лопастей, дополнительные лопасти крепятся к дополнительным втулкам, которые кинематически связаны со статором генератора, который имеет возможность вращения относительно своей оси, расстояние крепления дополнительных лопастей от оси меньше расстояния крепления лопастей. Применение предлагаемого технического решения позволит значительно увеличить КПД ветроустановок с вертикальной осью вращения, примерно в 1,5 раза, что несомненно расширит область применения подобных установок.

Недостатком конструкции является большая масса вала, которая давит на нижнюю вращательную опору, создает большой момент трения, который уменьшает коэффициент полезного действия установки.

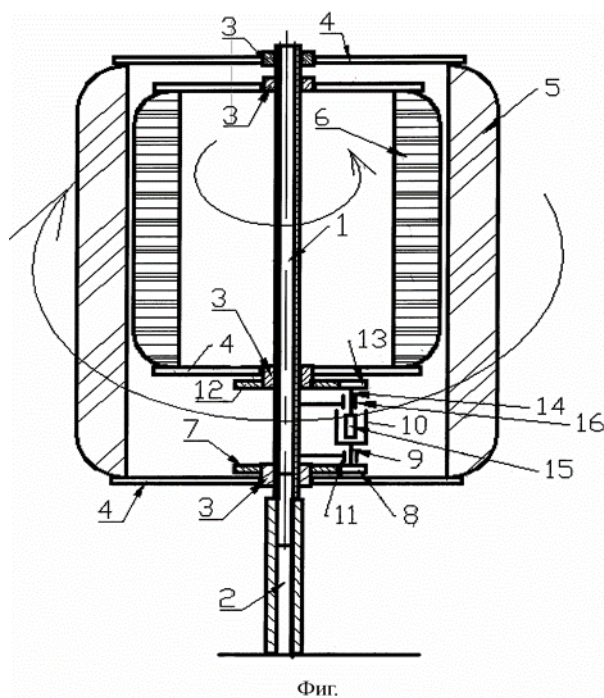


Рисунок 1.16 – ВЭУ Аскарва

Также Аскарковым Е.С. была разработана система ветровых энергетических установок с вертикальной осью с одним основанием, содержащая лопасти ротора, основание, генератор, лопасти крепятся на втулки, которые соосно установлены на неподвижную вертикальную ось с возможностью свободного проворота, ось жестко закреплена в основании, втулки кинематически связаны с генератором отличающаяся тем, что сверху на неподвижную вертикальную ось установлено коромысло с возможностью свободного проворота, с каждой стороны коромысла на него симметрично установлено несколько дополнительных осей, имеющих свои втулки с лопастями, кинематически связанные каждые со своим генератором, посередине коромысла перпендикулярно его оси установлена балка на конце которой имеется флюгерный щит. Применение предлагаемого технического решения позволит значительно повысить эффективность использования ветровых установок с вертикальной осью вращения ротора, что несомненно расширит область применения подобных установок.

Ветроустановка (рисунок 1.16) состоит: из вертикальной оси 1, которая жестко установлена в корпусе– основании 2. На оси 1 установлены четыре втулки 3 с возможностью свободного проворота, к втулкам 3 в диаметральной направлении прикреплены распорки 4, к которым прикреплены вертикальные лопасти ветрового ротора 5 и 6. Лопасти 5 крепится к распоркам двух втулок 3, которые находятся по краям оси 1, лопасти 6 крепятся к распоркам 4 двух других втулок 3. Лопасти 5 повернуты так, чтобы при воздействии ветра вращаться по часовой стрелке. Лопасти 6 повернуты так, чтобы при воздействии ветра вращаться против часовой стрелки. Лопасти 5 и 6 ставятся на разном расстоянии от оси 1, так чтобы не мешать взаимному вращению в разные стороны. На нижней втулке 3 оси 1 соосно и жестко установлено зубчатое колесо 7, кинематически связанное с зубчатым колесом 8, жестко установленным на валу 9 статора 10 генератора. Вал 9 вращается в подшипнике 11, внешнее кольцо которого жестко закреплено на оси 1. На соседней втулке 3 установлено зубчатое колесо 12, кинематически связанное с зубчатым колесом 13, жестко установленным на валу 14 ротора 15 генератора. Вал 14 вращается в подшипнике 16, внешнее кольцо которого жестко закреплено на оси 1.

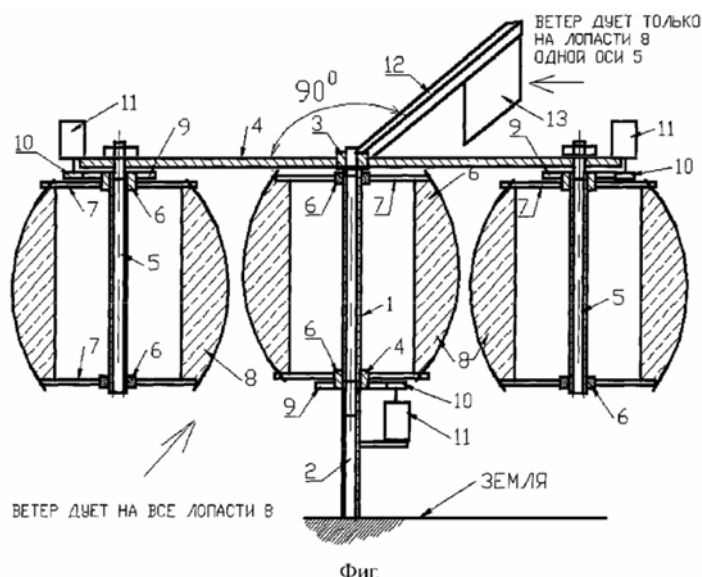


Рисунок 1.17 – Новая ВЭУ Аскарова

Ветроустановка состоит (рисунок 1.17): из основной неподвижной оси 1, которая установлена в основании 2, которое жестко установлено на земле. Сверху на ось 1 установлена втулка 3, к которой прикреплено коромысло 4, втулка 3 вместе с коромыслом имеют возможность свободного проворота вокруг оси 1. С каждой стороны от оси 1 на коромысле 4 симметрично закреплены несколько вспомогательных осей 5. На фиг. показано две оси 5, по одной с каждой стороны. На каждой оси 1 и 5 установлены по две втулки 6 с возможностью свободного проворота, к втулкам 6 в диаметральной направлении прикреплены распорки 7, к которым прикреплены вертикальные лопасти 8 ротора. На одной втулке 6 осей 1 и 5 соосно и жестко установлено зубчатое колесо 9, кинематически связанное с зубчатым колесом 10, жестко установленным на валу генератора 11. Генератор 11 основной оси 1 крепится к основанию 2, а генераторы 11 вспомогательных осей 5 крепятся к коромыслу 4. На середине коромысла 4 ему перпендикулярно жестко установлена балка 12, на конце которой установлен флюгерный щит 13, плоскость которого перпендикулярна оси коромысла 4.

Недостатком данной конструкции является сложность конструкции и монтажа, а также обслуживание данной установки.

Предлагаемая конструкция Юсупова Е.К. (рисунок 1.18) ветродвигателя с вертикальным валом позволит наиболее полно использовать, как силу малого ветра, так и огромную силу, заключенную в порывах континентального ветра за счет того, что используются совмещенные на одном вертикальном валу двухъярусный ротор Савониуса и Геликоидный ротор. Двухъярусный ротор Савониуса устанавливается на вертикальном с помощью трех дисков, между которыми по парно установлена лопасти ротора, сдвинутые на 90° и находящиеся во внутреннем пространстве геликоидного ротора, установленного на этом же валу с помощью двух трехплечих дисков,

установленных в верхней и нижней частях вала, на плечи которых установлены лопасти геликоидного ротора.

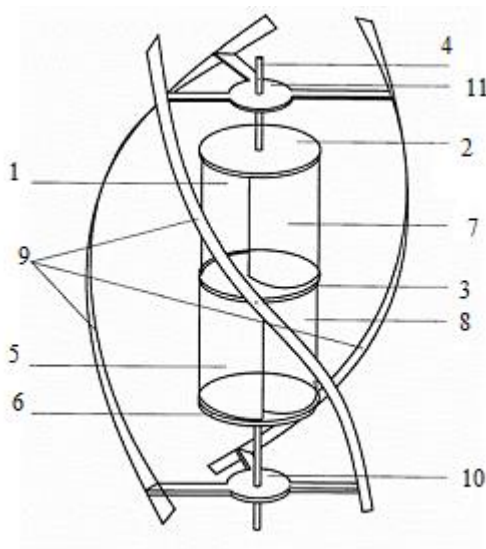


Рисунок 1.18 – Ветроустановка Юсупова

Ветродвигатель изображен на рисунке 1.18, который состоит: из верхнего и нижнего яруса ротора Савониуса: где 1 – лопасть верхнего яруса ротора, 2 – верхний диск для установки верхней части лопастей – верхнего яруса ротора, 3 – средний диск для установки нижней части лопастей верхнего яруса и верхней части лопастей нижнего яруса, 4 – вал ветродвигателя, 5 – лопасть нижнего яруса ротора, 6 – нижний диск для установки нижней части лопастей нижнего яруса, 7 – лопасть верхнего яруса ротора, 8 – лопасть нижнего яруса ротора, 9 – лопасти геликоидного ротора, 10 – нижний трехплечий диск для установки нижних частей трех лопастей геликоидного ротора, 11 – верхний трехплечий диск для установки верхних частей трех лопастей геликоидного ротора.

Основным недостатком таких или же подобных конструкции является сложность изготовления изогнутого крыла. Технологически сложно изготовить из металла, а также необходимы специальные станки и приспособления, что влечет к высокой стоимости конструкции.

Еще одна из разработок. Для выработки энергии используются два или несколько генераторов, соединенных с валом ротора через разгонные муфты и механические передачи.

Но при использовании этого устройства практически отсутствует возможность оперативного управления положением направляющего аппарата на многомодульных станциях ввиду его большой массы, рабочее пространство ротора загружено объемными лопатками, что исключает возможность получения высокого коэффициента использования энергии ветра. Наличие разгонной муфты и механических передач усложняет и удорожает конструкцию.

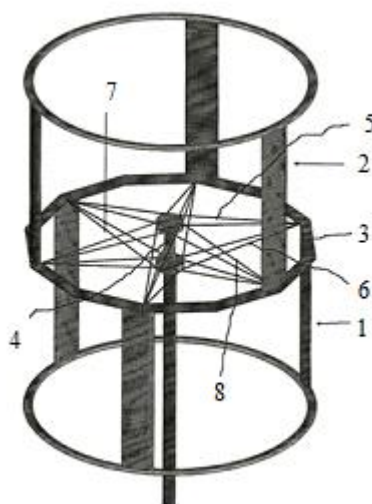


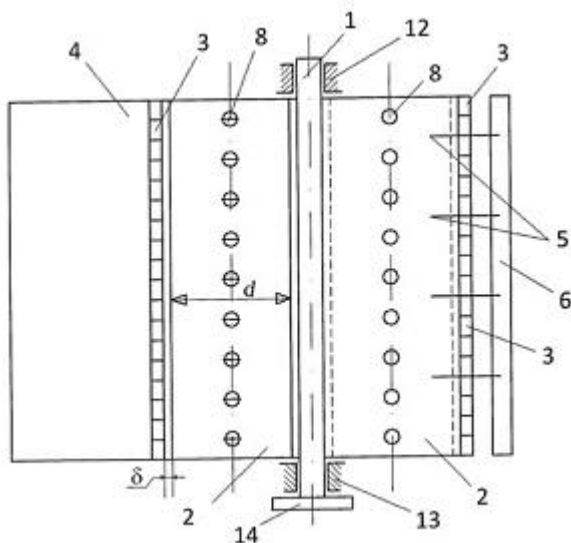
Рисунок 1.19 – Кольцевая форма ветроколеса

Изобретение относится к области ветроэнергетики и может быть использовано в ветроэнергетических установках. Ветроколесо содержит несколько снабженных лопастями ярусов (рисунок 1.19), связанных между собой несущими кольцевыми элементами (3), которые соединены со ступицей предварительно растянутыми тросами в качестве упругодемпфирующих элементов 5, 6, 7 и 8. Тросы образуют одну или несколько периодических структур, в каждой из которых часть тросов, исходящих от вышеуказанных кольцевых элементов к ступице, имеет наклон по отношению к горизонту вверх 2, а оставшаяся часть имеет наклон вниз 1. При этом наклоны тросов к горизонту в разных периодических структурах различны, чтобы обеспечить разнесение тросов разных структур в пространстве. Для обеспечения устойчивости ветроколеса к крутильным колебаниям и одновременного их демпфирования продолжения линий половины тросов каждой периодической структуры проходят с одной стороны от оси 4 вращения ветроколеса, а продолжения линий другой половины – с другой стороны от оси вращения. Все тросы во время работы ветроколеса и стоянки остаются в растянутом состоянии. Изобретение обеспечивает уменьшение влияния колебательной составляющей действующих на лопасти ветроколеса аэродинамических сил и моментов на ступицу ветроколеса, а через нее на подшипниковые узлы, опорное основание и мачту при всех ветровых режимах.

Недостатком вертикально–осевых ветроколес является, как правило, наличие различных форм низкочастотных изгибных колебаний ветроколеса, вызываемых попеременным действием набегающего ветрового потока на лопасти ветроколеса. Вследствие жесткой связи, обычно с помощью силовых траверс, между кольцевой формы конструкциями, несущими лопасти ветроколеса, и расположенной в центре ступицей она колеблется вместе с ветроколесом. Изгибные колебания ступицы вызывают повышенные нагрузки

на подшипниковые узлы, посредством которых ступица связана с закрепленным на мачте опорным основанием. Это приводит к повышенному износу подшипников и сокращению срока службы ветроэнергетической установки. Колебания опорного основания, переданные ему через ступицу от лопастной системы ветроколеса, возбуждают различные формы колебаний мачты. В результате, возникает угроза возникновения резонансов, могущих привести к разрушению ветроэнергетической установки. Появляется необходимость усложнения конструкции мачты и других элементов конструкции для отстройки от резонансных частот.

На рисунке 1.20 приведен вид роторного двигателя в разрезе, состоящего из двух видов лопастей 2 в виде полого цилиндра и подвижные лопасти 4.



Рисунке 1.20 – Роторный ветродвигатель в разрезе

Роторный ветродвигатель (рисунок 1.20) содержит вертикальный вал 1, к которому жестко прикреплены лопасти 2, выполненные в виде полого цилиндра (1/2 часть его) – 4 шт., через шарниры 3 связаны с подвижными плоскими лопастями 4. К лопастям 2 снаружи их выпуклых поверхностей жестко прикреплены кронштейны 5, связанные с вертикальными пластинами 6, к которым прикреплены, например, резиновые пластины 7, контактирующие с подвижными пластинами 4. В вогнутых поверхностях лопастей 2 в их центре по высоте выполнены отверстия 8, в которые запрессованы конусные втулки 9 с шариками 10 внутри и крестовиной 11 снаружи. Вал 1 в верхней части размещен в опорном подшипнике 12, а в нижней части в опорно-упорном подшипнике 13. Полумуфта 14 вала 1 контактирует с полумуфтой электрического или теплового генераторов (не показаны).

Шарниры 3, типа рояльных петель, могут быть изготовлены отдельно, а затем приварены электросваркой к лопастям 2 толщиной σ и к подвижным лопастям 4. Втулки 9 имеют выходное отверстие 15 на $3 \div 5$ мм в диаметре меньше диаметра шарика 10. Входное отверстие 16 втулки 9 в $1,5 \div 2,0$ раза больше диаметра шарика 10 и перекрыто крестовиной 11. Вставляются втулки

9 в лопасти 2 со стороны их вогнутых частей, которые могут быть выполнены с искусственной шероховатостью, втулки могут быть изготовлены как из пластмассы, так и из металла. Роторный ветродвигатель установлен между опорами опорной фермы и закреплен верхним и нижним концами вала 1 посредством подшипников и подшипниковых опор на соответствующих опорных площадках, наподобие прототипа. Нарращивание лопастей 2 с диаметром d выдвижными лопастями 4 на $(1,5\div 2,0)d$ увеличит мощность ветродвигателя в 1,5 и более раз.

Изобретение относится к ветроэнергетике и касается ветродвигателей роторного типа с вертикальным валом вращения, и может быть использовано преимущественно для привода электрических и тепловых генераторов. Роторный ветродвигатель содержит вертикальный вал, к которому жестко прикреплены лопасти, выполненные в виде полого цилиндра и через шарниры, связанные с подвижными плоскими лопастями.

К лопастям снаружи их выпуклых поверхностей жестко прикреплены кронштейны, связанные с вертикальными пластинами, к которым прикреплены резиновые пластины, контактирующие с подвижными лопастями, а в вогнутых поверхностях лопастей в их центре, по высоте, выполнены отверстия, в которые запрессованы конусные втулки с шариками внутри крестовиной снаружи. Ветродвигатель обеспечит повышение надежности и КПД путем повышения пускового момента и обеспечения работы на оптимальных скоростях ветра

К недостаткам роторного ветродвигателя относится: низкий КПД использования энергии ветра, невысокая надежность при больших скоростях ветра, необходима относительно большая скорость ветра для его пуска и работы.

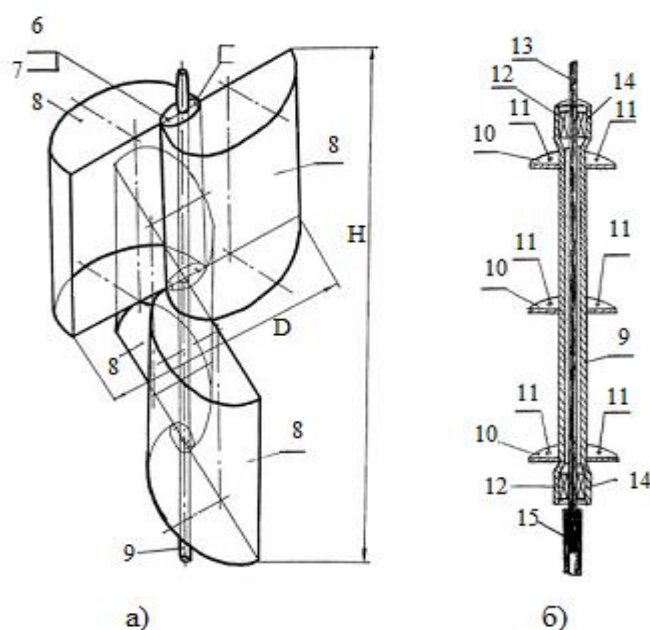


Рисунок 1.21 – Ветродвигатель парусного типа

Изобретение относится к ветроэнергетике и может быть использовано при проектировании мобильных ветроэнергетических установок с вертикальной осью.

Ветродвижитель содержит вертикальную полую ось ротора с элементами подвижного крепления к внешней конструкции ветроагрегата и вертикально размещенные паруса с изогнутой по дуге боковой поверхностью. Паруса установлены на несущих дисках, жестко закрепленных на дисках оси ротора, снабжены торцевыми стенками с жесткими дисками, снабженными отверстиями для соединения парусов друг с другом и с пазами для установки на ось ротора, и выполнены с возможностью вложения друг в друга по принципу «матрешки» при транспортировке ветроагрегата. Внутри вертикальной полой оси ротора введена через подвижное соединение несущая ось ветроагрегата. Паруса могут быть размещены по меньшей мере в двух ярусах, причем каждый ярус содержит по меньшей мере два паруса. Основание ветроагрегата выполнено в виде приемной трубы с верхними и нижними проушинами, к нижним проушинам шарнирно присоединены штанги с лапами, в которых выполнены отверстия для крепления ветроагрегата к внешней поверхности, в поворотных штангах выполнены пазы для регулировки положения нижних концов распорок, верхние концы которых шарнирно присоединены к верхним проушинам приемной трубы основания ветроагрегата (рисунок 1.21).

Парус содержит изогнутую по дуге боковую поверхность 1, жестко присоединенные к ней торцевые стенки 2 и несущие диски 3 с пазами 4 для установки паруса на полую вертикальную ось (показана пунктиром) ротора ветроагрегата. Паруса при сборке сворачиваются друг с другом через отверстия 5 с помощью винтовых пар 6, 7 или винтов 6 и резьбовых отверстий 5, в жестких дисках 3 парусов 8 (рисунок 1.21), на несущих дисках полой вертикальной оси 9 ротора ветродвижителя. Кроме того, несущие диски 3 парусов 8 соединены винтами 6 с несущими дисками 10 полой вертикальной оси 9 через отверстия 11, имеющиеся в дисках 10, жестко закрепленных на полой вертикальной оси 9 ротора. Внутри полой вертикальной оси 9 через подшипники 12 размещена несущая ось 13 ветроагрегата. Подшипники 12 размещены в гнездах 14 полой вертикальной оси 9. Несущая ось 13 ветродвижителя вставлена в вертикальную стойку 15 ветроагрегата.

Изобретение обеспечивает повышение жесткости конструкции парусов, снижение трудоемкости сборки и разборки ветродвижителя мобильного ветроагрегата, а также снижение объема, занимаемого деталями ветродвижителя в транспортном положении.

Недостатками прототипа являются высокая трудоемкость сборки ветродвижителя из транспортного положения в рабочее и обратно; значительный объем, занимаемый деталями ветродвижителя в разобранном состоянии; недостаточная жесткость конструкции размещенных в пазах съемных парусов в сборе, что влечет за собой возможность разрушения конструкции при максимальной скорости ветрового потока.

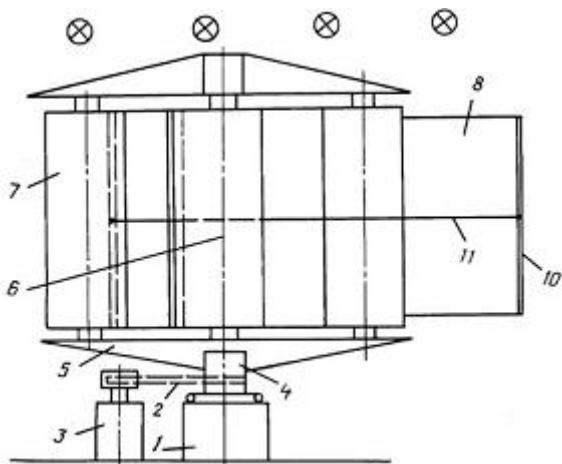


Рисунок 1.22

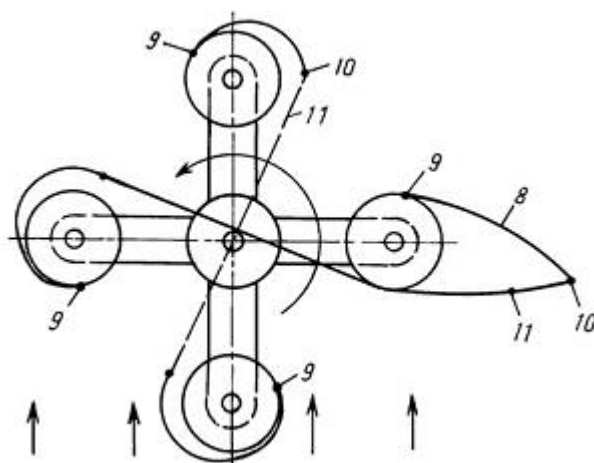


Рисунок 1.23

Изобретение относится к области ветроэнергетики, в частности к ветроэлектрогенераторным установкам. Роторный вертикальный ветродвигатель содержит вращающееся основание, траверсы и приемники энергии. Приемники энергии выполнены в виде неподвижных относительно траверс колонн с частично охватывающими их гибкими шторками парусного типа. Один край шторок закреплен по образующим колонн, а другой край связан с соответствующим краем шторки противоположной колонны тягами, обеспечивающими заворачивание шторки вокруг одной колонны и разворачивание шторки вокруг противоположной колонны. Преимуществом ветродвигателя является уменьшение поперечного сечения ветроприемника, движущегося навстречу потоку, повышение использования воздушного потока и, как следствие, относительно высокая энергетика установки, что дает возможность сооружать установки с более высоким коэффициентом полезного действия.

Ветродвигатель (рисунки 1.22 и 1.23) содержит неподвижное основание 1, передачу 2 на потребитель 3 (например, электрогенератор), вращающееся основание 4 с траверсами 5, центральную стойку 6. Между верхними и нижними траверсами установлены приемники ветровой энергии, выполненные в виде колонн 7 с частично охватывающими их гибкими шторками 8 парусного типа, представляющими собой прямоугольное полотнище. Одними краями 9 шторки закреплены по образующим цилиндрических колонн, а другими подвижными через планки 10 связаны с тягами 11 с соответствующим краем шторки противоположной колонны. Колонны выполнены пустотелыми в виде труб, при этом колонны снабжены окнами 12 с перемычками 13. Окна с перемычками расположены на одной (по длине) стороне колонны. Таким образом, сторона колонны, идущая против потока, гладкая (рисунок 1.21, б) и имеет минимальное аэродинамическое сопротивление, а сторона, идущая по

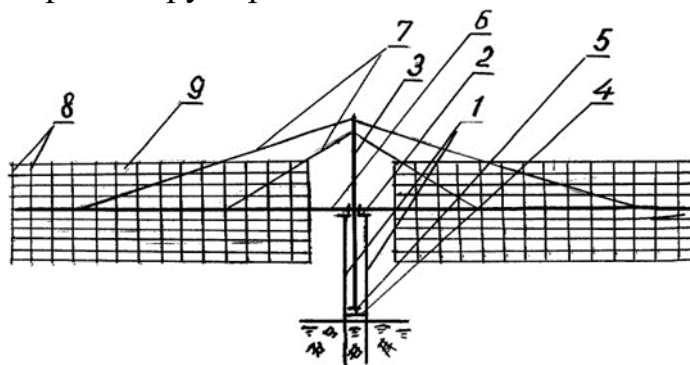
потоку, представляет собой благодаря окнам 13 выемку, имеющую большое аэродинамическое сопротивление, т.е. создающую вращающий момент.

Таким образом, роторный вертикальный ветродвигатель содержит вращающееся основание, траверсы, колонны с приемниками энергии и центральную стойку.

Недостатком данной ветроэнергетической установки является низкое использование воздушного потока.

Изобретение направлено на повышение использования воздушного потока и, как следствие, улучшение энергетики установки.

Технический результат, заключающийся в уменьшении поперечного сечения ветроприемника, движущегося навстречу потоку, заключается в том, что приемники энергии выполнены в виде неподвижных относительно траверс колон с частично охватывающими их гибкими шторками парусного типа, причем один край шторок закреплен по образующим колонн, а другой край связан с соответствующим краем шторки противоположной колонны тросами, обеспечивающими заворачивание шторки вокруг одной колонны и разворачивание шторки вокруг противоположной колонны.



Фиг. 1

Рисунок 1.24

Изобретение относится к ветроэнергетике и может быть использовано для получения электрического тока за счет ветряных двигателей в больших объемах. Технический результат, заключающийся в повышении коэффициента полезного действия (КПД), а также надежности при эксплуатации, обеспечивается за счет того, что в ветряке, включающем вертикальную ось, по сторонам которой закреплены консоли с вертикальным экраном, согласно изобретению консоли выполнены в виде труб, закрепленных растяжками к вертикальной оси, вертикальный экран образован занавесками, закрепленными на металлических рамках, причем металлические рамки закреплены снизу и сверху на трубах.

Недостатками ветродвигателя являются низкий коэффициент полезного действия (КПД), а также громоздкость и невысокая эффективность.

Технический результат, заключающийся в повышении коэффициента полезного действия (КПД), а также надежности при эксплуатации,

обеспечивается за счет того, что в ветряке, включающем вертикальную ось, по сторонам которой закреплены консоли с вертикальным экраном, согласно изобретению, консоли выполнены в виде труб, закрепленных растяжками к вертикальной оси, вертикальный экран образован занавесками, закрепленными на металлических рамках, причем металлические рамки закреплены снизу и сверху на трубах.

Изобретение относится к области ветроэнергетики и может быть использовано для устойчивой работы ветродвигателей при умеренных скоростях ветра. Ротор ветродвигателя содержит вертикальный вал с лопастями на его внешней поверхности, лопасти выполнены с увеличивающимся радиальным размером по высоте ротора и представляют собой уголковые сектора поверхности полуцилиндров или полуконусов вращения с осью вращения, совпадающей с осью вала. Вогнутая сторона поверхностей лопастей выполнена шероховатой, а выпуклая – полированной. При этом вершины секторных уголков поверхностей вращения расположены на нижнем уровне ротора и примыкают к валу. Использование ротора при технологичности и простоте конструкции обеспечивает повышение эффективности использования ветрового потока.

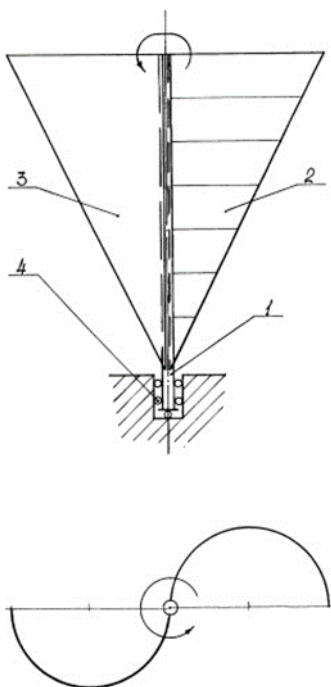


Рисунок 1.25

Недостатками ротора являются его невысокая эффективность при умеренных скоростях ветра и низкий коэффициент полезного действия (КПД). Ветроустановка (рисунок 1.25) представляет собой вал 1, лопасти 2, перепонки 3 и упорные подшипники 4.

Изобретение относится к ветроэнергетике, к преобразователям энергии воздушных потоков во вращательное движение ветроагрегата. С целью обеспечения работоспособности от ветрового и восходящего воздушных потоков в любой их комбинации и повышения энергоотдачи ветроагрегат, содержащий вертикальную несущую трубу, ось соединения с приводом

энергоносителя, узел подвижного крепления, закрепленные на несущей трубе верхний и нижний пояса, между которыми размещены изогнутые по дуге секторы, снабжен трубой–воздуховодом, нижний пояс примыкает с зазором к трубе–воздуховоду, выполнен в виде колеса со спицами и снабжен наклонными лопатками по числу секторов, секторы размещены наклонно по винтовой линии по отношению к несущей трубе, а ось соединения с приводом энергоносителя выполнена на верхней части несущей трубы. Кроме того, диаметр колеса нижнего пояса d выбирают из соотношения $d=D-(0,5\div 0,9)H$, где D – диаметр верхнего пояса, H – расстояние между поясами, диаметр отверстия трубы–воздуховода равен наружному диаметру нижнего пояса, лопатки нижнего пояса закреплены на спицах подвижно с возможностью перемещения по отношению к горизонтальной плоскости от 10° до 80° , наружные торцы секторов, выходящие за окружность поясов, выполнены радиусом $r=(0,4\div 0,5)D$.

2 РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЯ ВЫБОРА ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СХЕМ И КОНСТРУКЦИИ С ВЕРТИКАЛЬНОЙ ОСЬЮ ВРАЩЕНИЯ РОТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Традиционный процесс проектирования конструкций ВО ВЭУ вплоть до настоящего времени не имел четкого научного обоснования, представляя собой ряд обособленных теорий и методик с генерацией инженерных решений по каждому компоненту конструкции обособленно. В результате такого подхода почти все производимые в мире изделия имели ряд проблем, связанных с наличием шума, вибраций, сложности изготовления некоторых деталей и т.д. Таким образом, разработка единой методологии проектирования и создания ВО ВЭУ является крупной научной проблемой.

В данной диссертационной работе вертикально–осевая конструкция малой мощности была выбрана для изучения, разработки и оптимизации в связи с рядом факторов: независимость работы ВЭУ от направления ветра, высокий коэффициент использования энергии ветра, выработка энергии со скорости ветра 3 м/с, возможность аэродинамического регулирования частоты вращения, низкий уровень шума и вибраций, простота изготовления компонентов, а также относительно низкая себестоимость.

2.1 Методология разработки критерия выбора конструкций ВЭУ

Анализируя научные работы ученых дальнего и ближнего зарубежья, а также казахстанских ученых по созданию ветроэнергетических установок с вертикальной осью вращения, пришли к выводу, что основным недостатком многих разработок ВЭУ – это, сложность изготовления длинного вала и его вертикальный монтаж в подшипниковых опорах. Сами опоры достаточно сложны в конструкции и в изготовлении, требуется обеспечить соосность опор, их жесткость, а также большие финансовые затраты на заготовки. Недостатком многих конструкций является большая масса вала, которая имеет давление на нижнюю вращательную опору, создает большой момент трения и износа, уменьшая при этом коэффициент полезного действия установки.

Для изготовления технологически сложного вала необходимы специализированные станки, для обработки от 3 м до 9 м валов и их установки в корпус. Это непростая задача. Основные технологические задачи при обработке валов следующие:

– выдержать: точность и шероховатость поверхностей (5 – 7 квалитет; шероховатость Ra 0,03 – 2,5 мкм); прямолинейность общей оси; концентричность поверхностей вращения; соосность резьб с наружными поверхностями или точными внутренними цилиндрическими отверстиями;

– получить глубокие центральные отверстия, соосные наружной поверхности в пустотелых валах (допускаемые отклонения $\pm 0,02$) с радиальным биением шеек и торцовым биением торцов 0,02 – 0,03;

– выполнить шпоночные канавки и шлицы, параллельные оси вала (допускаемое отклонение 0,03 на длине 100 мм). Также сложность вызывает поиск необходимой заготовки для длинного вала.

Материалом для валов служат стали следующих марок: А12, 20, 20Л, 25, 30, 35, 40, 45, 45Г2, 20Х, 35Х, 40Х, 35ХС, 40ХС, 35СГ, 18ХГТ, 20ХН3А, 30ХНЗ, 35ХНЗМ, 45ХН2МФ и др.

В большинстве случаев заготовками для валов служит прокат. Заготовки отрезают из прокатного материала фрикционными и дисковыми пилами, абразивными кругами, резцом и др. Для валов, диаметры ступеней которых отличаются больше чем на 10 мм, заготовки отрезают из проката и затем куют под молотами или штампуют в подкладных или закрытых штампах. Главное требование к заготовкам – прямолинейность, которая не должна выходить за пределы 0,1–0,15 мм на один метр длины. Поэтому прокат перед отрезкой заготовок подвергают правке на специальных правильно–калибровочных станках и других. Обработка длинного вала на токарном станке с использованием люнетов. (рисунок 2.1).



Рисунок 2.1 Технологический процесс изготовления вала ВЭУ

Основные технологические базы – преимущественно центровые отверстия валов.

При изготовлении гладкого вала выполняются следующие операции:

- отрезание заготовки от общего прутка;
- обработка торцевой поверхности с последующим центрированием;
- изготовление противоположной торцевой плоскости и ее центрирование;
- черновая обработка одной половины заготовки, находящейся в центрах;
- черновая обработка второй части заготовки;
- последовательная чистовая обработка первой и второй части заготовки.

Самым экономичным способом изготовления гладкого вала является применение калиброванной стали. При этом отпадает необходимость в обработке внешней цилиндрической поверхности. Но в большинстве случаев применяется сортовой прокат. Поэтому, выбирая заготовку, нужно брать наружный размер прутка с диаметром, наиболее близким к максимальному сечению будущего вала

Одним из критериев выбора вала турбины является высокая рыночная стоимость 900–1200 тыс. тг. за одну тонну специализированных марок сталей. Вес заготовки диаметром 100 мм, в среднем при длине вала 6м, будет равен 370 кг, что в цене уже будет составлять 444 000 тенге. Для обработки необходимо будет применять специализированные станки для данного вала, а также необходимо будет изготовить достаточно большое количество оснастки. При выборе технологической оснастки следует по возможности применять стандартные или унифицированные приспособления и вспомогательный инструмент. Целесообразность применения специальных приспособлений должна быть убедительно доказана, к примеру, один люнет обойдется 550–600 тыс. тг. Большой вес вала затруднит перестановку и обработку в станках, что увеличит время обработки, соответственно увеличит себестоимость и зарплату рабочим. В среднем если взять технологический процесс для данного вала, время обработки будет происходить в течении 20 – 25 смен. При стоимости смены в 18000 тг – это составит 450 000 тенге только зарплата рабочему. Итого в среднем затраченные средства на изготовления вала в 6 м составит (учитывая транспортные расходы 10–15 тыс. тг.) – 1 494 000 тенге.

В связи со сложностью изготовления длинного вала, нами была предложена изменений конструкции ВЭУ, переход от длинного вала, к полый оси или же трубе.

Изначально планировалось изготовление оси из трубы стальной бесшовной диаметром 95x5 из стали 20 ГОСТ 8732–78. Мною же было предложено изготовление из сварной трубы электросварной 108x4,5 из стали 09Г2С ГОСТ 10704–91.

Трубы могут потребоваться для сооружения самых разнообразных конструкций. И поэтому не удивительно, что промышленность производит широкий ассортимент этих изделий. Выбор настолько большой, что неискушенному человеку не мудрено запутаться и потеряться. Однако сейчас мы не будем рассматривать все разновидности, типоразмеры и прочие характеристики. А всего лишь сравним два наиболее востребованных типа — трубы электросварные и бесшовные.

На долю этих изделий приходится львиная доля трубной промышленности. Еще есть литые, клепаные и прочие типы, но это скорее экзотика в случае со сталью.

Главное различие между этими двумя разновидностями заключается в способе производства. Трубы электросварные получают путем сгибания стального листа и сварки шва электрической дугой. Бесшовные производятся путем продавливания отверстия в цилиндрической, предварительно разогретой,

заготовке с дальнейшим его раскатыванием валиками. Это определяет разные эксплуатационные свойства изделий.

Важные отличия

Сварной шов снижает прочность изделия. Хотя дуговая сварка намного превосходит в этом смысле клепку или пайку, но все равно трубы бесшовные будут прочнее. Поэтому их предпочитают там, где изделие работает под большими нагрузками, где категорически недопустима разгерметизация. Также шов делает трубу более уязвимой к коррозии, он заметно быстрее деградирует. Срок службы трубы бесшовной будет немного выше при равных прочих условиях.

Но производство электросварных труб дешевле и проще, поэтому цена на готовые изделия будет заметно ниже. У технологии меньше ограничений, в частности по размеру. Даже из одного листа можно выполнить прямошовную трубу до полутора метров в диаметре, а при использовании нескольких листов или же при изготовлении спиралешовной трубы даже — это далеко не предел. Максимальный размер бесшовного изделия заметно скромнее.

Для производства труб методом продавливания отверстия годятся только пластичные сорта стали, высокоуглеродистые сорта, отличающиеся большой прочностью, тут не годятся.

Таким образом, выбор зависит от того, где труба будет использоваться, от условий эксплуатации. Для большинства бытовых нужд вполне достаточно прочностных характеристик менее дорогой электросварной трубы. При условии, что это качественный продукт, выполненный в соответствии с ГОСТ.

Марки металла сталь 20 и 09Г2С востребованы на рынке труб и трубопроводной арматуры. Их используют в отечественной и зарубежной промышленности для производства:

- металлопроката;
- сварных конструкций;
- отводов, опор и запорных механизмов;
- тройников и переходов.

Популярность связана с высокими эксплуатационными характеристиками, которые позволяют использовать их в регионах с критически низкими температурами наружного воздуха, в системах высокого давления и его резкими перепадами.

Несмотря на применение этих марок в одинаковых областях, их тип, отдельные химические и физические параметры различаются. Поэтому подходящий материал выбирает производитель в соответствии с техническими условиями, государственными и отраслевыми стандартами, особенностями транспортируемой рабочей среды.

Сталь 20 — относится к конструкционной углеродистой стали. Она пластична, ограничения по свариваемости отсутствуют. Детали производят путем волочения, отливки с дополнительной термохимической обработкой, методами горячей и холодной деформации.

Химический состав включает следующие элементы:

- содержание углерода от 0,17 до 0,24% в зависимости от исполнения;
- магний — до 0,65%, кремний — до 0,37%;
- фосфор — до 0,035%;
- другие элементы, в том числе вредные, не более 0,3%.

Легирование металла другими элементами улучшает эксплуатационные особенности материала. Например, добавление хрома объемом до 0,25% увеличивает устойчивость к влаге, поэтому металлопрокат лучше защищен от коррозии.

Твердость материала зависит от того, была ли проведена термическая обработка. Варьируется в пределах 372–412 МПа для труб и металлопроката, предел текучести — 225–245 МПа.

Температура эксплуатации от –40 до 450С, поэтому подходит для использования в северных районах страны.

Обладает средней теплопроводностью, что обеспечивает оптимальную скорость нагрева и охлаждения при транспортировке продукта.

Сталь 09Г2с — характеристики

Расшифровка указывает на состав и особенности материала.

09 — объем углерода в химическом составе (0,09%);

г2 — содержание марганца (варьируется от 1,2% до 2%);

С — кремний, цифра в конце маркировки указывает на его количество, в данном случае меньше 1%.

Легирование стали не ограничивается этими тремя компонентами. В состав добавляют никель, серу, фосфор и другие элементы, но их содержание в сумме не больше 2%. Плотность около 7800 кг/м³, ее снижают добавлением меди или кобальта, увеличивают — вольфрамом.

Металл легко сваривается, поэтому его используют для организации технологических линий гражданского и промышленного назначения. Отличается устойчивостью к критически низким температурам (до –70С), поэтому применяется в нефтяной и газодобывающей промышленности в северных районах страны.

Твердость определяют по нескольким системам в зависимости от типа изделия. Предельные характеристики регламентированы техническими условиями 14–3–1128–2000.

Химический состав и эксплуатационные свойства продукции зарубежных производителей может отличаться от действующих в Казахстане и странах СНГ, что связано с разницей в требованиях государственных стандартов.

Разница в применении

Ст20 отличается низким показателем рабочей температуры. Это значит, что металлические изделия быстро нагреваются, а их пластичность увеличивается. При сильном охлаждении, наоборот, структура становится хрупкой.

Поэтому в суровых условиях используют сталь 09Г2С, которая легко поддается сварке и подходит для применения в областях, где требуется высокая

износостойкость. В экономическом плане 20 дешевле, поэтому ее часто выбирают в промышленности, где не важен температурный диапазон.

Сталь 09Г2С – это очень востребованная сталь, используется как в строительстве, так и во многих отраслях промышленности. Существуют отечественные и зарубежные аналоги этого вида. Наиболее часто используется для изготовления труб, металлопроката и сварных металлоконструкций, температурный диапазон использования которых от -70 до $+425^{\circ}\text{C}$ (с допустимыми нагрузками на них).

Понимание того, как формируется маркировка, позволяет отчетливо представлять, какой товар представляет производитель, а также его основные особенности. Для тех, кого интересуют подробности о 09Г2С — расшифровка стали имеет следующий вид:

09 – количественная доля содержания углерода в сплаве (0,09%);

Г2 – это марганец и его часть во всем объеме колеблется в районе 2% (точная цифра колеблется от 1,3 до 2%);

С – обозначает кремний, отсутствие цифр после символа говорит о том, что его менее 1%.

Таким образом расшифровка 09Г2С наглядно выглядит так таблица 2.1:

Таблица 2.1 – Химический состав стали марки 09Г2С

Элемент	Содержание, %
С (углерод)	До 0,12
Si (кремний)	0,5 – 0,8
Mn (марганец)	1,3 – 1,7
Ni (никель)	До 0,3
S (сера)	До 0,04
P (фосфор)	До 0,035
Cr (хром)	До 0,3
N (азот)	До 0,008
Cu (медь)	До 0,3
As (мышьяк)	До 0,08
Fe (железо)	96 – 97

Как видно из таблицы расшифровка стали 09Г2С не ограничивается только тремя легирующими компонентами. Кроме, углерода, кремния и марганца, ее дополняют такие элементы: никель, сера, фосфор, хром, азот, медь, прочее. Процентная составляющая легирующих металлов не более 1–2 суммарных %.

Также для стали 09Г2С учитывается не только уровень легирования, но и другие факторы. Вот лишь некоторые из них, значимые для конкретного случая:

- конструктивность (назначение);
- эвтектоидность (структура: гексагональная, кубическая, прочее; изменения после закалки и т.д.);
- способ производства (мартеновская, конвентная или электросталь);
- хим. состав стали 09Г2С (в данном случае низколегированная).

2.2 Разработка и оптимизация ротора с ВО ВЭУ

Рассмотрим несколько классических вариантов, в том числе и то, когда одной марке стали соответствует несколько классов прочности. Технические характеристики: тонкости использования приводятся в справочных пособиях.

Свойства стали 09Г2с во многом определяются химическим составом сплава, его специфическими параметрами, которые сегодня довольно точно просчитываются металлургами.

Например, марка стали 09Г2С имеет следующие критические точки:

$A_{c1} = 732$, когда аустенит превращается в перлит процессах охлаждения;

$A_{c3}(A_{cm}) = 870$ (с – от французского *chauffage*/нагрев) точка конца растворения цементита;

$A_{r3}(A_{rcm}) = 854$ (*refro*> Условные обозначения классические, цифры 1 и 3 обозначают номера точек на графике. Символами *cm* обычно отмечают заэвтектоидные стали.

Если говорить о других особенностях стали 09Г2С, характеристики отмечают такие: легкая свариваемость материала. Для этого используют РДС, АДС под флюсом и газовой защитой. Не поддаются свариванию только изделия, прошедшие химико–термическую обработку.

Механические свойства стали 09Г2С – это табличные величины, которые разработаны рядом ГОСТов и описывают материал при комнатной температуре, а также для других его состояний.

Среди важных механических свойств стали 09Г2С выделяют такие:

- предел текучести для остаточной деформации, измеряется в Мпа;
- относительные величины удлинения при разрыве и сужении;
- ударная вязкость (использование под нагрузкой – одно из основных применений);
- твердость по Бринеллю (НВ).

Плотность стали 09Г2С колеблется, где–то возле отметки 7800кг/м³. Но легирующие элементы могут, как увеличивать удельный вес, так и уменьшать его. К первому склонен вольфрам. Второго достигают добавлением: кобальта, никеля, меди.

Твердость стали 09Г2С может определяться по Бринеллю, Роквеллу, Виккерсу и т.д. выбор системы определяется типом изделий, для которых требуется определение параметра. Также он важен при выборе способа сварки, твердость стали на шве должна сохранять достаточно высокие показатели [?].

Как уже отмечалось сталь 09Г2С и аналоги легко поддаются свариванию. Уже перечисленные характеристики, позволяют использовать этот материал для изделий, требующих высокой износостойкости: балки, швеллеры, уголки.

Марка 09Г2С, ее технические характеристики, необходимы в создании транспортных средств, строительстве, нефтяной и химической промышленности. Широкий температурный диапазон позволяет применять материал там, где происходят сильные деформации за длительный эксплуатационный срок. При этом граничная температура -70 градусов, способствует применения изделий из стали 09Г2С в суровых климатических условиях.

Под это описание, также хорошо подходит сталь 09Г2С–15. Ее используют по всем перечисленным пунктам. Остается только добавить, что кроме сварки, монтаж может производиться болтовыми соединительными элементами. Устойчивость металла к химическим воздействиям делает его интересным в соответствующей отрасли. При этом высокие механические качества используют для строительства мостов, дорог, портовых станций, прочего.

Также популярна марка стали 09Г2С–12. Она также обладает стабильными пластическими свойствами. Отличается особым химическим составом, в который входит мышьяк. Задействуется для изготовления трубопроводной арматуры. Но не может применяется в пищевой промышленности. На севере Казахстана многокилометровые магистрали трубопроводов возведены, как раз из этой марки. Там, как нигде полезны устойчивость к морозам и легкая свариваемость изделий. Это позволяет создавать сложные, одновременно социально значимые объекты (металлоконструкции) из 09Г2С и аналогов [?].

Дополнительной причиной использования сплавов этой марки – высокая экономичность, достигаемая не только за счет дешевизны производства. Легкость и быстрота возведения зданий, сооружений, монтажа оборудования – также позволяют оптимизировать расходы предприятий разных отраслей.

Особенности электросварки

К работам с этим материалом предъявляются особые требования, которые обуславливаются необходимостью соблюдения технологического процесса. Необходимость сохранения прочности стали на швах уже отмечалась. Однако в обычных условиях едва ли можно достичь абсолютно положительного результата [?].

Например, условие предотвращения перегрева достигается применением токов низкой силы $40-50$ А /1 мм электрода. Сварные работы сопровождаются последующей закалкой материалов при температуре 650 С. Исходя из критических точек сплава, были произведены собственные расчеты для проведения этих работ. Причем указанную T закалки применяют последовательно к каждому 25 мм шва, примерно час. Охлаждение производят в обычной воде или на воздухе. Благодаря соблюдению технологий достигают качества, не уступающего по свойствам еще более дорогим сплавам.

Для разработки нового типа ротора была проведена компьютерная имитация в программе CorelDRAW на ось ветроустановки, где были

произведены статические нагрузки, а также напряжения, создаваемые в узлах крепления оси.

На рисунках 2.2–2.5 приведены результаты компьютерной имитации осей ветроустановок, которая заложила основу для разработки и исследования конструкций ветровых установок с неподвижной вертикальной осью для дальнейшего совершенствования технологии производства.

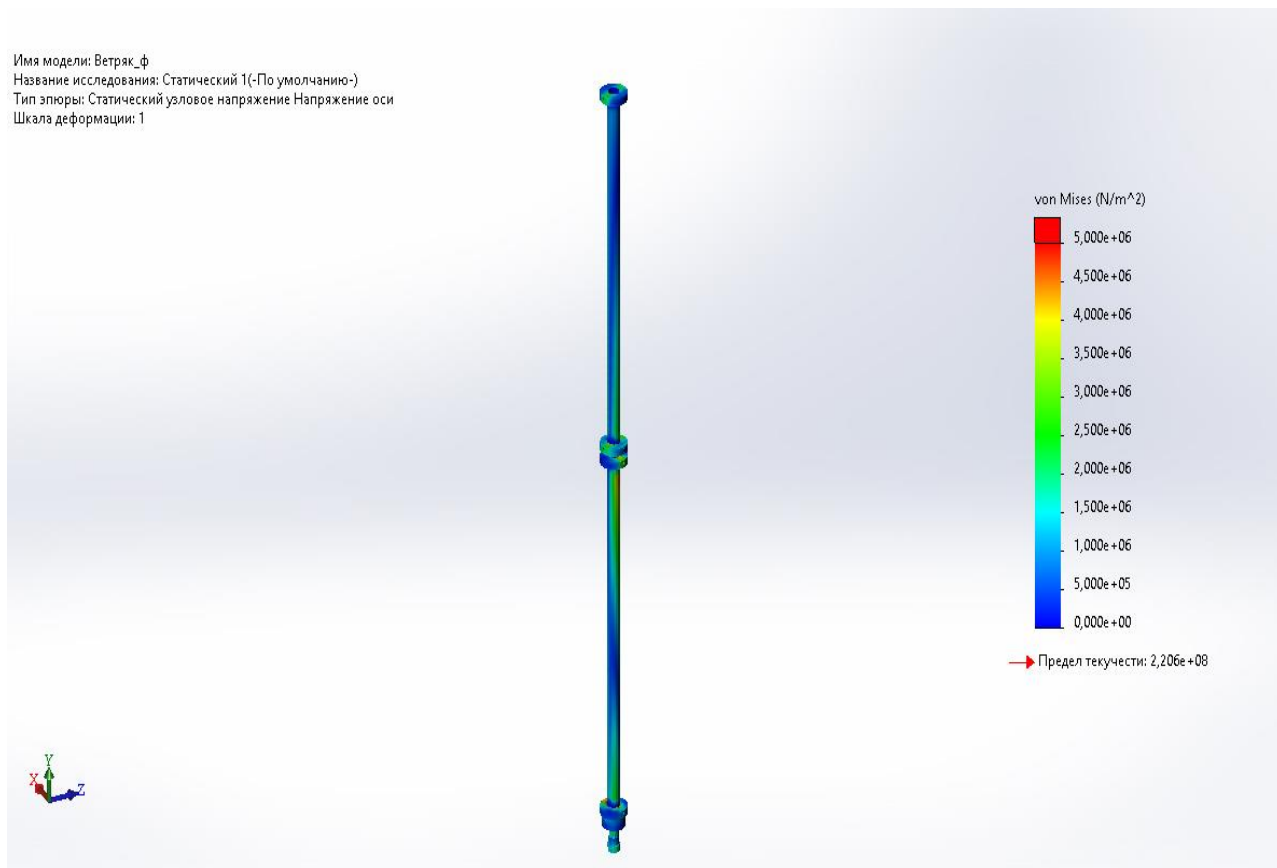


Рисунок 2.2 – Результаты имитации оси ветротурбины при скорости ветра 5 м/с

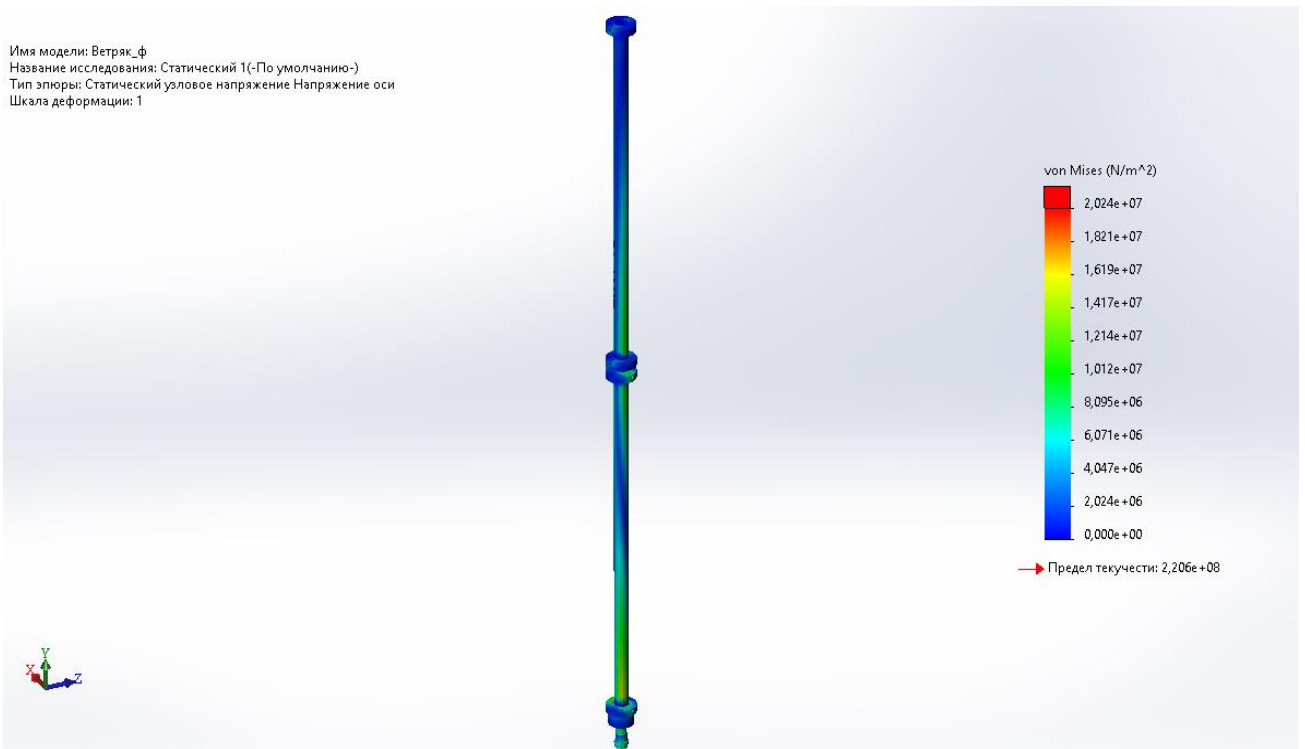


Рисунок 2.3 – Результаты имитации оси ветротурбины при скорости ветра 10 м/с

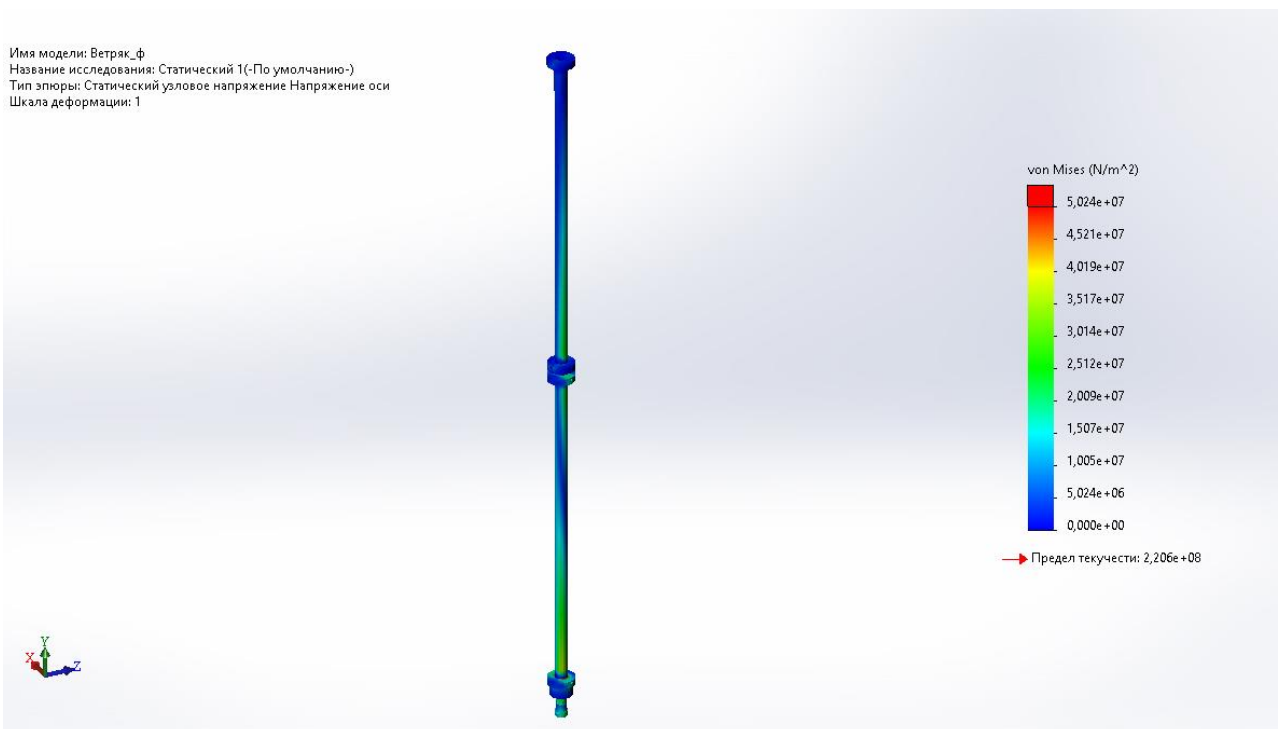


Рисунок 2.4 – Результаты имитации оси ветротурбины при скорости ветра 15 м/с

Имя модели: Ветряк_ф
 Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
 Тип элэоры: Статический узловое напряжение Напряжение оси
 Шкала деформации: 1

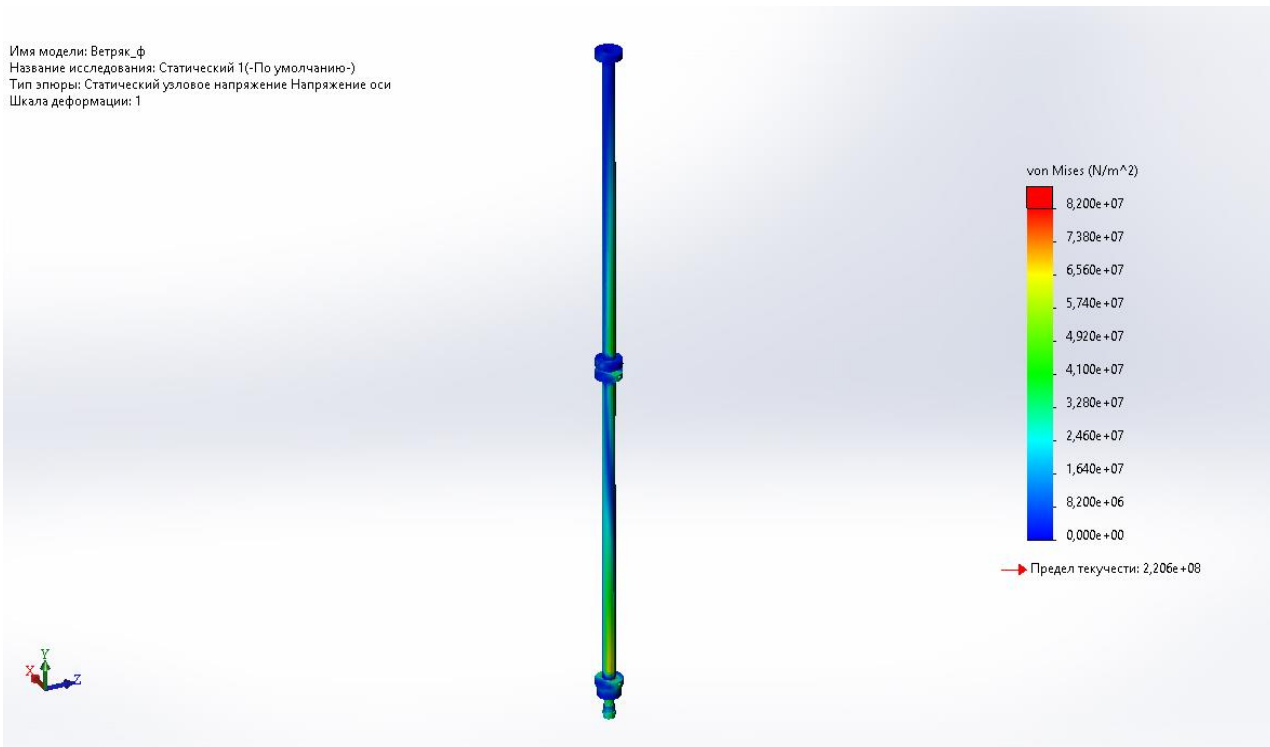


Рисунок 2.5 – Результаты имитации оси ветротурбины при скорости ветра 20 м/с

2.3 Расчет момента ветроустановки

При имитационном моделировании ветроколеса большое значение имеет воздействие ветра на различные объекты при изменении скорости. Характер зависимости скорости ветра от времени влияет на скорость вращения ветроколеса, что приводит к изменению аэродинамического момента [101]. дифференциальное уравнение для описания вращательного движения ветроколеса имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_a - M_M - M_c \quad (2.1)$$

где J – момент инерции; ω – угловая скорость; M_a – аэродинамический момент; M_c – момент сопротивления, учитывающий трение и другие потери. Аэродинамический момент ротора определяется по формуле:

$$M_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2\omega} \quad (2.2)$$

где $C_p(Z)$ – коэффициент использования энергии ветра; ρ – плотность воздуха; V – скорость ветра; S – обтекаемая площадь.

Тогда аэродинамическая мощность

$$P_a = C_p(Z) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (2.3)$$

Зависимость C_p от быстроходности Z аппроксимируется функцией (рисунок 2.6)

$$C_p(Z) = \left(\frac{c_1}{Z} - c_2 \right) e^{-\frac{c_3}{Z}} + c_4 \quad (2.4)$$

где $c_1 \dots c_4$ – коэффициенты, зависящие от вида ветроколеса.

Быстроходность определяется исходя из радиуса поворота ветроколеса и скорости ветра

$$Z = \frac{\omega \cdot r}{V} \quad (2.5)$$

Момент сопротивления на валу равен

$$M_c = \frac{P_M}{\omega} \quad (2.6)$$

где P_M – механическая мощность на валу генератора (нагрузки ветроколеса).

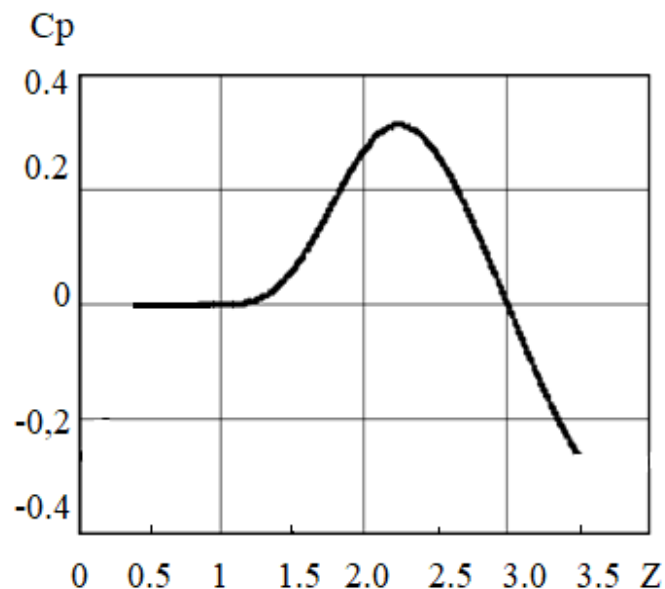


Рисунок 2.6 – Зависимость коэффициента использования C_p от быстроходности Z

Основываясь на заданной зависимости коэффициента использования энергии ветра C_p от быстроходности ветроколеса, была определена зависимость крутящего момента и частоты вращения ротора турбины.

Плотность воздуха принимается, исходя из региона ветроэнергетической установки (таблица 2.2).

Таблица 2.2 –Зависимость плотности воздуха от температуры

Температура, С ⁰	-20	-10	0	10	20	30	40
Плотность ρ , кг/м ³	1,377	1,324	1,275	1,230	1,188	1,149	1,112

На рисунке 2.7 приводится механическая характеристика ВЭУ с учетом коэффициента использования, которая рассчитана для ветродвигателя, и с помощью преобразователя может быть использована для подключенных трансформаторов, передающих электроэнергию на расстояния.

Характеристика $M(s)$ построена на MATLAB. Максимальная точка механической характеристики соответствует максимуму кривой на рисунке 2.7. Это говорит о сходимости результатов расчета и позволяет перейти к математическому моделированию параметров ветротурбины, одним из которых является крутящий момент.

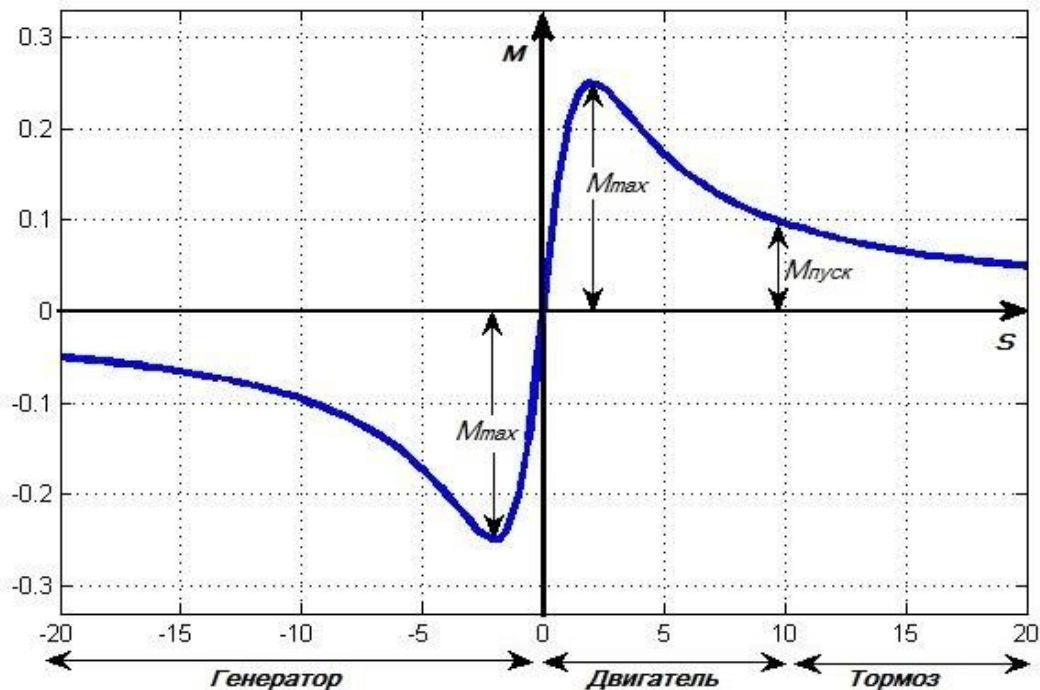


Рисунок 2.7 – Механическая характеристика ветродвигателя для трех режимов

Если ветроколесо размещено вертикально к ветру, то необходимо учитывать и коэффициент лобового сопротивления C_w , который приведен в таблице 2.3 в зависимости от конфигурации лопастей ветротурбины.

Таблица 2.3 – Значения C_w от конфигурации лопастей ветротурбины

Вид	Пластина	Цилиндр	Сфера	Полусфера (вперед)	Полусфера (сзади)	Конус по- лусферой	Полусфера с конусом	Вдоль потока
C_w	1,1–1,3	0,6–1,0	0,3–0,4	а) 0,4 б) 0,34	а) 1,2 б) 1,3	0,16–0,2	0,07–0,09	0,055

Поскольку лопасти ветротурбины, разработанная установки имеют вид полусферы, то в зависимости от набегания ветра имеем два значения по расположению: таблица 2.3 а) и б) Так как полусферы периодически поворачиваются к ветру открытой стороной, то в дальнейшем для расчетов будут применены значения $C_w=1,3$.

2.4 Критерии выбора различных схем и конструкций ВЭУ

Расчет характеристик ВЭУ с вертикальной осью вращения осложняется некоторыми особенностями их аэродинамики. Лопасти, находящиеся дальше других в направлении набегающего потока, работают в вихревом следе, образуемом за лопастями, которые находятся с наветренной стороны ротора. Возникновение следа связано с наличием у лопастей острых кромок. Вихревой след вносит в поток серьезные возмущения, и его параметры (скорость, направление течения) могут в значительной степени отличаться от параметров на бесконечном удалении от ротора. Таким образом, процесс обтекания лопастей является нелинейным нестационарным, и для его описания не могут применяться подходы, основу которых составляет линейная теория крыла конечного или бесконечного размаха.

Обусловленное мировой тенденцией отказа от использования углеводородов, как основного источника электроэнергии, расширение доли ветроэнергетики в мировой энергетике требует создания более совершенных методов конструирования ВЭУ. Увеличение линейных размеров роторов как неизбежное следствие увеличения их мощности обусловило необходимость учета нагрузок на лопасти, взаимовлияния лопастей, изучения скоростей потока вблизи ротора и в вихревом следе за ним.

М.И. Ништ, И.А. Белов и А.И. Шуб [3] провели в плоской постановке численные исследования нестационарного отрывного обтекания изолированного тонкого профиля в форме дуги окружности, установленного под произвольным углом атаки в дозвуковом потоке несжимаемой жидкости, заложив, таким образом, основу для моделирования аэродинамики ротора Савониуса. В. Островой [4] создал математическую модель ВЭУ с ротором Савониуса на основе МДВ в плоской постановке задачи, позволяющую получать картины вихревых следов за ротором, поля скоростей потока вблизи него и мощностные характеристики ВЭУ. Но при этом, к сожалению, рассматривался лишь установившийся режим работы ветроустановки, т.е. при

постоянных оборотах. Другим важным недостатком этой работы является использование лишь плоской постановки задачи, что заведомо не позволяет учесть влияние удлинения лопастей ротора на его характеристики.

Также в плоской постановке МДВ В.К. Вашкевичем и В.В. Самсоновым был разработан способ определения мощностных характеристик для ветроустановок с ротором Дарье [5]. При этом среда полагалась идеальной, а обтекание безотрывным. При помощи типичного для МДВ интеграла Коши – Лагранжа вычислялись нормальные силы на профиле, которые затем использовались для расчета тянущих (окружных) сил, который основывался на известных аэродинамических характеристиках профиля лопасти. Недостатком этой работы также является исследование лишь установившегося режима работы ВЭУ.

В. Самсонов [6] также использовал для расчета аэродинамических характеристик ветроколес с вертикальной осью вращения импульсную теорию, в которой нагрузки на лопастях определяются исходя из условия баланса энергии между двумя областями (по отношению к ветроколесу) — наветренной и подветренной. Главным недостатком этого метода является неучет образования зон обратного течения, существенно влияющих на характеристики роторов.

Д.А. Редчиц [7] для создания математической модели ротора Савониуса использовал осредненные по Рейнольдсу уравнения Навье – Стокса, замкнутые при помощи моделей турбулентности (RANS). Основным недостатком его работы также является использование лишь плоской постановки задачи. Д. А. Редчиц рассматривал не только установившийся режим работы ротора: большое внимание было уделено процессу раскрутки ротора и самой возможности его пуска из произвольного начального азимутального положения. Но в указанной работе, несмотря на рассчитанные коэффициенты крутящего момента, не определялись мощностные характеристики ВЭУ и зависимость их от геометрии ротора.

Много работ посвящено численному (с использованием сеточных методов) и натурному моделированию классических [8–10] и новых конфигураций роторов Савониуса — винтовых [11–14], многоярусных [15, 16], с центральным телом и складывающимися лопастями [17], с направляющими пластинами и дефлекторами различных конфигураций [18–20]. Изучается также возможность работы роторов Савониуса в воде, с использованием энергии приливов и отливов [21–23]. Существуют работы, посвященные исследованию систем ротор Савониуса – ротор Дарье [24, 25]. В связи с все большим распространением крупных высотных зданий активно обсуждаются конфигурации роторов, пригодные для установки на крышах небоскребов.

В 2013 г. была опубликована работа [26] франко–канадской группы ученых, которые провели исследования энергетической эффективности двух роторов Савониуса различного удлинения в пространственной постановке методом RANS с использованием коммерческих пакетов CD–Adapco Star–CCM+ и CFdesign 2010. Решение столь сложной задачи, безусловно, требует

весьма значительных вычислительных мощностей, поэтому в обозримом будущем такой подход вряд ли получит широкое распространение на предприятиях, специализирующихся на производстве ВЭУ.

Для расчета аэродинамики ротора Савониуса используются численные методы в механике жидкостей и газов. Это обусловлено тем, что большинство процессов в аэродинамике может быть описано системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных – уравнений Навье–Стокса.

Все численные методы в механике жидкостей и газов можно условно разделить на сеточные и вихревые методы.

Сеточные методы особенны тем, что они являются дискретизацией не только поверхности самого объекта, но и окружающего его пространства. Они включают в себя метод конечных разностей, метод конечных элементов, метод граничных элементов, метод конечных объемов. При использовании таких методов ставится задача моделирования явления турбулентности: прямое численное моделирование турбулентности, метод моделирования крупных вихрей, метод с применением уравнений Рейнольдса, замкнутых при помощи моделей турбулентности, метод моделирования отсоединенных вихрей, а также группа методов «частицы в ячейках».

В вихревых методах используется иной подход – отсутствие сетки, и использование свободных вихревых частиц. К ним относятся метод вязких доменов, метод дискретных вихрей (МДВ). Метод вязких вихревых доменов базируется на решении дифференциальных уравнений Навье–Стокса вязкой несжимаемой жидкости с использованием лагранжевых координат.

Метод дискретных вихрей имеет сравнительно небольшую вычислительную сложность при вполне достаточной для инженерных расчетов точности. Это обусловлено тем, что в своей классической постановке МДВ не учитывает вязкости жидкости, это не вносит существенной погрешности в случае ветроэнергетической установки с роторами Савониуса, потому что влияние жидкого трения на эксплуатационные характеристики в этом случае невелико. Именно поэтому большинство алгоритмов расчета аэродинамических характеристик ротора типа Савониуса основаны на этом методе.

Алгоритмы, исследующие конструкционные особенности ротора, и алгоритмы, уточняющие аэродинамические параметры. Одним из наиболее точных является алгоритм, представленный Сизовым Дмитрием Александровичем [27]. Он состоит из следующих пунктов:

1) Постановка задачи и ввод исходных данных (граничных условий). Задача формируется в нестационарной постановке, поэтому все условия должны выполняться в каждый расчетный момент времени. При численном решении непрерывные функции изменения кинематических параметров во времени заменяются совокупностью их дискретных значений через равные промежутки безразмерного времени.

2) Построение вихревой схемы. Непрерывный вихревой слой и вихревые следы моделируются присоединенными дискретными вихрями. Это позволяет

перейти к системе линейных алгебраических уравнений, которую необходимо решить относительно напряженностей присоединенных дискретных вихрей. Для составления системы используется условие непротекания. Циркуляции свободных вихрей, сошедших в поток, со временем не изменяются.

3) Проверка номера расчетного шага. При этом начинает циклически выполняться процедура, соответствующая одному расчетному шагу это, повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто заданное количество шагов. Расчетная часть шага включает в себя:

- а) рассмотрение схода свободных вихрей;
- б) формирование матрицы и решение системы уравнений относительно циркуляций;
- в) вычисление кинематических параметров ротора;
- г) вычисление скорости потока в точке (вычисление безразмерных давлений и крутящего момента при повороте ротора расчет нового положения свободных вихрей, визуализация процесса обтекания);
- д) расчет динамических параметров ротора.

4) Построение графиков.

В результате выполнения алгоритма происходит исследование на основе уравнений Навье–Стокса, выполняется анализ вихревых структур при обтекании ротора Савониуса, исследование его аэродинамических параметров, что позволяет исследовать и оптимизировать конструкцию ротора.

Анализ аэродинамики и энергетической эффективности позволил оценить коэффициенты мощности современных наиболее эффективных вертикально–осевых ветродвигателей.

С увеличением относительной ширины полуцилиндрической лопасти от 0,1 до 0,5 и повышением количества лопастей от 2 до 6 коэффициент мощности ротора Савониуса увеличивается с 0,018 до 0,226 [97–100].

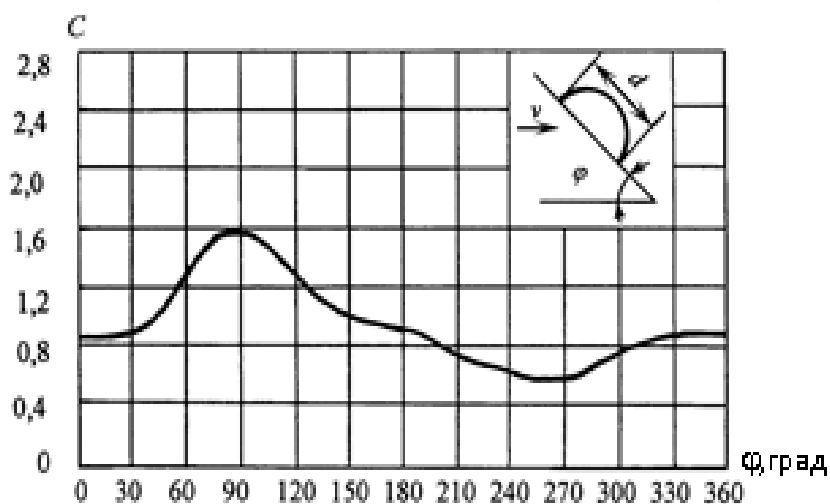


Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициента сопротивления полуцилиндрической лопасти ветродвигателя от угла ее поворота

Коэффициент сопротивления C имеет максимальное значение $C_{max} = 1,76$ при $\varphi = 90^{\circ}$ и минимальное значение $C_{min} = 0,42$ при $\varphi = 270^{\circ}$. Полученные

значения коэффициента лобового сопротивления могут быть использованы при определении вращающего момента, мощности и коэффициента мощности.

Вращающий момент, возникающий на каждой из лопастей за счет сил аэродинамического сопротивления, равен

$$M_i = 0,5C_i \cdot \rho \cdot S_i \cdot V_2 \cdot L_i \quad (2.7)$$

где S_i – площадь проекции лопасти, м²; L_i – плечо силы давления, м.

Выражая площадь проекции и плечо силы лопасти ротора Савониуса через угол φ (рисунок 2.6), получим момент M на каждой из лопастей

$$M = 0,125\rho \cdot V \cdot 2dH \cdot (D - d) \cdot C(\sin\varphi + \sin2\varphi) \quad (2.8)$$

и относительный вращающий момент, Н·м,

$$M^* = \frac{M}{M_{max}} = 0.5C(\sin\varphi + \sin2\varphi)/C_{max} \quad (2.9)$$

где d – диаметр лопасти; H , D – высота и диаметр ротора; φ – угол между направлением воздушного потока и плоскостью, проходящей через кромки лопасти.

Результаты расчета относительного вращающего момента одной лопасти ветродвигателя

M^* в зависимости от угла поворота φ приведены на рисунке 2.9.

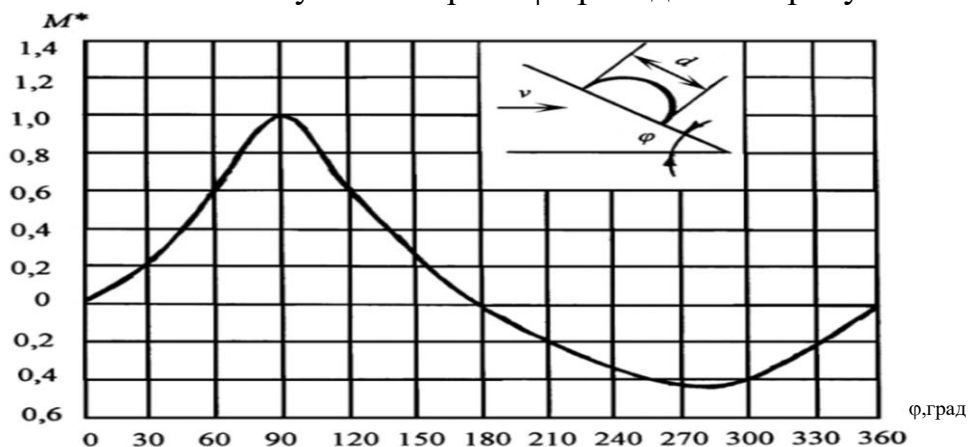


Рисунок 2.9 – Зависимость относительного вращающего момента M^* полуцилиндрической лопасти ветродвигателя от угла поворота φ [98]

Зависимость $M^* = f(\varphi)$ принимает максимальное значение $M^*_{max} = 1,00$ при $\varphi = 90^\circ$, нулевые значения при $\varphi = 0$ и $\varphi = 180^\circ$ и отрицательные значения при $180^\circ < \varphi < 360^\circ$.

Исследуя установки нового типа, были рассмотрены (3–8) таблицы 2.4, т.е. скорость ветра от 5 м/с до 20м/с. На практике предлагаемая установка не выдержала скорости ветра 15 и 20 м/с. Поэтому для дальнейших расчетов

рассматривались скорости ветра от 5м/с до 10м/с, что более чем достаточно для средней полосы Казахстана, в особенности для сел и районов с умеренными ветровыми категориями.

Для расчетов большое значение имеет сила ветра. Которая в метеорологии измеряется по шкале Бофорта [Kwash] (таблица 2.4)

Таблица 2.4 – Характеристики и виды ветровых потоков.

Vg	V м/с	Вид ветра	Воздействие
1	2	3	4
0	0–0,2	Штиль	Дым из труб поднимается вертикально
1	0,3–1,5	Легкое движение	Направление ветра распознается только по дыму
2	1,6–3,3	Легкий ветерок	Ветер ощущается, листья шелестят
3	3,4–5,4	Слабый ветер	Шелестят листья и раскачиваются тонкие ветки
4	5,5–7,9	Умеренный ветер	Ветер шевелит побеги и тонкие ветки, поднимается пыль
5	8,0–10,7	Свежий ветер	Маленькие деревья начинают раскачиваться
6	10,8–13,8	Сильный ветер	Большие ветки деревьев раскачиваются, гудят провода
7	13,9–17,1	Крепкий ветер	Деревья раскачиваются, человек прилагает усилия для движения против ветра
8	17,2–20,7	Штормовой ветер	Ветер ломает ветки деревьев
9	20,8–24,4	Шторм	Повреждение крыши домов
10	24,5–28,4	Сильный шторм	Ветер вырывает деревья с корнем
11	28,5–32,6	Жестокий шторм	Тяжелые разрушения строений
12	≥32,7	Ураган	Опустошительные разрушения
Примечание – Vg – степень по Бофорту			

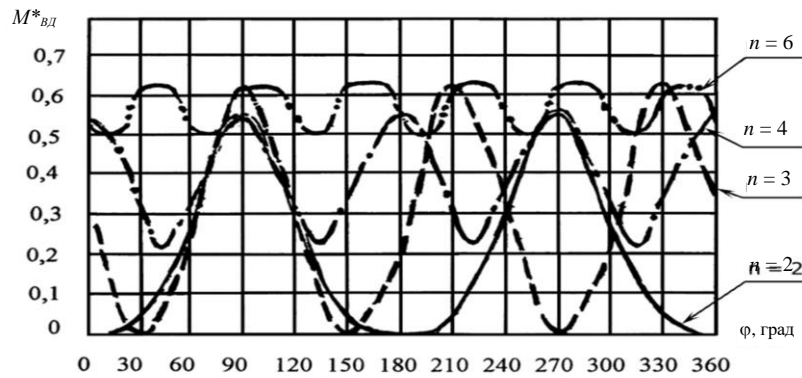
Далее были произведены расчеты для вращающего момента в зависимости от угла поворота лопасти ветротурбины. Однако, в районе предполагаемой установки скорость ветра может приниматься от 5 до 10 м/с.

Величина относительного вращающего момента ветродвигателя с n лопастями в зависимости от угла поворота φ может быть определена как сумма отдельных составляющих (2.10).

$$M_{pc}^* = \sum_{i=1}^n C_i [\sin(\varphi + \varphi_i) + \sin^2(\varphi + \varphi_i)] / C_{max} \quad (2.10)$$

где φ_i – фазовый угол, учитывающий угол между лопастями $\varphi_i = 2\pi / n$.

Зависимость $M_{pc}^* = f(\varphi)$, определенная по формуле (2.10), приведена на рисунке 2.10.



Рисунке 2.10. Зависимость относительного вращающего момента M^* от угла поворота φ и количества лопастей n [102]

Эта зависимость имеет квазисинусоидальный характер с увеличивающимися максимальными значениями $M_{вд}^*_{max}$ и уменьшающимися периодами с увеличением количества лопастей n . Среднее значение относительного вращающего момента ветродвигателя за полный оборот вала может быть определено путем интегрирования

$$M_{pc,ср.}^* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_{вд}^*(\varphi) d\varphi \quad (2.11)$$

С достаточной для практических расчетов точностью интегрирование по формуле (5) может быть заменено численным интегрированием с шагом $\Delta\varphi = 10^\circ = \pi / 18$. Численным интегрированием получены средние значения относительного вращающего момента ветродвигателя

Результаты расчета коэффициента мощности C_{pc} ротора Савониуса [?] приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Зависимость количества лопастей.

n	M^*_c	b^*				
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
2	0,42	0,01 8	0,035	0,05 4	0,071	0,090
3	0,57	0,02 3	0,046	0,06 9	0,091	0,115
4	0,76	0,03 0	0,061	0,09 1	0,122	0,153
6	1,13	0,04 5	0,090	0,13 5	0,181	0,226

Как видно из таблицы 2.5, с ростом относительной ширины полуцилиндрической лопасти b^* от 0,1 до 0,5 и повышением количества лопастей от 2 до 6 коэффициент мощности C_{pC} ротора Савониуса увеличивается от 0,018 до 0,226. Таким образом, целесообразно увеличивать количество лопастей n и их относительную ширину b^* . Полученные значения приблизительно соответствуют значениям C_{pC} , приведенным авторами [9, 12, 16] ($C_{pC} = 0,15 \div 0,20$). Следует, однако, отметить, что приведенный анализ не учитывает взаимное влияние лопастей при их взаимодействии с потоком воздуха и влияние крупных вихрей, образующихся и срывающихся с задней образующей полуцилиндрической лопасти, на коэффициент мощности C_{pC} . Поэтому требуется более детальное аналитическое исследование аэродинамики ротора Савониуса и экспериментальное определение коэффициента мощности C_{pC} , которое предполагается выполнить авторами в лабораторных и натуральных условиях. Для снижения потерь энергии за счет уменьшения потерь энергии в мощных вихревых течениях внутри ротора Савониуса предполагается провести исследования различных лопастей на основе полуцилиндрических лопастей с наклонными образующими и концевых элементов лопастей различной геометрии, например, зигзагообразной формы.

Производительность ветротурбины Савониус типа "S" с вариацией добавления ребра на лопасти (рисунок 2.11).

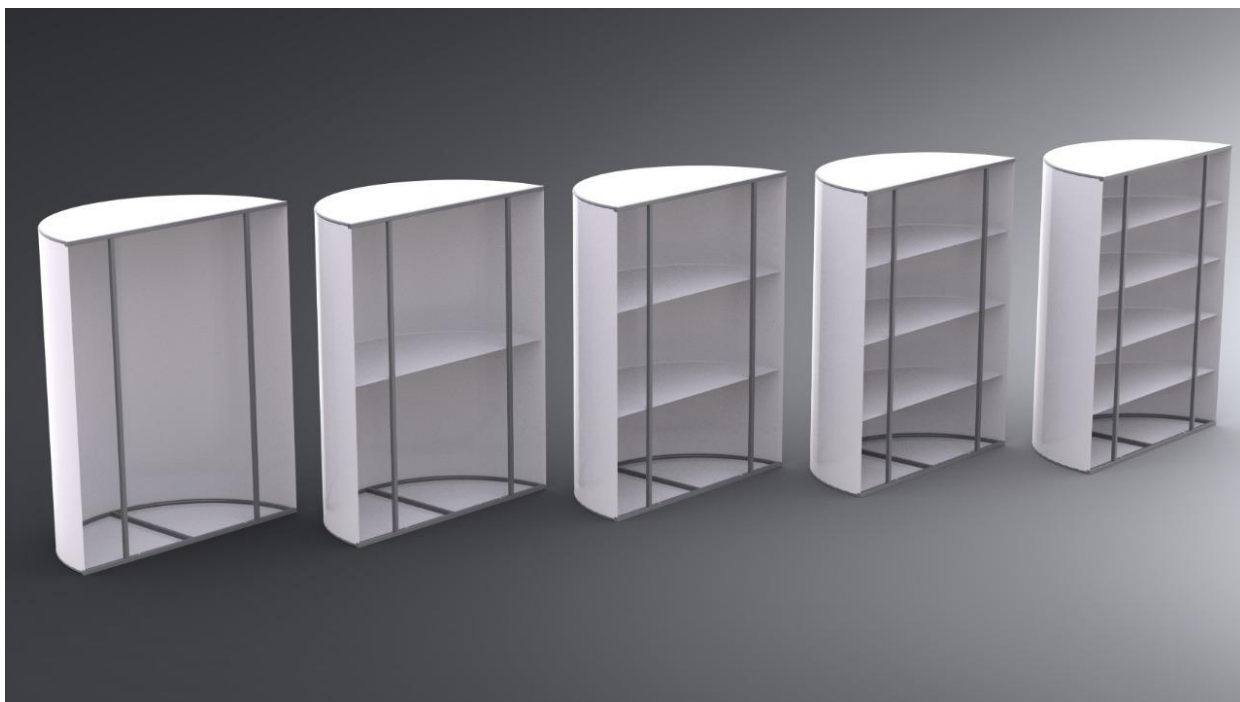


Рисунок 2.11 – Классическое крыло Савониуса с вариациями добавлением ребра

Чтобы определить эффективность ротора Савониуса в генерации электрической энергии, провели исследования, где экспериментально изучался эффект добавления ребер для S-образной формы ветроустановки Савониуса.

Плавник добавляется для заполнения пространства в лопасти при направлении потока ветра. Этот ротор имеет две турбинные лопатки, диаметр ротора 2 м и высоту ротора 2,4 м.

Исследование проводилось в сухой сезон путем измерения скорости ветра во второй половине дня. Средняя скорость ветра в этом районе составляет 2–3 м/с, максимальная 4–5 м/с. Установлено, что дополнительное ребро значительно увеличивает способность ротора Савониуса генерировать электрическую энергию. За счет увеличения электрической мощности. Самая высокая генерируемая мощность составляет 13,40 Вт при скорости ветра 4–5 м/с при добавлении 1 (одного) ребра в лопасть. Он увеличился на 22,71% по сравнению с лопастью несущего винта без дополнительного ребра (рисунок 2.12).

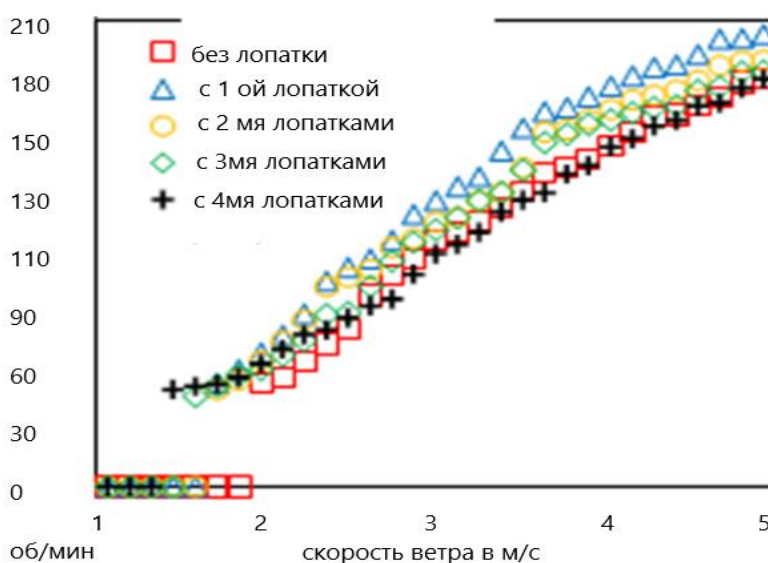


Рисунок 2.12 – Зависимость мощности генератора от количества ребер.

Однако увеличение числа ребер в лопасти не было линейным увеличением вырабатываемой электрической энергии. Показано, что лопасть ветрогенератора с 4 дополнительными ребрами имеет самую низкую производительность, генерируя всего 10,80 Вт электроэнергии, что ниже, чем та, которая генерируется лопастью без ребра–ротора. Зная влияние формы ротора, ротор на размер, добавление ребра, трансмиссии и используемого генератора, можно определить альтернативно.

Результаты повышения производительности ротора показывают, что ротор с 2 лопатками более эффективен, чем 3 и 4 лопатки турбины. Ротор турбины с добавлением торцевых пластин приводит к увеличению КПД турбины. Лопасть ветротурбины Савониус 2 производит несколько более высокое вращение, чем лопасть турбины 3, при этом частота вращения ротора 2 лопастей составляет 127 об/мин при скорости ветра 4–8 м/с и 120 об/мин при скорости ветра 4–8 м/с для лопастей ротора 3. Крутящий момент, создаваемый лопатками турбины 2, также выше, чем лопатками 3.

Профиль U-образной лопасти, а также L-образный профиль лопасти со смещением 10 мм дают большую мощность, чем смещение 0 мм. Лопасти ветротурбины Савониус 2 способны вращаться с меньшей скоростью по сравнению с лопастями 3 и 4. Профиль ветротурбины Савониус L хорош при количестве 2, 3 или 4 лопастей, способных вращаться с меньшей скоростью, чем профиль U, но профиль L производит меньшую мощность, чем профиль U. Это объясняется тем, что затонувшая сторона U-турбины способна поглощать энергию больше, чем прямая лопатка на L-турбине [6].

С момента его создания было проведено множество исследований по повышению эффективности ветрогенераторов типа Savonius. Модификациями, влияющими на производительность турбины Савониуса, являются торцевые пластины, соотношение сторон, расстояние между ковшами, перекрытие ковшей, число ковшей, ступени ротора, формы ковшей и ротора, валы, число

Рейнольдса и интенсивность турбулентности и другие модификации [2]. Все эти модификации сделаны только для того, чтобы увеличить угловую скорость и максимальный крутящий момент, который может обеспечить турбина Савониуса производить. Это исследование позволит оценить влияние дополнительного ребра на лопатку турбины на производительность турбины по выработке электроэнергии.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ВЭУ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОГО КРИТЕРИЯ

3.1 Модель ветроколеса конструкции ВЭУ с неподвижной вертикальной осью вращения ротора

Существует несколько методов расчета параметров ветряных турбин. Чтобы рассчитать параметры ветрогенератора и выбрать модель генератора, мы определили критерии, в соответствии с которыми следует выбирать конкретную модель ветрогенератора.

Первый критерий – это среднегодовая скорость ветра на месте установки.

Второй критерий – это количество вырабатываемой электроэнергии.

Третий – это значение начальной скорости ветра, которая варьируется для разных моделей в диапазоне от 2 до 4 м/с.

Четвертая – это номинальная скорость ветра, которая обычно составляет 8–15 м/с.

Среднегодовая скорость ветра определяется с использованием шкалы Бофорта и данных, полученных путем наблюдения за видимым воздействием ветра в течение года (рисунок 3.1) на участке, запланированном для установки ветротурбины [П.П. Безруких, 2010, НАН РК].

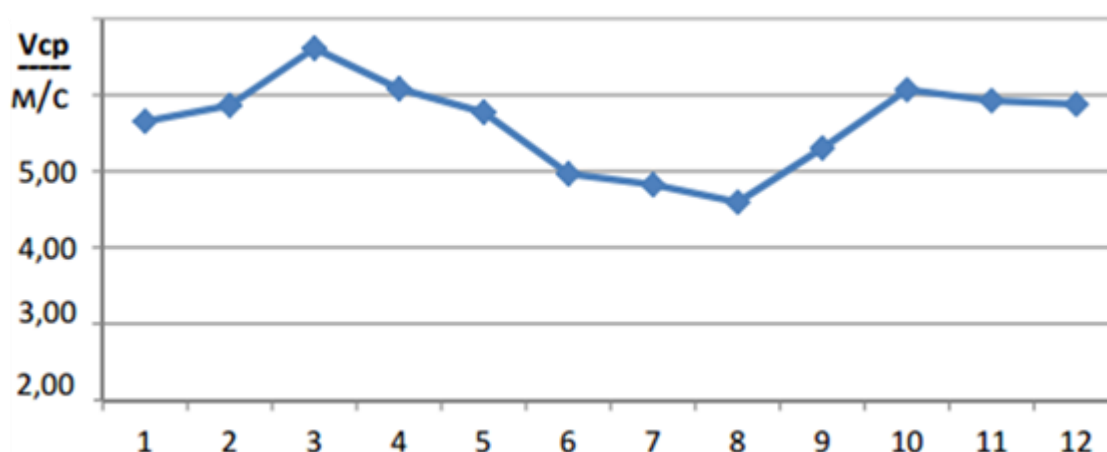


Рисунок 3.1 – Средняя скорость ветра по месяцам

Давайте теперь обратимся к методам расчета систем с ветроэлектростанциями. Прежде всего, нам нужно знать номинальную мощность объекта, для которого планируется установить ветрогенератор. В результате научных исследований и практических экспериментов был получен график зависимости мощности, вырабатываемой ветротурбиной, от скорости ветра [Никитенко Г.В., 2008].

Мощность ветроэлектростанции рассчитывается по формуле:

$$N = p * S * \frac{v^3}{2} \quad (3.1)$$

где:

ρ – плотность воздушных масс;

S – общая площадь обдува лопастей несущего винта;

V – скорость воздушного потока;

N – мощность воздушного потока.

На рисунке 3.2 представлена ВЭУ, разработанный автором.



Рисунок 3.2 – Спроектированная и изготовленная модель ВЭУ

Поскольку N является параметром, который кардинально влияет на мощность ветрогенератора, то реальная мощность установки будет близка к расчетному значению N .

Расчет роторов ветряных турбин

При проектировании ветряной турбины обычно используются два типа роторов:

- крылатый – вращение в горизонтальной плоскости;
- Ротор Савониуса, ротор Дарье – вращение в вертикальной плоскости.

Предлагаемая конструкция является аналогом Савониуса, однако имеет ряд преимуществ, описанных в разделе 2.

Конструкции роторов с вращением в любой из плоскостей могут быть рассчитаны по формуле:

$$Z = L \cdot \frac{W}{60V}, \quad (3.2)$$

где:

Z – степень скорости (низкая скорость) ротора;

L – размер длины окружности, описываемой лопастями;

W – скорость (частота) вращения ротора;

V – скорость воздушного потока.

Основываясь на этой формуле, можно рассчитать количество оборотов W – скорость вращения

Также одним из важных показателей ветрогенератора является шаг, или высота лопасти.

Этот параметр определяется по формуле:

$$H = 2\pi R * \operatorname{tg}\alpha \quad (3.3)$$

где:

2π – константа (6.28);

R – радиус, описываемый лезвием;

$\operatorname{tg} \alpha$ – угол сечения.

Существует два типа ветряных турбин, различающихся по своим техническим параметрам, одним из наиболее важных из которых является мощность. Наиболее отличительной характеристикой является геометрия вращения несущего винта. Исходя из этого, можно отметить два возможных варианта ветряных турбин, а именно ветряные турбины вертикального и горизонтального типов. Для ветряных турбин вертикального типа (рисунки 3.3) характерно, что турбина расположена вертикально относительно плоскости земли. Для ветряных турбин горизонтального (рисунок 3.4) типа характерно, что турбина расположена параллельно поверхности земли.

Казахстанские ученые предложили свои разработки, особенно малой мощности с вертикальной неподвижной осью.

Особенностью ветрогенератора вертикального типа является то, что он может работать на более низких частотах и более практичен в эксплуатации. Его конструкция содержит меньше механизмов и компонентов, что, в свою очередь, повышает надежность вертикальной ветряной турбины. Все это вместе взятое позволяет получить довольно высокую эффективность. С точки зрения экологичности ветрогенератор вертикального типа соответствует европейским стандартам. Основным принципом работы ветрогенератора вертикального типа является принцип магнитной левитации. Под воздействием ветрового потока одновременно формируются импульсная и подъемная силы. Наряду с этими силами формируется фактическая тормозная сила как элемент торможения. Импульсные и подъемные силы воздействуют на лопасти и приводят их во вращательное движение. В результате активируется ротор, который индуцирует магнитное поле, преобразующееся в электрическую энергию [NAN RK].



Рисунок 3.3 – Турбина вертикального типа

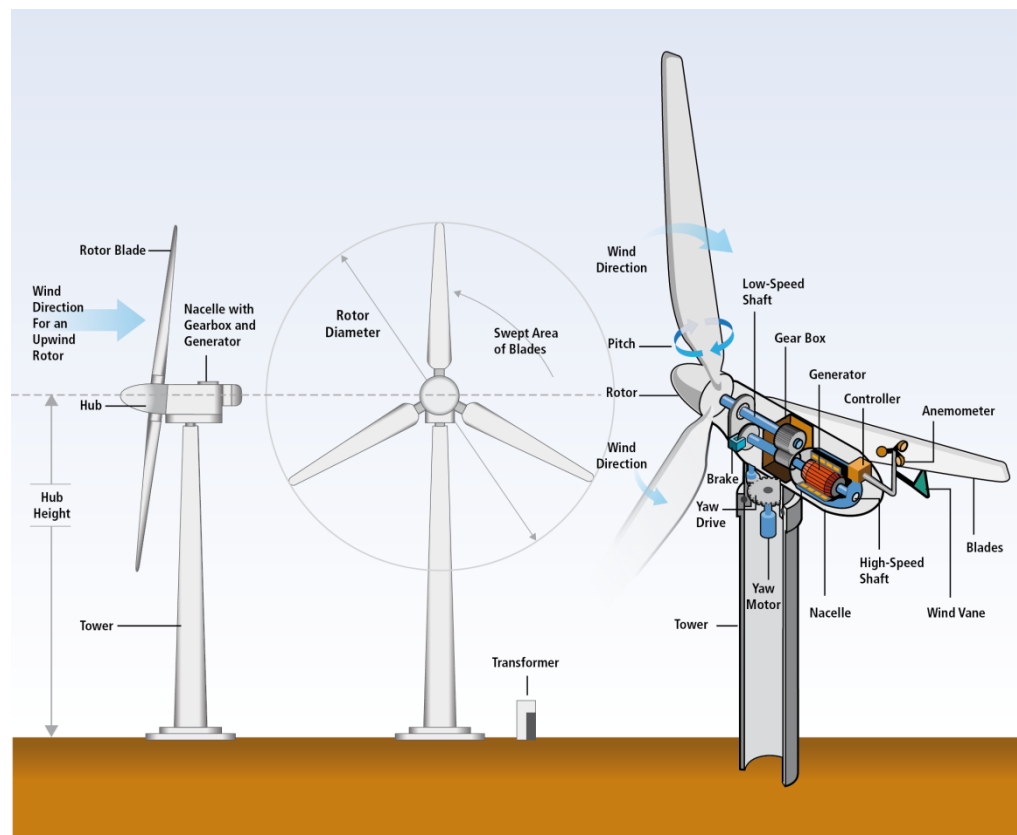


Рисунок 3.4 – Турбина горизонтального типа

Таким образом, очевидно, что при выборе того или иного варианта ветрогенератора необходимо учитывать несколько факторов, позволяющих добиться максимальной эффективности при выработке электроэнергии. Наши исследования показывают, что ветрогенераторы вертикального типа будут более практичными для территории Республики Казахстан. В то же время необходимо учитывать тот факт, что даже среди вертикальных ветрогенераторов определенные различия играют значительную роль в оптимизации режимов работы вертикальных ветрогенераторов. Наиболее важным элементом, согласно нашим наблюдениям, являются ветроуловители [#5].

3.2 Имитационные модели ветроколеса

Рассмотрим установку предлагаемого типа для которой были разработаны имитационные модели.

На рисунках 3.5–3.8 приводятся имитационные модели проведенных исследований различных лопастей на основе полуцилиндрических лопастей с наклонными образующими и концевых элементов лопастей различной геометрии.

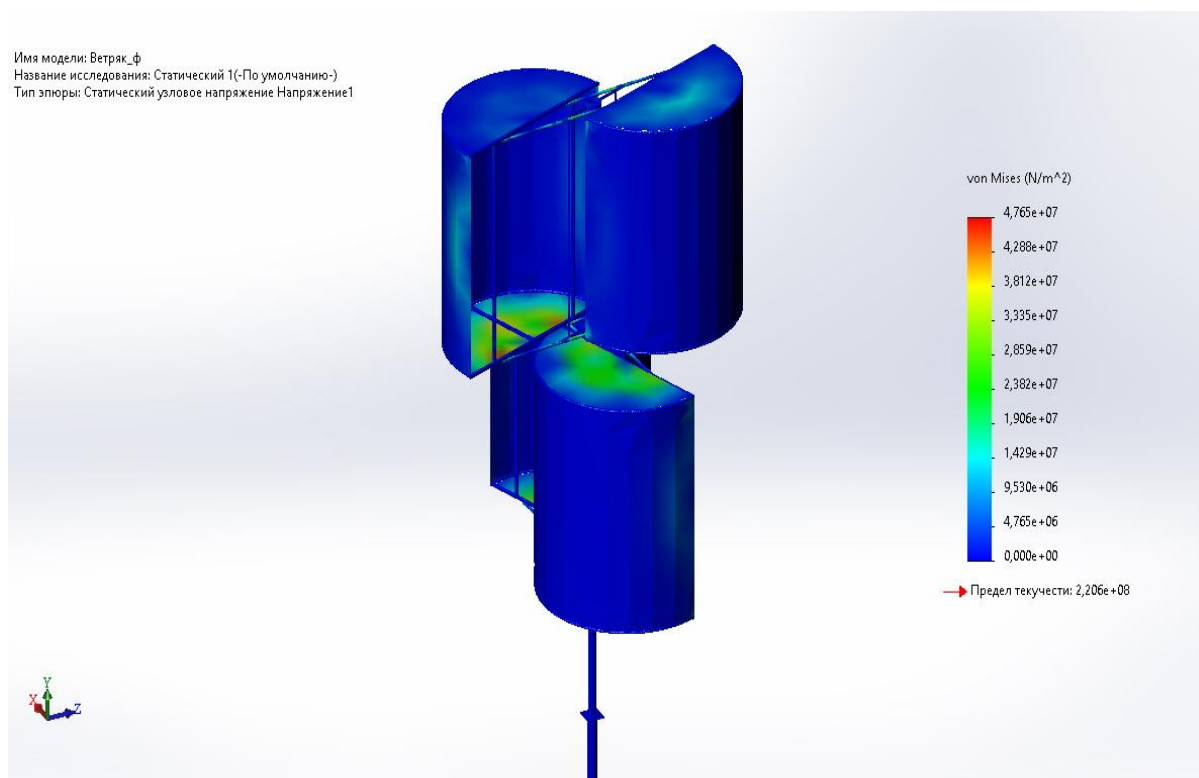
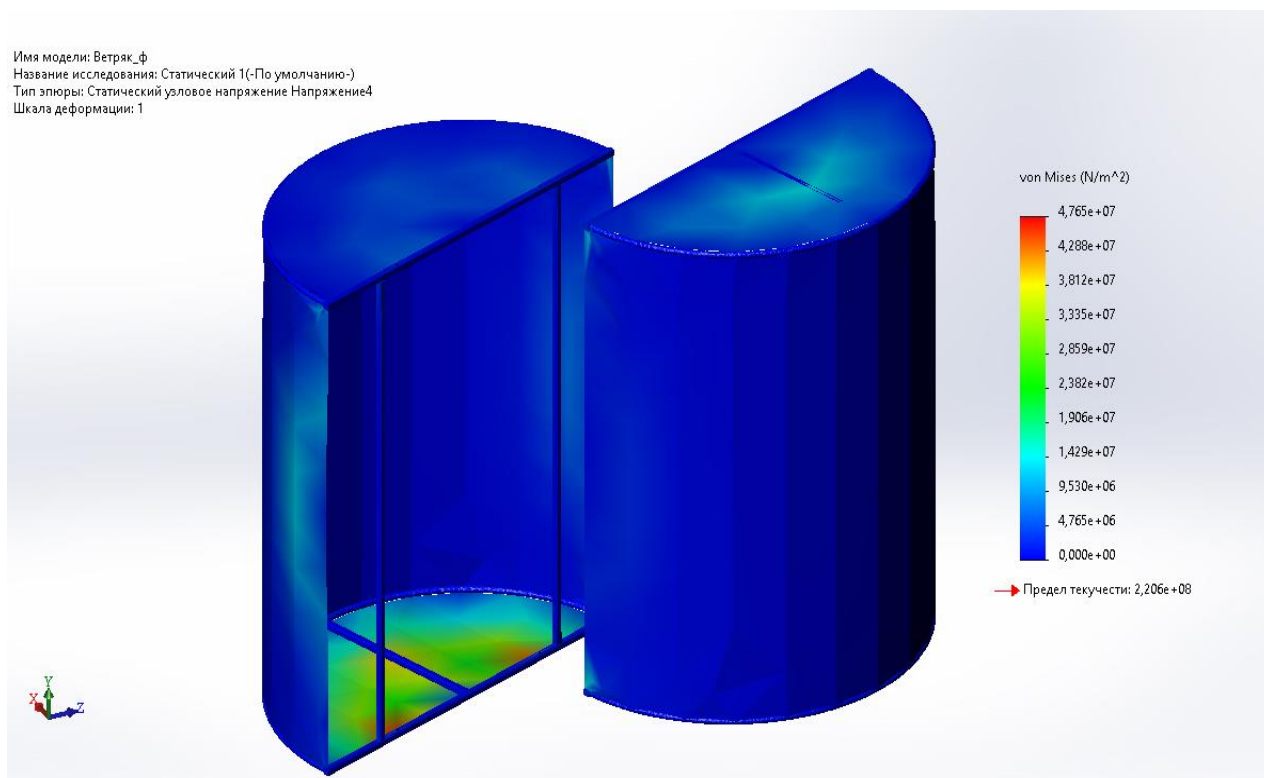


Рисунок 3.5 – 3Д модель спроектированной ветроустановки при 5 м/с (а, б – лопасти ветроустановки)

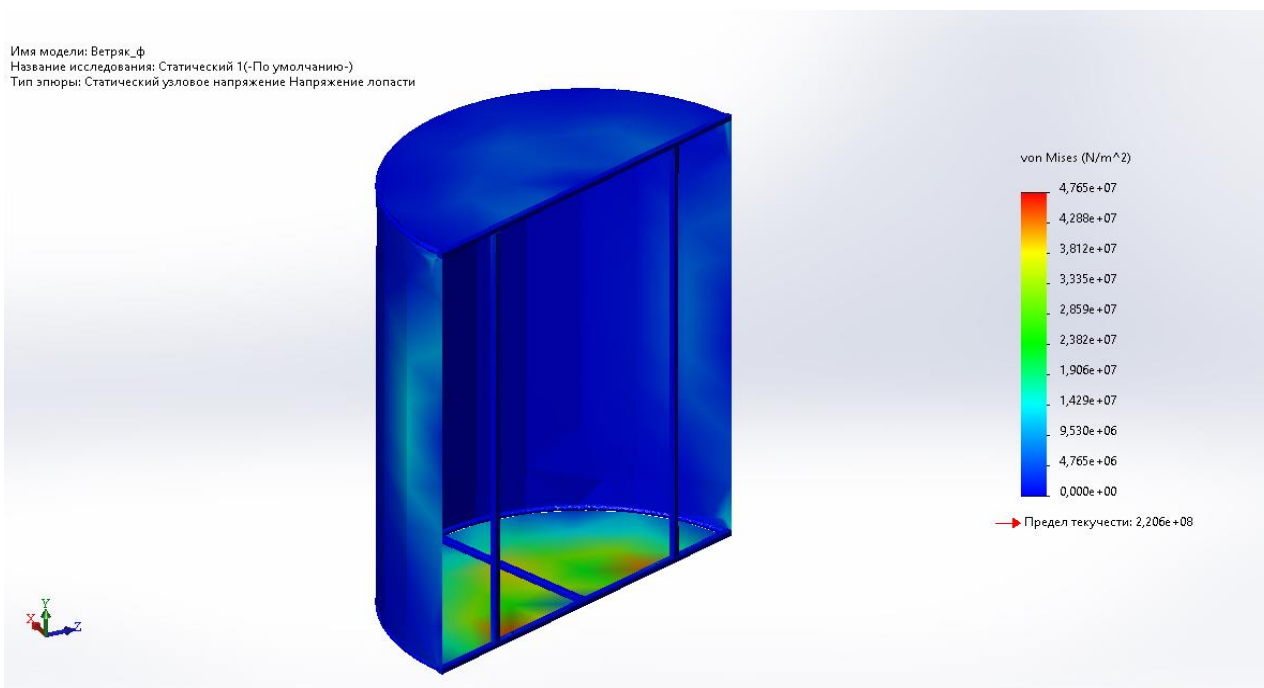
Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
Тип эпюры: Статический узловое напряжение Напряжение4
Шкала деформации: 1



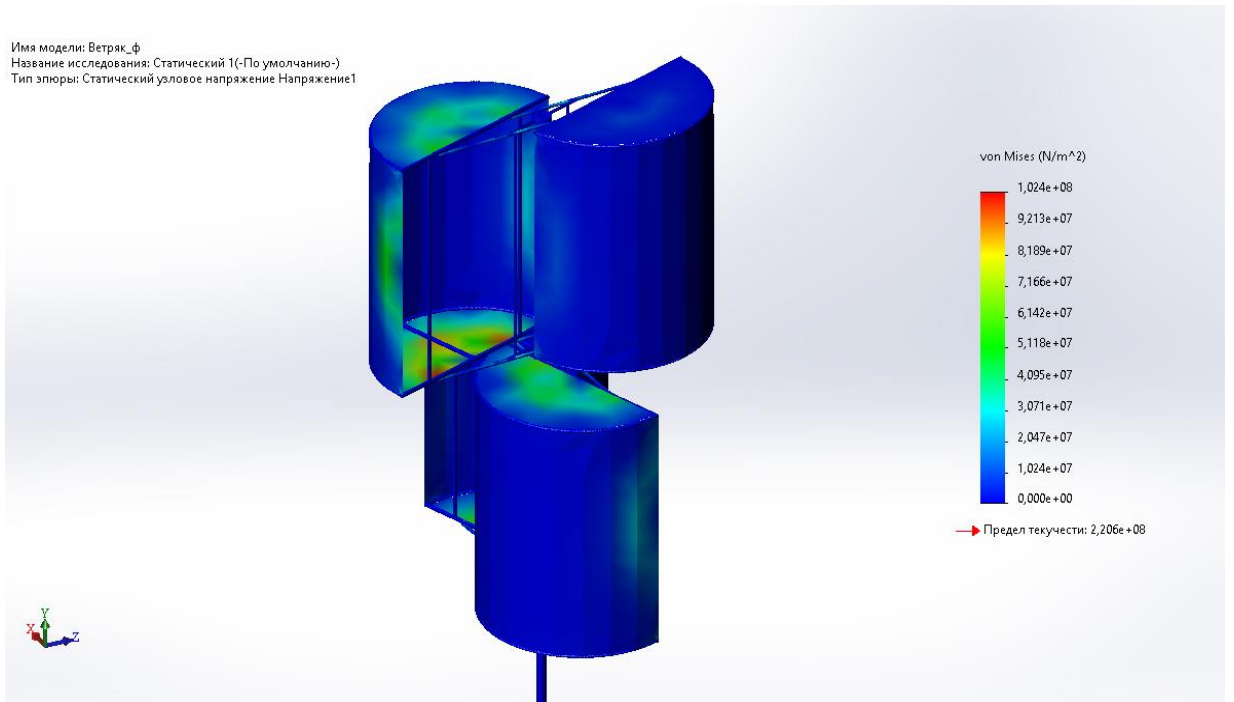
а)

Рисунок 3.5 – 3Д модель лопасти ветроустановки а,б,в, при 5 м/с

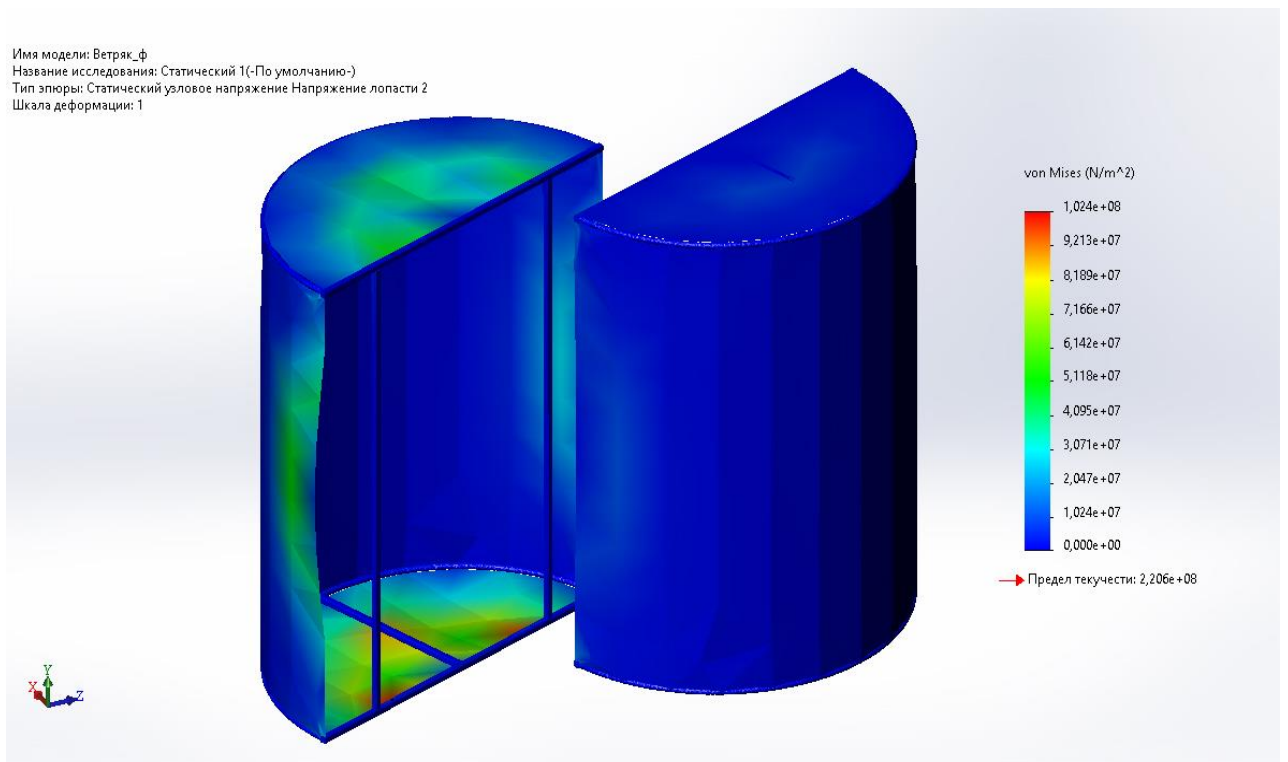
Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
Тип эпюры: Статический узловое напряжение Напряжение лопасти



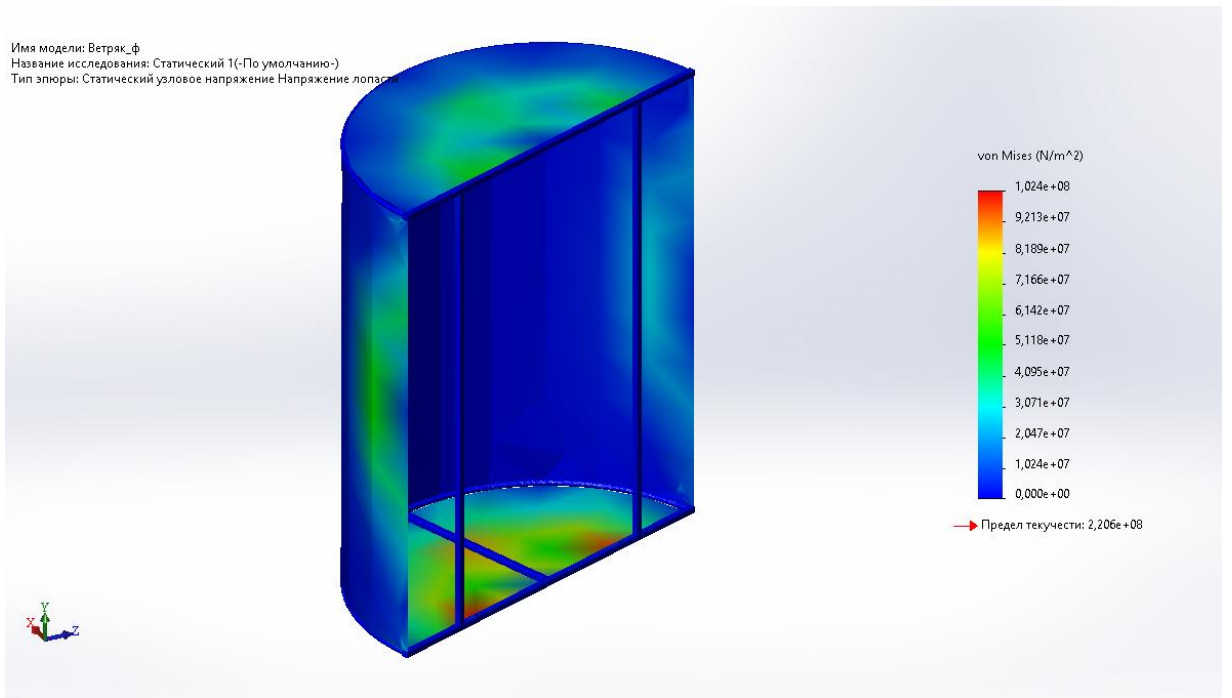
б)



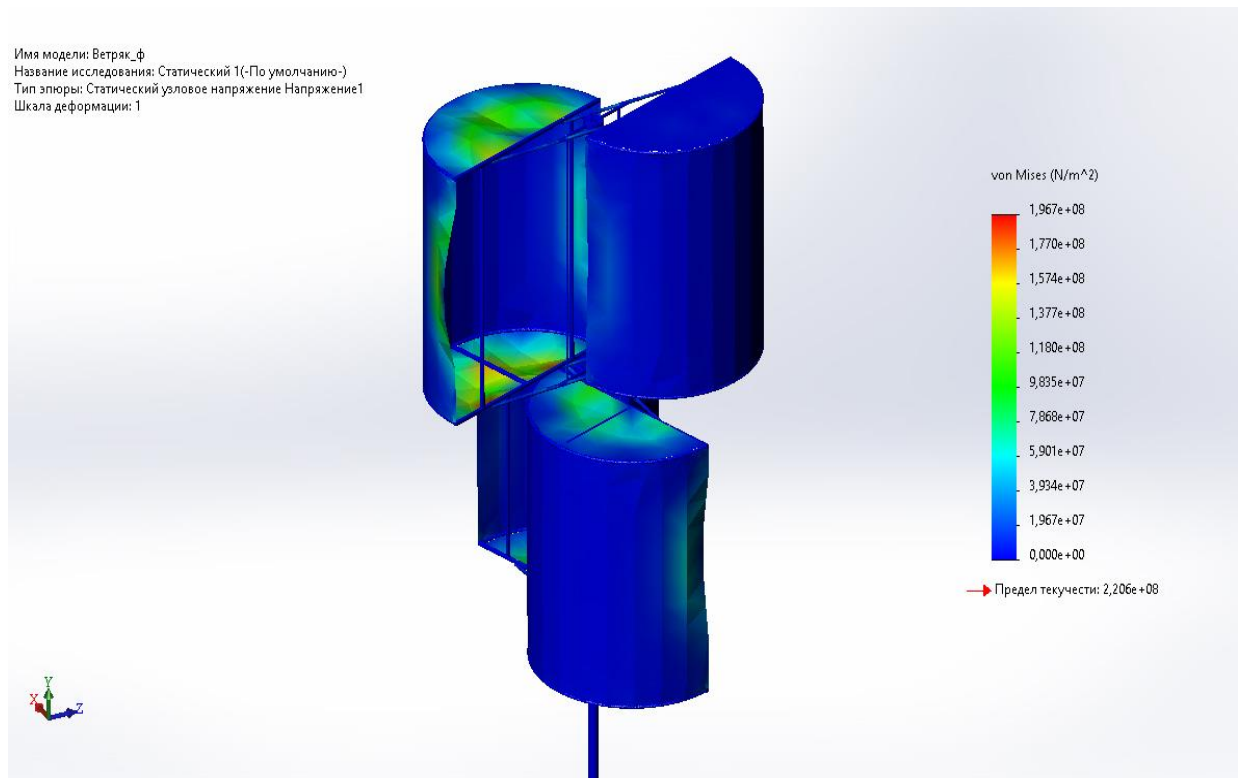
Рисунки 3.6 – 3Д модель спроектированной ветроустановки при 10 м/с (а, б – лопасти ветроустановки)



a)

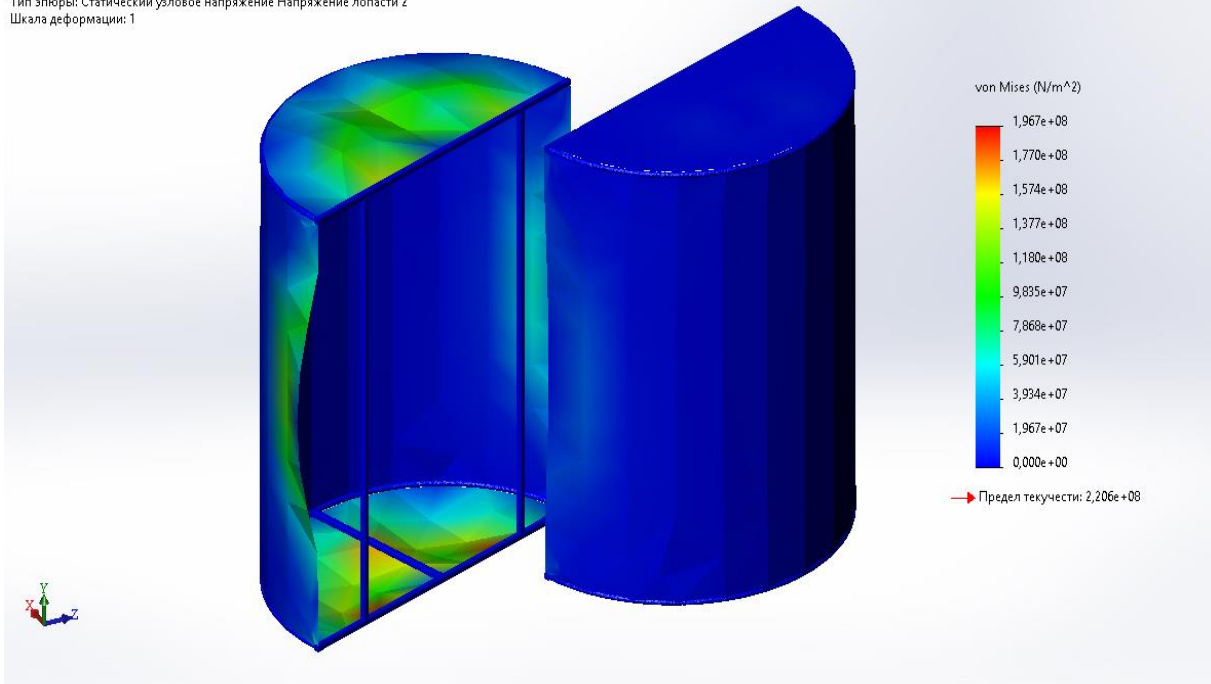


б)



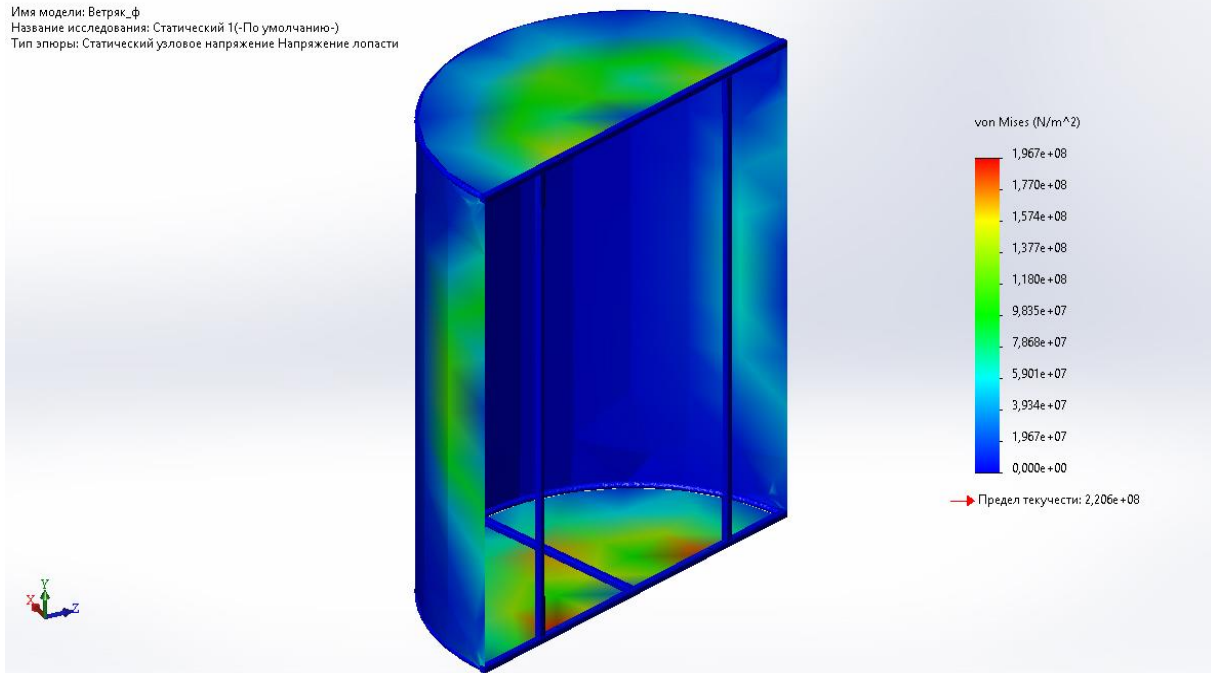
Рисунки 3.7 - 3Д модель спроектированной ветроустановки при 15 м/с (а, б – лопасти ветроустановки)

Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
Тип элэры: Статический узловое напряжение Напряжение лопасти 2
Шкала деформации: 1



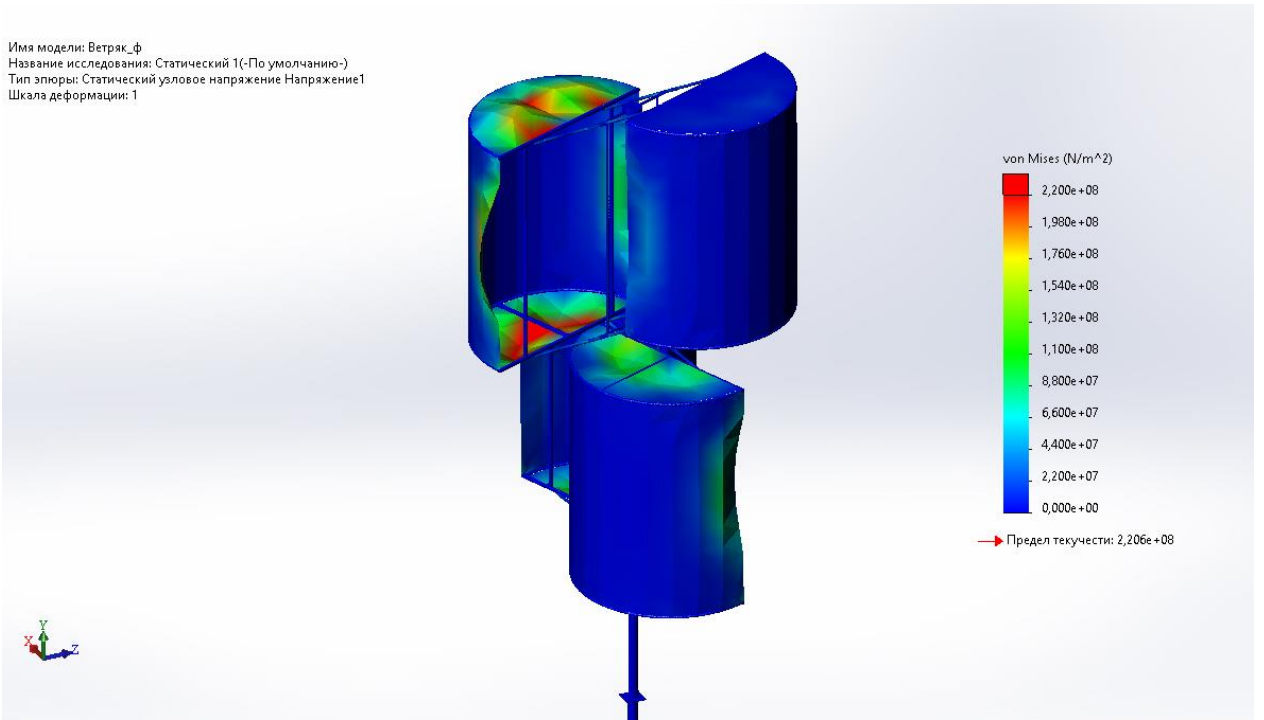
а)

Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1(-По умолчанию-)
Тип элэры: Статический узловое напряжение Напряжение лопасти



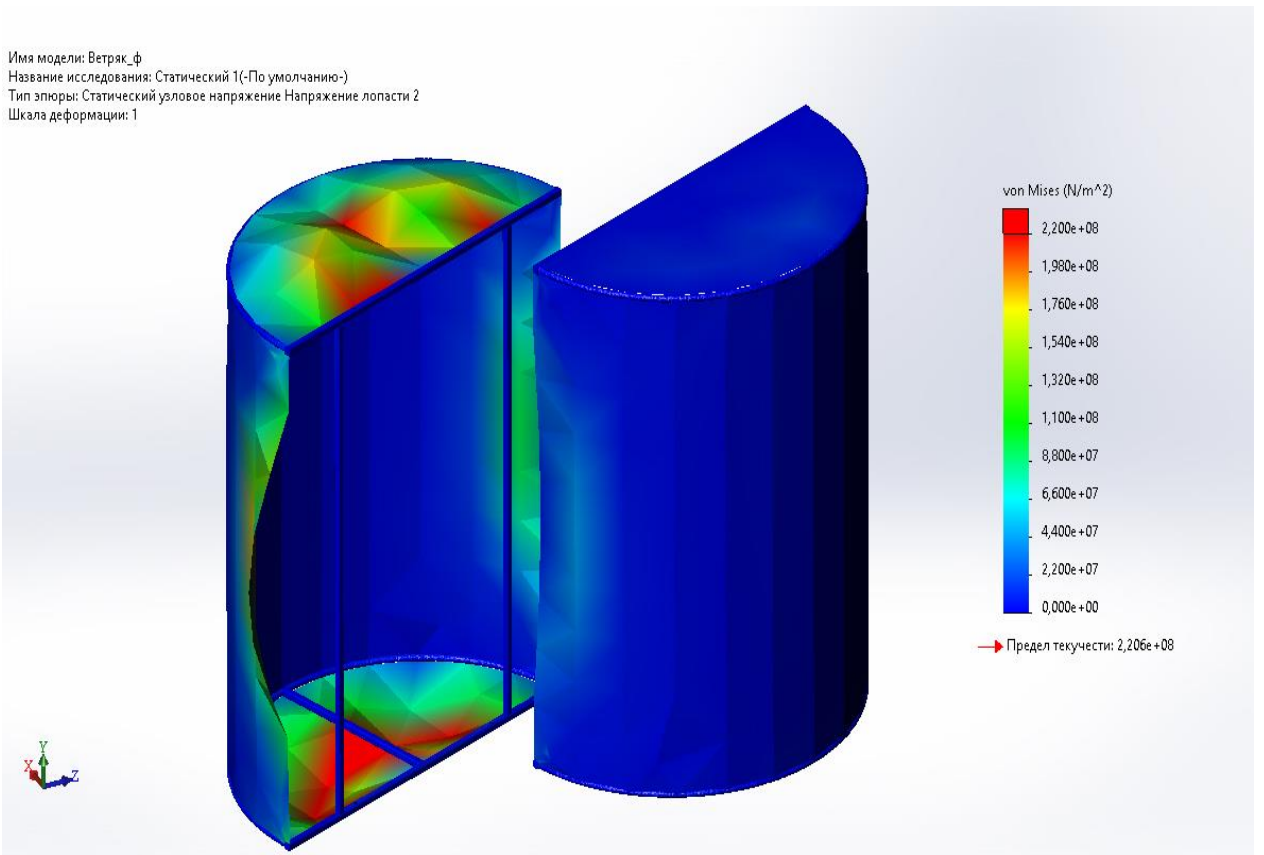
б)

Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1 (По умолчанию)
Тип элэоры: Статический узловое напряжение Напряжение1
Шкала деформации: 1

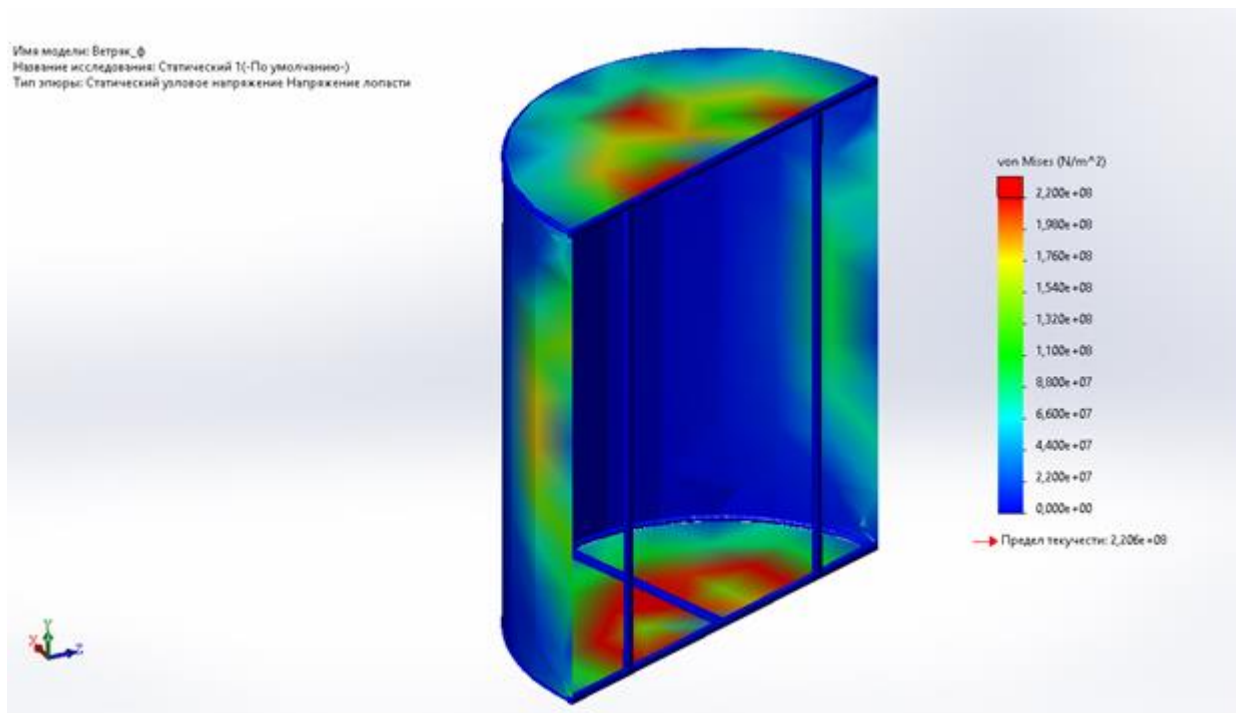


Рисунки 3.8 - 3Д модель спроектированной ветроустановки при 20 м/с (а, б – лопасти ветроустановки)

Имя модели: Ветряк_ф
Название исследования: Статический 1 (По умолчанию)
Тип элэоры: Статический узловое напряжение Напряжение лопасти 2
Шкала деформации: 1



a)



б)

Результаты анализа лопастей для скорости ветра приведены в таблице 3.1

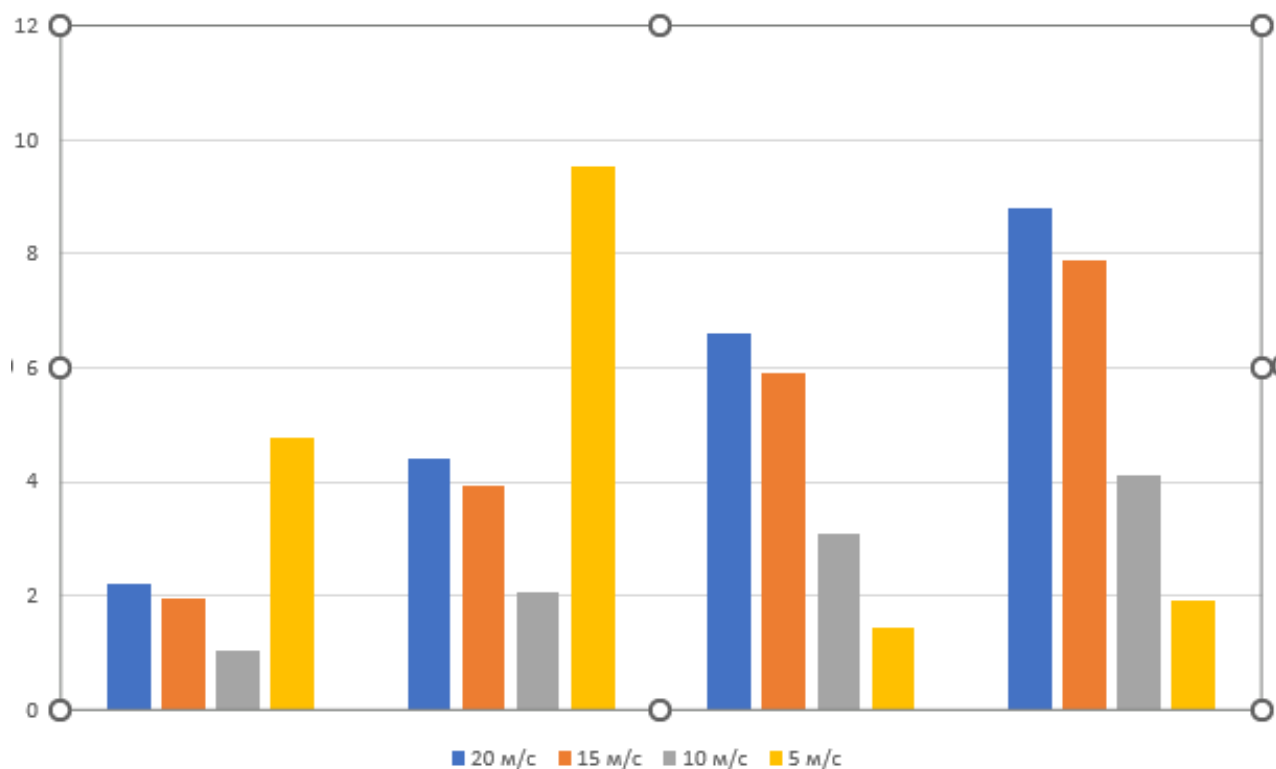


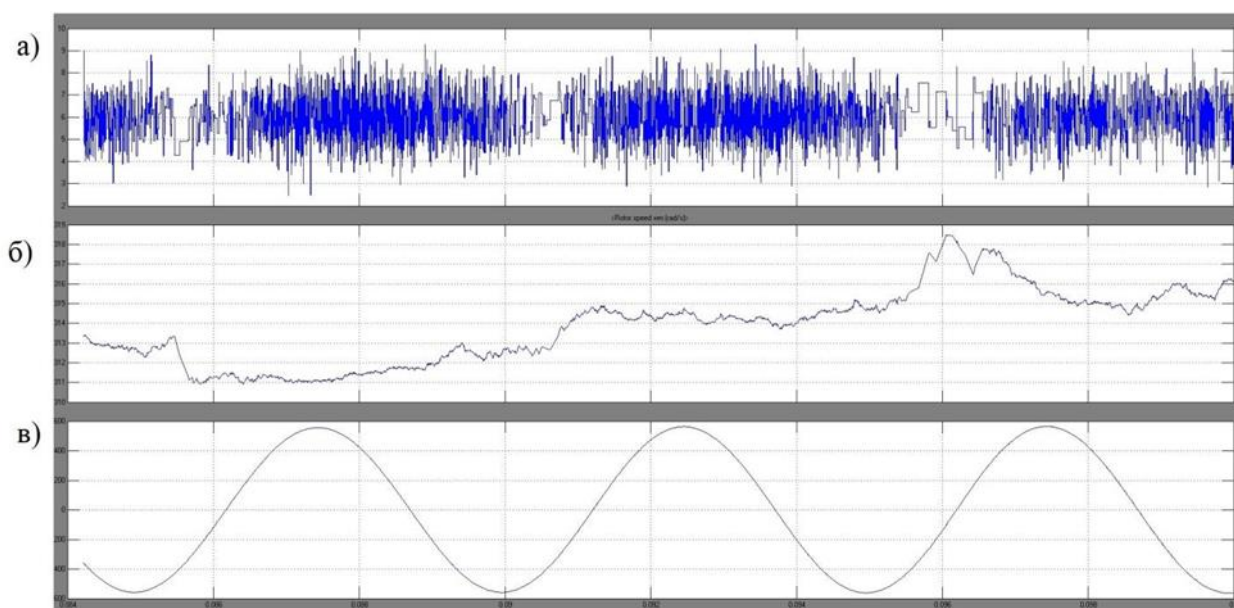
Рисунок 3.9 – Влияние ветра на лопасти изготовленной и спроектированной ветроустановки

Таблица 3.1 – Значения обтекания лопастей турбины в зависимости от скорости ветра

Текущность при 20м/с	0	2.200	4.400	6.600	8.800	1.100	1.320	1.540	1.760	1.990	2.200
Текущность при 15м/с	0	1.967	3.934	5.901	7.868	9.805	1.180	3.377	1.574	1.770	1.967
Текущность при 10м/с	0	1.024	2.047	3.071	4.095	5.118	6.142	7.166	8.189	9.213	1.024
Текущность при V5м/с	0	4.765	9.530	1.429	1.906	2.382	2.859	3.335	3.812	4.288	4.765

Как видно из таблицы 3.1 наблюдается большой разброс данных, из которых можно получить оптимальные данные расчета, применив программу CorelDRAW.

В зависимости от поставленных целей необходимо сделать правильный выбор ветроуловителя. Следуя приведенным выше расчетам, была смоделирована зависимость генерируемой энергии от мощности ветра (рисунок 3.10) [NAN RK].



а) скорость ветра, б) скорость вращения вала синхронного генератора и в) генерируемое напряжение

Рисунок 3.10 – Результаты моделирования зависимости мощности генерируемой энергии от мощности ветра

Из представленных графиков очевидно, что скорость вращения электрогенератора изменяется при изменении скорости ветра. Этот результат соответствует действительности.

Наши исследования позволяют нам создать методологические основы для наиболее эффективного выбора типа ветрогенератора в зависимости от

поставленных целей. Также необходимо учитывать специфические особенности используемого оборудования, экономическую целесообразность и экологическую безопасность. В связи с этим необходимо учитывать определенные нюансы. Одной из главных проблем является кубическая зависимость мощности практически любого современного ветрогенератора от скорости ветра. При уменьшении скорости в 2 раза количество энергии уменьшается в 8 раз. Решение проблемы требует увеличения высоты мачты, что влечет за собой дополнительные финансовые затраты.

Как и любое техническое изделие, ветрогенератор требует профессионального обслуживания, а также ремонта и замены компонентов. Это также требует дополнительных финансовых затрат.

Таким образом, в результате нашего исследования можно отметить следующие принципиально важные выводы:

1. Мощность ветрогенератора прямо пропорциональна третьей степени скорости ветра. Исходя из этого, следует, что удвоение скорости ветра увеличит мощность в восемь раз.

2. Необходимо разработать эффективные конструкции для регионов, где скорость ветра не превышает 7 м/с.

3. Наиболее эффективными являются ветряные турбины с вертикальной осью вращения, в частности роторного или карусельного типа.

Чтобы решить эти проблемы, необходимо проводить научные исследования и опытно-конструкторские работы учеными по всему миру. Ключевую роль в этих исследованиях занимает методология использования ветряных турбин. Методика позволит оптимизировать параметры ветрогенераторов и создавать оптимальные технологические конструкции.

Все это вместе взятое позволяет вам выбрать правильную модель устройства, нужное количество блоков и мощность станций. Неоспоримым фактом является то, что разработка новых типов ветрогенераторов является очень перспективным направлением, так как ветряные турбины позволяют поддерживать экологический баланс при минимальных затратах на строительство и эксплуатацию.

3.3 Разработка методики математического моделирования

При разработке алгоритма расчета модели воспользуемся данными таблицы 3.1.

Как было сказано, в предыдущем параграфе в связи с разбросанностью данных, полученных в имитационных моделях, они будут внесены для расчета с помощью разработанной методики математического моделирования параметров ветроколеса, структурная схема которой приведена на рисунке 3.10.

Методика включает в себя:

1. Анализ и обоснование критерий выбора параметров ветроколеса D , d , H , V , R , M , R , r , а также параметров среды, влияющих на вращение ветроколеса ρ и коэффициентов быстроходности λ , момента C_m и мощности C_p .

2. Планирование многофакторного эксперимента для предварительной оценки постоянных и переменных величин элементов конструкции. Переменными величинами являются скорость ветра, мощность и быстроходность. Оценка пределов варьирования переменными конструктивными элементами.

3. В результате многофакторного эксперимента выявление постоянных величин и ограничение диапазона изменения переменных, характеризующих рабочий вариант модели (переменные: $V, M, P, Z, \varphi, \omega$; постоянные ρ, C_v, C_p, λ), а также прогноз для модели рациональных параметров ветроколеса.

4. Определение аналитических зависимостей с учетом многофакторного эксперимента и выявленных ограничений с целью устранения ряда параметров, влияющих на оптимальные размеры ветроколеса D, d, R, r, H .

5. Сравнение результатов расчета, анализ погрешности, оценка возможности использования математической модели для дальнейших расчетов и исследований при компьютерном моделировании.

На основании разработанной методики моделирования параметров ветроколеса, используя известные теоретические положения разработана математическая модель расчета на основании зависимости уравнения (2).

Текущей координаты r , относительной плотности воздуха δ ; варианты по радиусу окружности, которую описывает лопасть ветротурбины; по скорости ветра $V = 5-20$; варианты по диаметру D ; подварианты по текущей высоте лопасти H : $r = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$ см; формула для расчета в функции разности потенциалов от напряженности поля и радиуса МП – r_0 ; формула вычисления шага по участкам в интервале от $i = 1$ до $i = n$ в функции напряженности и заряда.

Искомые величинами будут: плотность тока: $j_1 = I/2\pi r$; начальная напряженность поля в функции от радиуса провода, относительной плотности воздуха $E_0 = 31,5\delta \left(1 + \frac{0,305}{\sqrt{r_0\delta}}\right)$ потенциал в функции от напряженности, радиуса провода, относительной плотности воздуха, плотности тока, тока разряда, текущего радиуса, длины цилиндра: $U_0 = f(E, j_1, x_1)$.

На основе приведенной выше методики и алгоритма решения, а также таблицы идентификаторов (таблицы 3.2) составлена рабочая программа процесса расчета на ПЭВМ. В таблице 3.2 показаны идентификаторы, а в приведен расчетный цикл 11 основных и 3 дополнительных (в интервале: $x_{i1} = 0,0025; 0,005; 0,0075$ см; $x_{i2} = 0,01; 0,015; 0,0175$ см; $x_{i3} = 0,02; 0,021; 0,022$ см) вычислений и выдана распечатка конечных результатов по всем заданным вариантам исходных данных.

А в таблице 3.3 приведен расчетный цикл 11 основных и 3 дополнительных.

Проведенные выше теоретические исследования функции X позволили установить интервалы изменения основных параметров скорости: для $V = 5$ м/с; $V = 10$ м/с; $V = 15$ м/с $V = 20$ м/с и вводятся в промежуточную формулу для определения составляющих.

Изменяя текущую координату (x, y) с заданным шагом, вычисляем значения величин, составляющих критерии выбора. По величине скорости ветра для 5, 10, 15, и 20 м/с находятся искомые значения.

Рассмотренная методика позволяет конструкторам и проектировщикам:

- получить конечные цифровые данные для различных значений влияния скорости ветра на лопасти ветротурбины, исследовать и определить эффективность выхода найденного критерия;
- составить алгоритм и программу расчета на ЭВМ рабочих параметров и режимов.

Таблица идентификаторов приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Идентификаторы ветроколеса

Задание	P	d	ρ	r	λ	sin	φ	z	v
Программа	П	D	□	R	Λ	SIN	Φ	Z	V

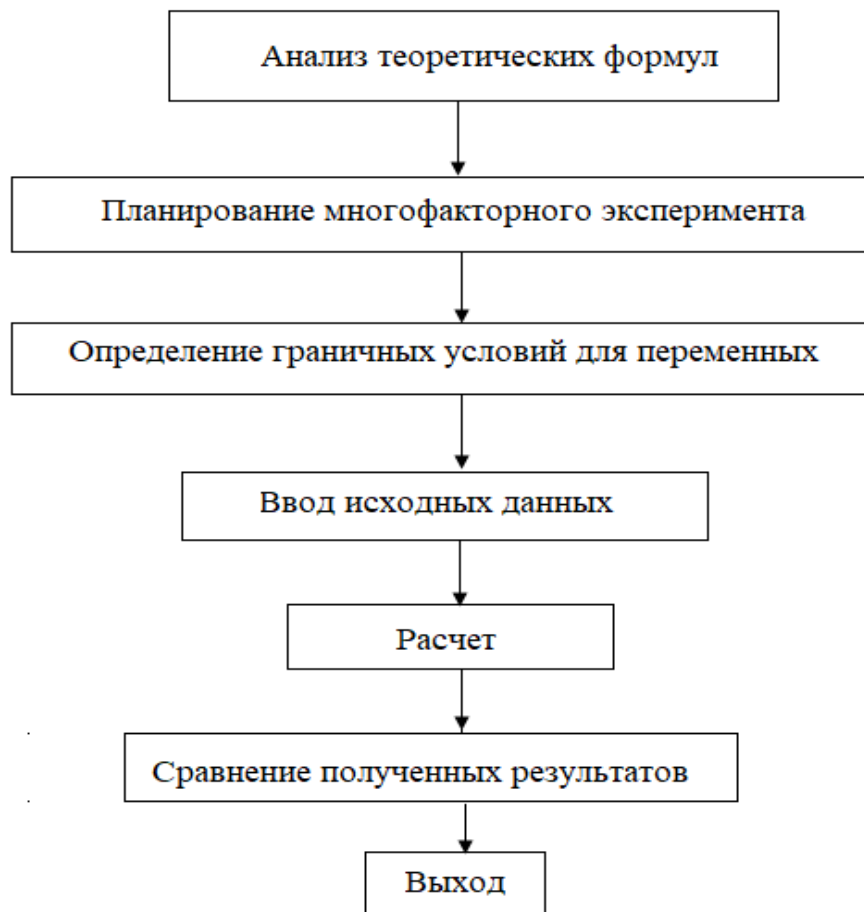


Рисунок 3.10 – Блок схема методики математического моделирования

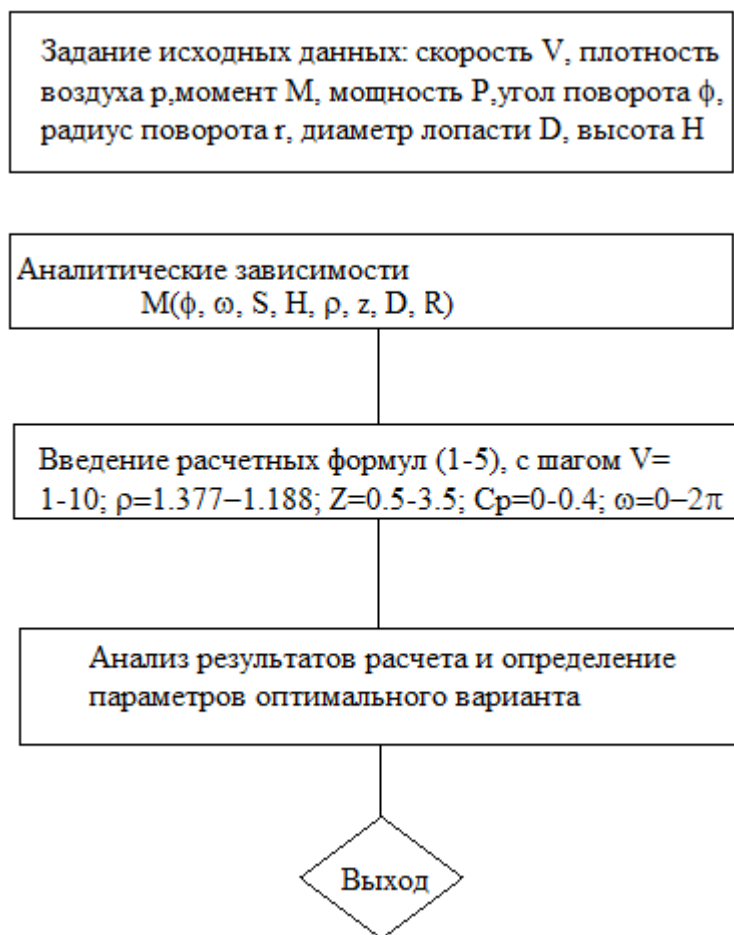


Рисунок 3.11 – Блок–схема расчета характеристик устройства

3.4 Разработка рекомендаций по использованию современных ветротурбин

При разработке рекомендаций прежде всего опираемся на критерии [NAN RK].

Первый критерий – это среднегодовая скорость ветра на установочной площадке.

Второй критерий – величина, вырабатываемой электрической мощности.

Третий – значение стартовой скорости ветра, варьирующейся для разных моделей в пределах от 2–х до 4–х м/с.

Четвертый – номинальная скорость ветра, составляющая обычно 8 – 15 м/с.

Как видим в трех критериях фигурируют скорости ветра, потенциал которых приведен в подразделе 3.1. В таблице 3.3 приведены показатели эффективности ветра по регионам Казахстана.

Таблица 3.3 – Показатели эффективности ветра по регионам Казахстана

Регион	Количество ветреных дней в году	Эффективность в %
Астана	195	49
Павлодар	198	50,8
Актау	202	52
Атырау	211	56
Петропавловск	224	60
Балхаш	230	63
Форт–Шевченко	241	69
Кулалы	243	70

Кроме перечисленных критериев важное значение имеют коэффициенты мощности, момента и быстроходности.

Используя методику повышения производительности турбины Савониуса

В данной работе представлена инновационная методика повышения производительности ветротурбины Савониуса. Новый метод основан на введении верхнего дефлектора и нижнего дефлектора. Форма и расположение обоих устройств оптимизированы с помощью генетического алгоритма. Производительность турбины с оптимизированными устройствами сравнивается с производительностью одиночной турбины Савониуса. В исследовании используется решатель конечного объема (ANSYS–FLUENT) для решения нестационарных усредненных по Рейнольдсу уравнений Навье–Стокса и уравнений модели турбулентности. Оптимизированная конфигурация приводит к гораздо более высокому коэффициенту мощности, чем турбина Savonius. Средний пиковый коэффициент мощности при использовании как дефлектора, так и дефлектора составляет 0,47 по сравнению с 0,24 у турбины Савониуса. Пиковый коэффициент мощности турбины соответствует соотношению скоростей, близкому к единице. Эта улучшенная производительность объясняется благоприятным аэродинамическим взаимодействием между турбиной и нижележащим дефлектором, который ускоряет обтекание ротора и генерирует больший крутящий момент поворота. Дефлектор создает струйное воздействие на продвигающийся ковш и ускоряет поток за ковшом, создавая большую зону отрицательного давления и тем самым увеличивая приводной момент. Кроме того, верхний дефлектор (также называемый экраном или завесой) создает экран для возвратного ковша турбины, который уменьшает неблагоприятное влияние, связанное с возвратным ковшом, на аэродинамический крутящий момент турбины. Это замечательное улучшение производительности турбины будет способствовать будущему применению ветротурбины Savonius в небольших энергетических приложениях ветроэнергетики.

Ограниченные запасы невозобновляемых энергетических ресурсов и негативное воздействие, которое они оказывают на окружающую среду, в целом сделали возобновляемые источники энергии более привлекательными.

Можно сказать, что возобновляемые источники энергии в последнее время вызывают озабоченность по поводу безопасности и доступности энергии в долгосрочной перспективе. Если этому будет отдан приоритет лицами, принимающими решения, то объем производства возобновляемых источников энергии может значительно превысить мировой спрос на энергию при одновременном сохранении минимального негативного воздействия на окружающую среду. Стало очевидно, что благодаря этим возобновляемым ресурсам энергия ветра становится все более существенной для ученых и технологов. Исследования по повышению эффективности устройств преобразования энергии от ветра проводились многочисленными специалистами.

Кинетическая энергия воздуха улавливается с помощью различных типов турбин. Ветряные турбины могут быть классифицированы как тип вертикальной оси (VAWT) или тип горизонтальной оси (HAWT) в зависимости от ориентации их оси. Изобретенная Сигурдом Савониусом в 1925 году (Fleming and Probert, 1982; Ushiyama and Nagai, 1988), турбина Савониуса обычно изготавливается из два цилиндрических ведра (образующие S-образную форму) и разнесенные на небольшое расстояние перекрытия. Когда воздух проходит через ковши турбины, он создает поверхностные силы на ковшах, заставляя турбину вращаться. Турбина Savonius имеет определенные преимущества, такие как простота изготовления и установки, самозапуск при низких скоростях ветра и независимость от направления ветра. Однако коэффициент мощности турбины Савониуса низок, что является главным недостатком такого рода ветроэнергетики (Wilson and Lissaman, 1974).

Имеющуюся литературу по турбине Савониуса можно разделить на четыре группы.

Первая группа сосредоточена на исследовании механизма производства энергии турбины Савониуса с помощью визуализации поля потока и экспериментов (Fujisawa, 1992a; Fujisawa and Gotoh, 1992c).

Вторая группа пытается улучшить производительность турбины путем поиска оптимальных геометрических параметров, таких как соотношение сторон ковша турбины, концевые пластины, относительное положение одного ковша с другим, форма ковша и, наконец, количество ковшей (Akwa et al., 2012a; Gupta et al., 2011; Hayashi et al., 2005; Kamoji et al., 2008).

Третья группа исследует методы усиления, такие как экранирование возвращающегося ковша с помощью защитной пластины или коробки аэродинамической трубы, добавленной к турбине Savonius (Altan et al., 2008; Irabu and Roy, 2007; Mohamed, 2011; Shaughnessy and Probert, 1992).

Четвертая группа разрабатывает модификации конструкции ковша Savonius с использованием гибких парусов, а не жестких ковшей, витых ковшей или решетчатых ковшей (Fleming et al., 1985; Probert and Reupke, 1991).

Методология, применимая к различным ветротурбинам была рассмотрена и для казахстанским разработок, особенно при расчете конструктивных и эксплуатационных параметров.

Конструктивные и эксплуатационные параметры

Существует три ключевых эксплуатационных параметра для ветряных турбин: (1) коэффициент быстроходности λ , в дополнение к числу Рейнольдса турбины.

1) коэффициент быстроходности λ

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}, \quad (3.4)$$

где угловая скорость турбины обозначается ω , радиус наконечника турбины равен R , а скорость ветра равна V .

2) коэффициент момента турбины C_M определяется

$$C_M = C_P \frac{V_w}{U} = \frac{C_P}{\lambda}, \quad (3.5)$$

3) коэффициент мощности C_P , иначе коэффициент использования ветра

$$C_P = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ветра}}}, \quad (3.6)$$

где $P_{\text{мех}}$ – мощность на валу ветроколеса;

$P_{\text{ветра}}$ – мощность ветра, проходящая через площадь ветроколеса.

Механическую мощность определяем традиционно

$$P_{\text{мех}} = M_a \cdot \omega, \quad (3.7)$$

где M_a – аэродинамический момент.

Мощность набегающего потока

$$P_{\text{ветра}} = \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2}, \quad (3.8)$$

где ρ – плотность воздуха; S – площадь.

Таблица 3.4 – Геометрия турбины и рабочие параметры, используемые в данном исследовании.

Наименование параметров	Ед.изм	Расчетные значения
1	2	3
Диаметр турбины, D	мм	208
Диаметр ковша, C	мм	112
Коэффициент перекрытия, с	с	0,15
Толщина ковша	мм	1,00

Продолжение таблицы 3.4

1	2	3
Диаметр вала без вала	–	–
Скорость ветра	м/с	6–12
Число Рейнольдса, Re		7.7×10^4 – 1.55×10^5

Модель турбины Савониуса может быть упрощена до двумерной (2D) задачи, пренебрегающей изменениями в поведении потока из-за конечных эффектов. Ferrarietal (2017) представили трехмерное (3D) численное исследование, характеризующее динамическое поведение турбины Savonius по сравнению с 2D–результатами. 2D–модель показала завышение коэффициента мощности по сравнению с экспериментальными данными при $TSR = 1$. Результаты 3D–модели лучше согласуются с экспериментами с пиковым коэффициентом мощности $C_p = 0,202$ при $TSR 0,8$ для Ротора с соотношением сторон 1,01. Пик C_p , предсказанный с помощью 2D–модели, был на 41% выше, чем предсказанный с помощью 3D–модели с торцевыми крышками и небольшим соотношением сторон 0,55. При более высоком соотношении сторон 1,66 прогнозируемый C_p всего на 29% ниже, чем 2D–результат. Низкий коэффициент мощности 3D–модели был вызван сильными вариациями коэффициента ресурса по высоте Ротора, который показывает более низкие значения по бокам ротора и вариации вихревых структур, генерируемых за Ротором турбины. Этот эффект уменьшается по мере того, как соотношение сторон становится выше, а результаты 3D–модели приближаются к результатам 2D–модели. Поскольку 2D–модель требует значительно меньшего вычислительного времени, она была в этом исследовании смоделированные размеры турбины Савониуса и условия потока были выбраны из доступной литературы, чтобы обеспечить валидацию модели.

Для максимизации коэффициента выходной мощности была использована библиотека оптимизации связи (MOGAI) (Rigoni and Poles, 2005), основанная на эволюционных алгоритмах в сочетании с коммерческим пакетом flow solver ANSYS–FLUENT (ANSYS Inc, 2010). С помощью этой процедуры оптимизации была получена наилучшая форма и соответствующее ей оптимальное положение дефлекторной пластины и нижележащего дефлектора, в то время как предполагалось, что ветер имеет равномерную скорость V_w .

Для решения уравнений УРАНС использовался ANSYS-FLUENT. Особенности турбулентного течения были предсказаны с помощью двух–уравнение k – ϵ реализуемая Модель турбулентности с улучшенной обработкой стенок (ANSYS Inc, 2010). Максимальное значение y^+ первой ячейки вблизи твердой поверхности было установлено меньше 1,0. хорошо известно, что эта модель дает хорошие результаты по сравнению с экспериментальными результатами турбин Савониуса (El Baz et al., 2015a). Условия конвекции были дискретизированы с использованием схемы восходящего ветра второго

порядка. Схемы временной дискретизации были рассмотрены на различных временных этапах, как подробно описано ниже. Для связи давление–скорость был принят полунявный алгоритм уравнений, связанных с давлением и скоростью.

Коэффициенты недорелаксации использовались с алгоритмом SIMPLE для ускорения сходимости. Критерии сходимости были назначены путем установки всех остатков равными 10^{-4} для всех переменных на каждом временном шаге.

Вычислительная область имеет две различные зоны: стационарную зону и вращающуюся зону круглой формы (рисунок 3.12). Диаметр вращающейся зоны равен $1,25 D$, где D –диаметр ротора. Метод скользящей сетки был использован для решения уравнений между вращающейся сеткой и неподвижной сеткой (ANSYS Inc, 2010).

Стационарная зона имеет прямоугольную форму и имеет граничные условия скорость–вход и давление–выход соответственно выше и ниже турбины, в то время как боковые стороны области были определены как симметричные границы. Входная скорость задавалась при входном граничном условии в соответствии с требуемым значением числа Рейнольдса. Выходная граница имела постоянное давление нулевого калибра. Характеристики турбулентного потока на входе задаются с использованием коэффициента турбулентной вязкости и интенсивности турбулентности 5 и 0,1% соответственно. Частота вращения ротора турбины варьировалась так, чтобы охватить все ТСР при требуемом числе Рейнольдса.

Размерности вычислительной области должны быть исследованы, чтобы обеспечить независимое от области решение. В качестве переменной для сравнения был выбран коэффициент момента. Уравнения течения были решены для 10 полных циклов вращения турбины, чтобы обеспечить периодическое изменение коэффициента момента. Средний коэффициент момента вычислялся путем интегрирования расчетов только последних двух циклов.

Наиболее важным фактором метода конечных объемов является интегрирование управляющих уравнений по управляющим объемам, что дает набор дискретизированных уравнений. Первым шагом, который должен предшествовать дискретизации, является разделение всей вычислительной области на небольшие дискретные конечные управляющие объемы. В этой работе вычислительная область была разделена на контрольные объемы с помощью инструмента Gambit meshing tool (Fluent Incorporated, 2007). Рекомендуется увеличить количество ячеек в областях, где имеются большие градиенты переменных потока. Поэтому размер сетки был уточнен во вращающейся зоне и вблизи ковшей турбины. Уровень утонченности был исследован с помощью теста независимости сетки.

Качество сетки является важным параметром, который следует учитывать при создании сетки. Асимметрия ячеек и соотношение сторон ячеек – это метрические параметры, которые оценивают качество сетки. Асимметрия клеток–это мера относительной искажение элемента по сравнению с его идеальной формой (ортогональной). Если все углы прямоугольной ячейки

равны 90 градусам, то эта ячейка имеет нулевую асимметрию. Сильно перекошенные ячейки неприемлемы для процесса дискретизации, который предполагает, что ячейки являются относительно равноугольными или равносторонними (ANSYS Inc, 2010). В данном исследовании сетки были построены с максимальным перекосом, не превышающим 0,5, что является приемлемым (ANSYS Inc, 2010). Соотношение сторон ячеек определяется как отношение длины самого длинного края к самому короткому. Его значение равно единице для равностороннего треугольника или квадрата. Впоследствии сетка была сгенерирована с максимальным соотношением сторон, не превышающим 6,0.

Вычислительная область была дискретизирована с использованием структурированных (четырёхугольных) контрольных объемов, как показано на рис. 3.13. сетка была уточнена во вращающейся области по сравнению со стационарной областью.

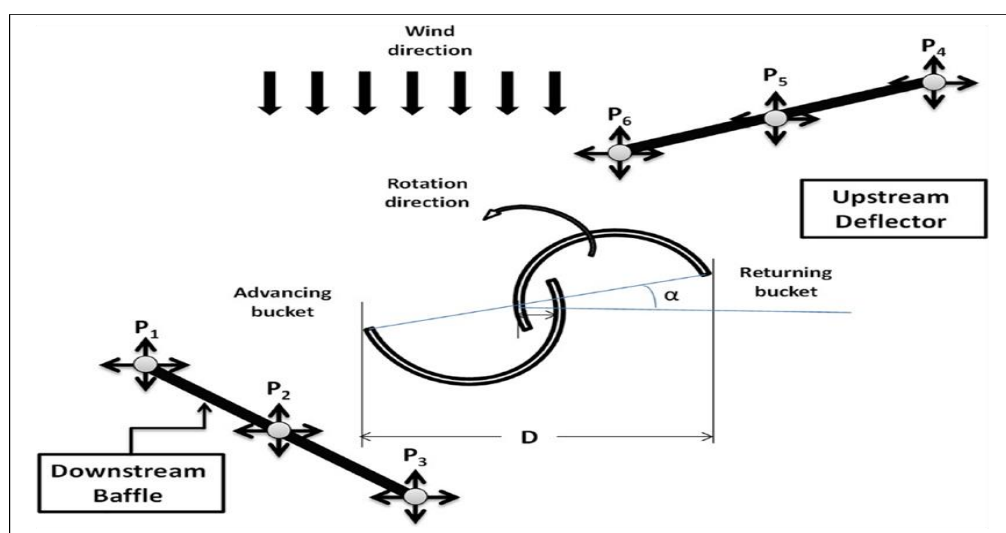


Рисунок 3.12 – Конструкция турбины Савониуса и дефлектора системы

В этом исследовании сообщается о результатах инновационного метода увеличения производительности турбины Савониуса. Разработанная система повышает эффективность преобразования энергии турбины Савониуса, что открывает больше возможностей для применения этой простой конструкции в ветроэнергетике. Пиковый коэффициент мощности турбины Савониуса можно удвоить, если установлены оптимизированный передний дефлектор и нижний дефлектор. Улучшенная производительность объясняется благоприятными эффектами, обеспечиваемыми дефлектором при защите возвратного ковша турбины от ветра против потока и сильного застоя давления, создающего крутящий момент, противодействующий вращению турбины. Благоприятный эффект также создается перегородкой ниже по потоку, расположенной близко к наступающему ковшу за счет ускорения потока на выпуклой стороне этого ковша. Ускоряющийся поток создает зону низкого давления на этой стороне,

которая увеличивает положительный крутящий момент, приводящий в движение ротор турбины. Чистый крутящий момент на турбине всегда становится положительным с высокими пиковыми значениями, что дает ротору более высокий средний коэффициент крутящего момента через цикл ротора. Коэффициенты крутящего момента и мощности турбины Савониуса с оптимизированным дефлектором вместо почти вдвое больше, чем у обычной турбины Савониуса. Это замечательное улучшение характеристик турбины перевешивает недостаток увеличения размера следа турбины из-за большой ширины дефлектора/дефлектора турбины.

Это преимущество очень полезно для установок с одной турбиной, в которых генерируемая мощность почти удваивается по сравнению с одной турбинной установкой.

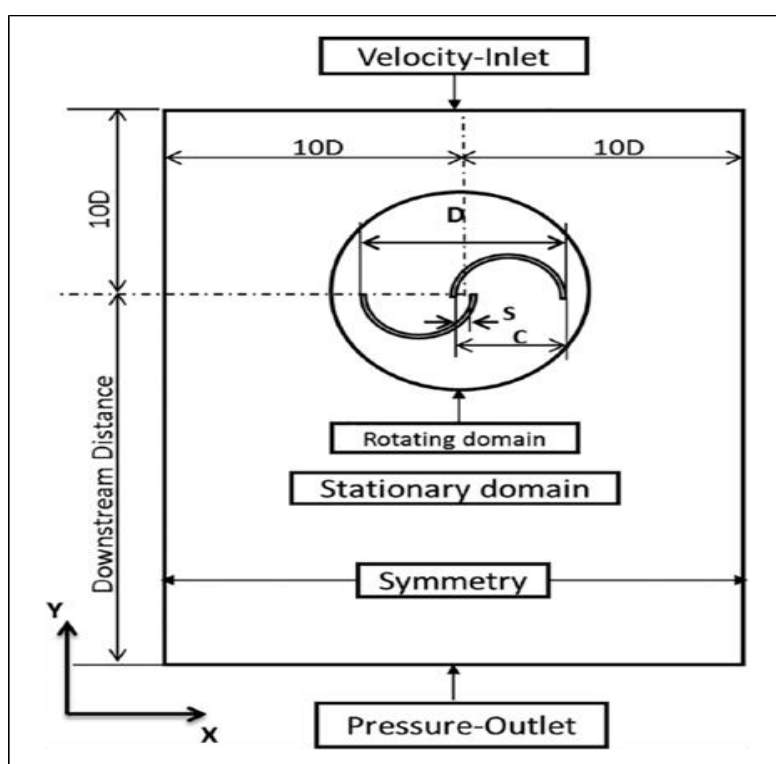


Рисунок 3.13 – Вычислительная область и граничные условия

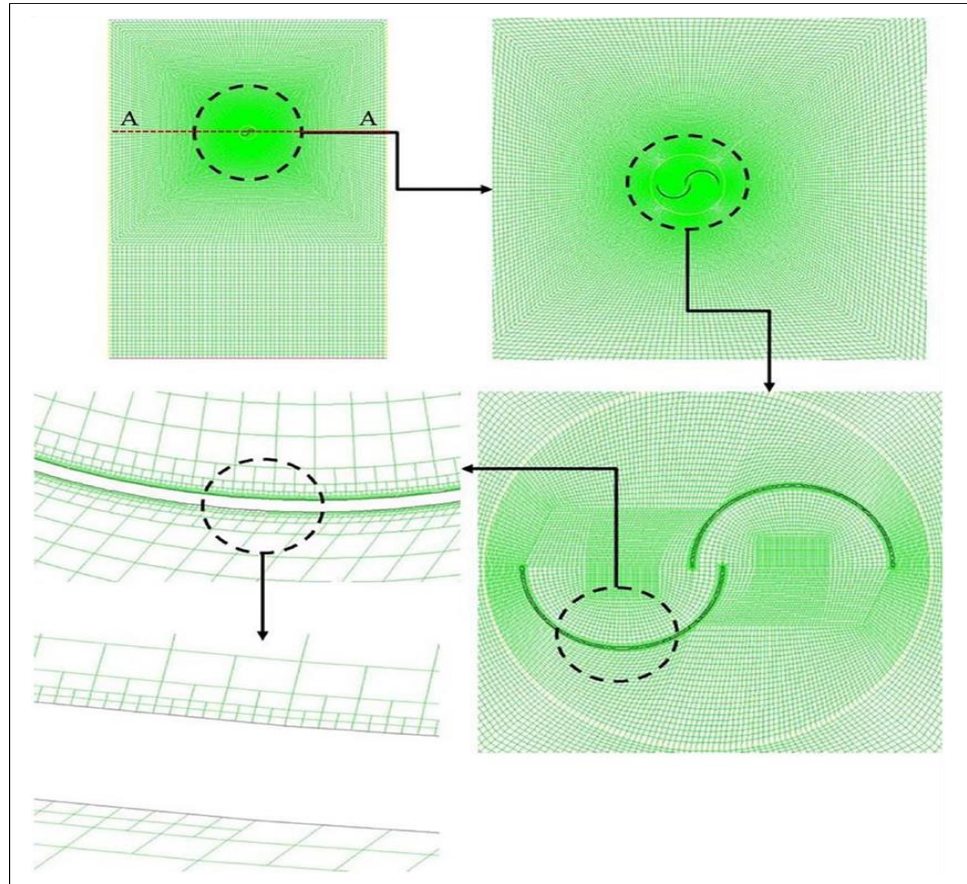


Рисунок 3.14 – Расчетная сетка для турбины Савониуса с системой экран/перегородка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа, посвященная разработке и исследованию конструкций ветровой установки с неподвижной вертикальной осью с целью совершенствования технология производства, содержит новые научно–обоснованные результаты исследований и технических разработок по созданию ветроколеса улучшенной модели, использование которых обеспечивает решение важной проблемы по экологической безопасности окружающей среды путем снижения воздействия токсичных компонентов в результате замены традиционных источников энергии.

Основные научные результаты, практические выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. Обоснована необходимость методологического подхода к разработке и созданию вертикально–осевых ветроэнергетических установок (ВО ВЭУ);
2. Исследована модель конструкции с ВО ВЭУ детально с целью получения максимальной простоты;
3. Оптимизировать конструкцию ВО ВЭУ по детально с целью совершенствования технологии производства;
4. Разработаны технологические процессы изготовления компонентов ветроэнергетической установки;
5. Разработаны 3 Д модели ветроустановок, основанные на классификации по назначению, способу использования ветрового потока, переменности площади ветроприемника;
6. Теоретически и экспериментально обосновано применение методики расчета решетчатых крыльев к расчету ветроустановки при динамическом синтезе ветроустановки с решетчатыми лопастями;
7. Разработан коэффициент использования энергии ветрового потока при малых скоростях ветра;
8. Разработана методика математического моделирования ветроколеса установки с учетом влияния изменения скорости ветра.

В целом, подводя итоги, можно дать следующую характеристику диссертационной работы:

– **Оценка полноты решения поставленных задач.** Поставленная цель работы достигнута, задачи исследований решены полностью, результаты исследований доведены до внедрения.

– **Разработка рекомендаций исходных данных по конкретному использованию результатов.** Результаты работы могут быть рекомендованы для использования конструкторам и проектировщикам, а также в учебном процессе университетов по инженерным и экологическим специальностям.

– **Оценка технико–экономической эффективности внедрения.** Предотвращение ущерба экологии региона от внедрения разработок по применению зеленой энергетики взамен традиционных источников энергии.

– **Оценка научного уровня выполненной работы в сравнении с лучшими достижениями в данной области.** Научные разработки и их новизна

в достаточной мере апробирована в публикациях различного уровня, в магистерских диссертациях и дипломных работах, что подтверждено соответствующими документами и Актами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 «О Программе развития электроэнергетики до 2030 года» http://www.magisterjournal.ru/number44_1.htm 10.12.18 г.
- 2 Национальная Программа развития ветроэнергетики в Республике Казахстан до 2015 года с перспективой до 2024 года // Проект Программы развития ООН и Правительства Казахстана «Казахстан — инициатива развития рынка ветроэнергетики». – Алматы–Астана, 2007. **Сылка на сайт, дата**
- 3 Efremenkov E.A., Efremenkova S.K., Dyssebeyev I.M. Determination of Geometric Parameter of Cycloidal Transmission from Contact Strength Condition for Design of Heavy Loading Mechanisms // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference on Mechanical Engineering and Modern Technologies. – Tomsk, 2019. – Vol. 795. – С.1–6.
- 4 Традиционная и нетрадиционная электроэнергетика <http://energomir.blogspot.ru/p/12.html>. 23.01.19.
- 5 Ветроэнергетика Казахстана: вчера, сегодня, завтра <https://eenergy.media/2019/06/17/vetroenergetika-kazahstana-vchera-segodnya-zavtra/> 06.02.19
- 6 Кешуов С.М., Гаитов Т.З. Повышение эффективности расхода электроэнергии на собственные нужды Капшагайской солнечной электростанции. – Алматы: Вестник ЕТУ, 2017. – №4. – С. 14–18.
- 7 Аскарлов Е.С. Как научиться изобретать. Руководство для начинающего изобретателя: учебное пособие. – Алматы: Фортуна Полиграф, 2019. – 151с.
- 8 Пат. предварительный РК №7917, Мачта ветровой энергетической Установки / Аскарлов Е.С. – Бюл. № 8 от 16.08.1999.
- 9 Пат. РК №7919. Ветроколесо / Аскарлов Е.С. – Бюл. № 10 от 15.10.2002.
- 10 Аскарлов Е.С. Ветроэнергетическая установка малой мощности. – Алматы: Новости науки Казахстана, 2001. – № 1. 32-35 с.
- 11 **Название материала** <http://www.awea.org> **Дата**
- 12 Кривцов В.С. Неисчерпаемая энергия – Харьков: ХАИ, 2003. – 919 с.
- 13 Абрамовский Е.Р., Городько С.В. Аэродинамика ветродвигателей: учебное пособие. – Днепропетровск: ДГУ, 1987. – 220 с.
- 14 Гоман О.Г., Карплюк В.И. Аэродинамическая оптимизация лопасти ветроэнергетической установки с горизонтальной осью вращения. Механика. – Днепропетровск, 1998. - Т1. –104 с.
- 15 Аскарлов Е.С. Малая ветроэнергетика – перспективы возрождения // Промышленность Казахстана. – 2006. – № 6. – С.16–18.
- 16 Васильев Ю.С., Хрисанов Н.И. Экология использования возобновляющихся энергоисточников. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1991. – 343с.
- 17 Буянов Е.Е., Каримуллин И.Г. Труды ЦАГИ. — М.: Издательский отдел ЦАГИ, 1976. – 214 с.

- 18 Ветроэнергетика /под ред. Д. де Рензо. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 274с.
- 19 Войцеховский Б.В. Микромодульная ветроэнергетика: проблемы и перспективы / Б.В. Войцеховский, Ф.Ф. Войцеховская // Вопросы изобретательства. – 1988. – №2. – С. 20–22.
- 20 Войцеховский Б.В. Микромодульная ветроэнергетика: созданы компактные и дешевые агрегаты / Б.В. Войцеховский, Ф.Ф. Войцеховская // Экономика и организация промышленного производства. – 1988. – №3. – С. 40–45.
- 21 Галич В.Ф. Ветроэлектростанции: результаты эксплуатации и перспективы развития // Промышленная энергетика. – 1993. – №4. – С. 48–52.
- 22 Гвазава Н.Г. Воздействие турбулентного потока воздуха на ветроэнергетическую установку / Н.Г. Гвазава, С.Л. Зубковский, В.М. Лятхер // Энергетика и транспорт. – 1990. – №2. – С. 116–124.
- 23 Гервас К.И. К расчету КПД клиноременных передач / К.И. Гервас, Б.А. Пронин // Вестник машиностроения. – 1967. – №3. – С. 27–30.
- 24 Голдстейн Г. Классическая механика. – М.: Наука, 1975. – 415 с.
- 25 Горлин С.М. Экспериментальная аэромеханика. – М.: Высшая школа. – 1970. – 423 с.
- 26 Детали машин: Атлас конструкций / под общ. ред. Д.Н. Решетова. – М.: Машиностроение. – 1992. – 296 с.
- 27 Дунаев П.Ф. Конструирование узлов и деталей машин / П.Ф. Дунаев, О.П. Леликов. – М.: Высшая школа. – 1998. – 447 с.
- 28 Автор, название материала, город.: Изд-во технические литературы УССР, 1981. – 218с.
- 29 Зубарев Д.В. Параметрическая настройка системы управления ветроэнергетической установки по результатам моделирования: дис. к.т.н. / Московский государственный технический университет. – Москва, 2006 - 177 с.
- 30 Иванов А.В. Автономная ветроэнергетическая установка с индукционным нагревателем: автореферат к.т.н. / Казанский государственный технический университет. – Казань, 2000. – 19с.
- 31 Иванов Н.В. Ветродвигатель с машущим ротором // Наука и жизнь. – 2001. – №1. – С. 140–141.
- 32 Ларин В. Ветроэнергетика Дании проблемы и перспективы // Энергия: экономика, техника, экология. – 2001. – №3. – С. 29–32.
- 33 Левитский Н.И. Теория механизмов и машин. – М.: Наука, 1979–576 с.
- 34 Лойцянский Л.Г. Курс теоретической механики: в 2-х т. / Л.Г. Лойцянский, А.И. Лурье. – М.: Наука, 1983. – 424 с.
- 35 Вульфсон И.И. Механика машин: учебное пособие для вузов / И.И. Вульфсон, М.Л. Ерихов, М.З. Коловский и др.; под ред. Г. А. Смирнова. – М.: Высшая школа. – 1996. – 511 с.
- 36 Мичкин А.И. Эквивалентные решетчатые крылья / А.И. Мичкин, В.А. Подобедов / Пробл. прикл. аэромех. – Харьков. –1988. – С. 127–132.

- 37 Морозов Д.А. Расчет мощности малогабаритной ветроэнергетической установки // Научный: потенциал современному АПК: матер. всерос. науч.–практич. конф. – Ижевск: ФГОУ ВПО Ижевская ГСХА, 2009. – С. 82–86.
- 38 Морозов Д.А. Функционально–структурная модель ветроэнергетических установок / Д.А. Морозов, А.Э. Пушкарев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2008. – № 1. – С. 34–38.
- 39 Морозов Д.А. Выбор и определение критериев подобия при проектировании экспериментальных ветроэнергетических установок малой мощности // Новые материалы и технологии: матер. всерос. науч.–технич. конф. – М.: Изд–во МАТИ, 2008. – С. 57.
- 40 Пат. РФ № 2202048, Карусельный ветродвигатель и лопасть карусельного ветродвигателя / Мозговой А.И. – Бюл. №4 от 10.04.2003.
- 41 Морозов Д.А. Динамика ветроэнергетической установки с решетчатыми лопастями // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. Специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения». – 2009. – С. 102–104.
- 42 Морозов Д.А. Ветроэнергетическая установка малой мощности // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2010. – № 6. – С. 20–21.
- 43 Морозов Д.А. Синтез структурной схемы и параметров ветроустановки малой мощности / Д.А. Морозов, А.Э. Пушкарев // Вестник Ижевского государственного технического университета. – 2010. – № 4. – С. 15–18.
- 44 Орлов П.И. Основы конструирования: в 3 кн. / под ред. П.Н. Учаева. – М.: Машиностроение, 1988. – Книга 1 125–136 с.
- 45 Панфилов А.А. Методика энергетических и прочностных расчетов ветроэлектрической установки: автореферат к.т.н. / Санкт–Петербургский государственный политехнический университет. – Санкт–Петербург, 2007. – 16 с.
- 46 Дюсебаев И.М., Аскарлов Е.С. Сравнения конструкции ветровой установки с вертикальной осью, характеристики и основные виды // Матер. междунар. науч.–практ. конф. «Сатпаевские чтения – 2019». – Алматы: КазНИТУ им К.И. Сатпаева, 2019. – С. 1213 ISBN 978–601–323–145–7.
- 47 Дюсебаев И.М. Состояние развития ветроэнергетических установок с вертикальной осью // XII Международная науч.–практическая конференция «Современные проблемы машиностроения». – Томск: ТПУ, 2019. – С.
- 48 Дюсебаев И.М., Аскарлов Е.С., Жанкельды А.Ж. Исследование направлений развития совершенствования конструкции ветровых установок с вертикальной осью вращения ветрового колеса // Вестник КазАТК. – 2020. – №1(112). – С. 241–247. ISSN 1609–1817.
- 49 Dyussebayev I.M., Efremenkova E.A., Efremenkova S. K. Determination of Geometric Parameter of Cycloidal Transmission from Contact Strength Condition for Design of Heavy Loading Mechanisms // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. – 2019. – Vol. 1. Pp. 1–6

- 50 Дюсебаев И.М., Аскараров Е.С., Жанкельды А.Ж. Разработка новой схемы крепления лопасти ротора Савониуса в ветровой установке с неподвижной вертикальной осью // Вестник КазАТК. – 2020. – №.1 232-238 с
- 51 Дюсебаев И.М. Состояние развития современных ветроэнергетических установок и вопросы динамики и прочности, связанные с ними // VIII Международная науч.–практическая конференция «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2020: CENTRAL ASIA». – Нур–Султан, 2020. – 18-22 С. ISSN 2664–2271.
- 52 Дюсебаев И.М. Анализ аэродинамических параметров вертикально осевых ветроустановок малой мощности // Матер. международная науч.–практическая конференция «Сатпаевские чтения 2020». – Алматы: КазНИТУ имени Сатпаева, 2020. – 744 с. ISBN 978–601–323–209–6, И С21.
- 53 Дюсебаев И.М. Проектирование, моделирование и совершенствование вертикально–осевых ветроустановок малой мощности типа Савониус // INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL «GLOBAL SCIENCE AND INNOVATIONS 2021: CENTRAL ASIA». – Нур–Султан, 2021. – 28-32 с.
- 54 Быков Е.Н. Пат. РФ № 2006145494/06(049682). Обоснование параметров ветроэнергетической установки со спиральными лопастями на основе экспериментальных исследований 2007 г.
- 55 Куашнинг Ф. Системы возобновляемых источников энергии. Технология. Расчеты. Моделирование: учебник. – Астана: Фолиант, 2013- 432 с.
- 56 Martin O.L. Aerodynamics of Wind Turbines / Martin O.L., Hansen L.– London: Earthscan, 2008. – 242 p.
- 57 Шевцов А.В. – Исследование возможности применения ветровых электроустановок для электроснабжения малых хозяйств в Алматинской области // Матер. междун. науч.–практ. конфер. «Инновационные технологии в инженерии». – Алматы: ЕТУ, 2021. – 165 с.
- 58 Шевцов А.В. Критерии выбора ветроустановок для электроснабжения районов алматинской области // Матер. междун. науч.–практ. конфер., посвященной 30–летию независимости РК «Современный Казахстан: реформы образования и науки». – Алматы: ЕТУ, 2021. – С.249–251.
- 59 Дюсебаев И.М.: Название диссертации: дисс. ... магистра. – Алматы: КазНИТУ, 2017. – 80с.
- 60 Морозов Д.А. Синтез ветроустановки малой мощности с вертикальной осью вращения: дисс. ... к.т.н. – Ижевск: ИГТУ, 2010. – 142 с.
- 61 Буктукова Н.С. Ветроэлектростанция Буктукова - 5 WO 2012144879, F03D 3/04 16.04.12
- 62 Пат. 19KZ(13)A4(11)30464 ВЕТРОУСТАНОВКА / Журинов М.Ж., Надиров Н.К., Солодов Е.В. 17.03.2014
- 63 Пат. РФ №2015409 F03D 5/00, F03D. **Название патента** / Мильченко П.С., 1994 **остальные данные**
- 64 Пат. РФ №2054577. Ветроэнергетическая установка / Буктуков Н.С., Озеров Г.И. **остальные данные**

- 65 Пат. РФ №2045682. Ротор ветродвигателя / Буктуков Н.С., Озеров Г.И. **не полные данные**
- 66 Пат. РФ 2368800, F03D 3/06, Литвиненко А.М. Роторный вертикальный ветродвигатель. 27.09.2009. **не полные данные**
- 67 Пат. Tanate Chaichanaa*, Sumpun Chaitepb из Университета Чиангмай, Таиланд
- 68 Nau Erich: Windkraftanlagen. – Berlin: Springer, 1996. – 665 s.
- 69 Херинг Э., Мартин Р., Шторер М. Физика для инженеров. – Берлин: Springer Verlag, 2007/ing.
- 70 Трoен Иб., Петерсен Э.Л. Ветровой атлас Европы. – Роскилле: Национальная лаборатория, 1989/ing.
- 71 Молли Й.–Р. Энергия ветра. – Карлсруэ: C.F.Muller, 1990. /ing.
- 72 Тулегулов А.Д., Ергалиев Д.С., Бажаев Н.А., Кермбаева Т.Б., Акишев К.М. Методы повышения автоматизации технологических процессов в горнодобывающей промышленности // Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. серия геологических и технических наук. – 2022. – Т. 451. – С. 115–125.
- 73 Турбины на крыше <http://www.youtube.com/watch?v=WZ5kX5Yw4eY>
14.03.21
- 74 Кривцов В.С., Олейников А.М., Яковлев А.И. Ветроэнергетические генераторы // В учебнике: Неиссякаемая энергия. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2003. – Кн.1. – 400 с.
- 75 Яковлев А.И., Кривцов В.С., Олейников А.М. Неиссякаемая энергия ветра // в учебнике: Неиссякаемая энергия. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет «ХАИ», 2004. – Кн. 2. – 519 с.
- 76 Харитонов В.П. Автономные ветроэнергетические установки. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
- 77 Баймиррор М.Э. Математическое моделирование ветроэнергетики // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 4. – **С.?**
- 78 Безруких П.П. Энергия ветра: справочно–методическое пособие. – М.: ИД "Энергия", 2010. – 315 с.
- 79 Никитенко Г.В. Ветроэнергетические установки в системах автономного электроснабжения. – Ставрополь: АГРУС. – 2008. – 152 с.
- 80 Каргиев В.М., Мартиросов С.Н. Руководство по использованию ветрогенераторов малой и средней мощности в ветроэнергетике. – М., 2001.– 62 с.
- 81 Зысин Л.В., Сергеев В.В. Возобновляемые источники энергии // Методическое пособие: Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – СПб.: Изд–во Политехн. ун–та, 2008. – Ч. 1. – 192 с.
- 82 Dyussebayev I.M. Methodological basis for the application of wind generators in geology // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. series of geology and technical sciences. – 2022. – № 451. – P.115–125.

83 Шишкин Н.Д., Ильин Р.А. Анализ аэродинамических параметров и энергетической эффективности ветрогенераторов с вертикальной осью // Вестник АГТУ. – 2018. – №1. – С.76–84. ISSN 1812–9498, doi: 10.24143/1812–9498–2018–1–76–84.

84 Электроснабжение озонаторного комплекса для очистки и обеззараживания воды Большого Алматинского озера на базе альтернативных источников энергии: инициативный отчет о НИР (промежуточный) / организация: руководитель: город, год. –32 с., №ГР 0121РКИ0096. – Инв. № 0222РКИ0115.

85 Электроснабжение озонаторного комплекса для очистки и обеззараживания воды Большого Алматинского озера на базе альтернативных источников энергии: отчет о НИР (заключительный) / организация: руководитель: город, год. –32 с., № ГР 0121РКИ0096. – Инв.№

86 Miltenovic V., Velimirovic M., Banic M. Increase of energy efficiency of windturbines by application of CVT // International Conference on Gears / Technical university of Munich. VDI–Berichte 2108.2. Garching. Germany. – 2010. – Vol. 10(2–4). – P. 1095 – 1106.

87 Ivanov K.S. Discovery of the Force Adaptation Effect // Proceedings of the 11th World Congress in Mechanism and Machine Science. – Tianjin, 2004. – Vol. 2. – P. 581 – 585.

88 Ivanov K.S., Knol O.A., Shingissov B.T. Mechanical Adaptive Drive of Wind Turbine Generator // Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. IN–TECH 2013 / World Association of Innovative Technologies. – Budapest, 2013. – P. 245–248.

89 Иванов К.С. Теоретические основы механической адаптации // IV международная научная конференция «Актуальные проблемы механики и машиностроения». – Алматы: КазНТУ им. К.И. Сатпаева, 2014. – Т.2. – Стр. 68 – 75.

90 Carbone G., Mangialardi L., Bonsen B., Tursi C. and Veenhuizen P.A. CVT dynamics: Theory and Experiment // Mechanism and Machine Theory. – 2007. – № 42. – P. 409–428.

91 Coyle E. and Byrne L. Internal Spur and Pinion Gear Drive: Colloquium on New Developments in Electric Vehicles for Disabled Persons. – Dublin, 1995. – Vol. 6. – P. 1–4.

92 Patent of USA 4,932,928, Cl. F16H 47/08, U.S. Cl. 475/51; 475/47 Shiftless, continuously–aligning transmission / Crockett J. S. – 1990.

93 Cuifang Y. and Lu L. The Design of the 3d Model of Straight Bevel Gear // IEEE International Conference on New Technology of Agricultural Engineering (ICAE). – Zibo, 2011. – P 194–196.

94 Ivanov K., Balbayev G., Shingissov B. and Joompha W. Stepless Variable Transfer Designing // Rajamangala University of Technology Taiwan–ok Research Journal. – Bangkok. – 2013. – Vol. 6, No. 2. – P. 39–44. (Impact–factor 0,375).

95 Ivanov K., Balbayev G., Shingissov B. and Joompha W. Adaptive Drive of Wind Turbine Generator // Rajamangala University of Technology Taiwan–ok

Research Journal. – Bangkok. – 2013. – Vol. 6, No. 2. – PP 44–48. (Impact-factor 0,375).

96 Ivanov K.S., Knol O.A., Shingissov B.T. Mechanical Adaptive Drive of Wind Turbine Generator // Proceedings of International Conference on Innovative Technologies. IN-TECH 2013 / World Association of Innovative Technologies. – Budapest, 2013. – P 245–248.

97 Шингисов Б.Т. Обоснование кинематических и конструктивных параметров электропривода генератора ветроустановки: дисс. ... доктора PhD. – Алматы, 2015. – 120 с.

98 Горелов Д.Н. Аэродинамика ветроколес с вертикальной осью вращения: моногр. – Омск: Полиграф. центр КАН, 2012. – 68 с.

99 Шишкин Н.Д., Ильин Р.А. Анализ направлений повышения конкурентоспособности конструкций энергоэффективных ВЭУ различных типов // Вестник АГТУ. – Астрахань, 2017. – № 2 (64). – С. 42–50.

100 Горелов Д.Н. Энергетические характеристики ротора Дарье (обзор) // Теплофизика и аэромеханика. – 2010. – Т.17, № 3. – С. 325–333.

101 Горелов Д.Н. Проблемы аэродинамики ветроколеса Дарье // Теплофизика и аэромеханика. – 2003. – Т.10, № 1. – С. 47–51.

102 Мартьянов А.С. Исследование алгоритмов управления и разработка контроллера ВЭУ с вертикальной осью вращения: дисс. ... к.т.н.: 05.09.03 / Южно-Уральский государственный университет. – Челябинск, 2016. – 174 с.

103 Бобков В.Г., Бондарев А.Е., Жуков В.Т., Мануковский К.В., Новикова Н.Д., Феодоритова О.Б. Численное исследование динамики вертикально-осевых ветротурбин // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша (РАН). – 2019. – №119. – С.36–38.