

На правах рукописи



АЛЕКСЕЕНКО ВИТАЛИЙ АЛЕКСЕЕВИЧ

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАЗРАБОТКИ
И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ АВТОНОМНЫХ ВЕРТИКАЛЬНО-
ОСЕВЫХ РОТОРНЫХ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
ДЛЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ**

05.14.08 – Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Ставрополь – 2021

Работа выполнена на кафедре «Машины и технологии АПК»
ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ

- Научный консультант: **Гусаров Валентин Александрович**
доктор технических наук, главный научный сотрудник
лаборатории «Автоматизированный электропривод и
энергетическое оборудование на основе возобновляе-
мых источников энергии» ФГБНУ ФНАЦ ВИМ
- Официальные оппоненты: **Соломин Евгений Викторович**
доктор технических наук, доцент, ФГАОУ ВО «Южно-
Уральский ГУ», профессор кафедры «Электрические
станции, сети и системы электроснабжения»
Велькин Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«УрФУ имени первого Президента России Б.Н.
Ельцина», профессор кафедры «Атомных станций и
возобновляемых источников энергии»
Бекиров Эскендер Алимович
доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО
«Крымский Федеральный университет имени
В.И. Вернадского», заведующий кафедры «Электро-
энергетики и электротехники»
- Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образова-
тельное учреждение высшего образования «Южно-
Уральский государственный аграрный университет»
(ФГБОУ ВО Южно-Уральский ГАУ)

Защита состоится «25» января 2022 года в 10 часов на заседании диссертаци-
онного совета Д 006.110.02 при ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный
центр ВИМ» по адресу: 109456, РФ, г. Москва, 1-й Вешняковский проезд, дом 2,
строение 1, ауд. 310.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБНУ ФНАЦ ВИМ и на
сайте <http://www.vim.ru/> в разделе «Диссертационные советы».

Автореферат размещен на сайте Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации <http://vak.minobrnauki.gov.ru> «8» октября 2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью,
просим направлять ученому секретарю диссертационного совета Д 006.110.02
Д. А. Будникову по адресу: 109428, РФ, г. Москва, 1-й Институтский проезд, дом 5.
E-mail: d006.110.02@mail.ru

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук



Дмитрий Александрович
Будников

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время в России насчитывается более 300 тысяч фермерских хозяйств различного направления, и их количество будет постоянно расти в связи с принятием программ развития «Государственные программы развития сельского хозяйства» и «Дальневосточный гектар» для освоения земель сельскохозяйственного назначения. До 40–45 % фермерских хозяйств расположены вдали от центральных систем энергоснабжения. В то же время для их эффективного функционирования необходима не только механизация и электрификация практически всех технологических процессов, но и обеспечение соответствующих современному уровню жизни бытовых условий обслуживающего персонала.

Если для механизации полевых работ в сельском хозяйстве традиционно используется техника с автономными источниками энергии, то электрификация основных технологических процессов осуществляется, как правило, на основе мини-электростанций, эксплуатация которых обуславливает дополнительный расход постоянно растущего в цене углеводородного топлива и соответственно повышение себестоимости производства сельскохозяйственной продукции, что в итоге сдерживает реализацию государственной программы импортозамещения на продовольственном рынке.

Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является использование энергии ветра как возобновляемого источника энергоснабжения тех сельскохозяйственных производителей, которые осуществляют свою деятельность в районах, удаленных от крупных сетевых поставщиков электроэнергии.

Объект исследования. Вертикально-осевая роторная ветроэнергетическая установка (ВО РВЭУ).

Предмет исследования. Принципы функционирования, обоснование методик расчетов оптимальных параметров основных рабочих органов и проектирование ВО РВЭУ для объектов сельскохозяйственного производства.

Степень разработанности темы исследований. Значительный вклад в развитие общей ветроэнергетики и совершенствование ветроэнергетических систем автономного электроснабжения внесли такие ученые, как Ж. И. Алферов,

Р. А. Амерханов, П. И. Безруких, П. П. Безруких, Э. А. Бекиров, Н. И. Богатырев, В. А. Бутузов, Ю. С. Васильев, В. И. Велькин, В. И. Виссарионов, С. М. Воронин, О. В. Григоращ, С. В. Грибков, В. А. Гусаров, В. В. Елистратов, И. М. Кирпичникова, А. А. Ковалев, Е. В. Коноплев, А. С. Креймер, Г. В. Никитенко, Л. А. Саплин, А. А. Соловьев, Е. В. Соломин, Д. С. Стребков, И. С. Селезнев, О. А. Поваров, О. С. Попель, А. И. Трофимов, Б. В. Тарнижевский, М. А. Таранов, Е. М. Фатеев, В. А. Халюткин, В. А. Харитонов, С. К. Шерьязов, И. Я. Шефтер и другие.

В последнее время вопросами разработки конструкций ВО РВЭУ наиболее успешно занимались С. А. Болотов, С. М. Воронин, С.С. Доржиев, В. А. Гусаров, А. П. Жогалев, Е. В. Соломин, В. А. Халюткин и другие.

Тем не менее следует отметить, что большинство известных в настоящее время конструкций ветроэнергетических установок, в том числе и вертикально-осевых роторных, характеризуются невысоким КПД и недостаточно надежны в эксплуатации, что объективно связано с неполным объёмом как теоретических положений, так и экспериментальных данных, позволяющих совершенствовать существующие и разрабатывать новые технологические схемы использования энергии ветра.

Таким образом, научные исследования, направленные на дальнейшую разработку современных подходов в изучении общих свойств и принципов функционирования вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок и условий их применения для энергообеспечения технологических процессов в сельскохозяйственном производстве, удалённом на значительные расстояния от системы центрального энергоснабжения, являются актуальными и отвечающими современным потребностям реального сектора экономики нашей страны.

Цель исследования. Развитие теоретических расчетов оптимальных параметров основных рабочих органов и принципов проектирования вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок на основе изучения закономерностей движения воздушного потока и практическая реализация технологической схемы их использования в качестве автономного источника для удаленных сельхозпредприятий.

Задачи исследований:

1. Выполнить аналитический обзор состояния энергоснабжения удаленных сельскохозяйственных производителей и обосновать целесообразность использования в качестве альтернативного источника энергии вертикально-осевые роторные ветроэнергетические установки.

2. Провести теоретические исследования конструкции вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок для эффективного использования энергии ветра.

3. Провести лабораторные испытания моделей ротора ветродвигателя и кольцевого концентратора воздушного потока для проверки полученных теоретических результатов.

4. Разработать технические критерии конструкции вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки, а также технические средства, повышающие эффективность ее работы и расширяющие пределы использования энергии ветра.

5. Разработать методику исследований и провести натурные испытания вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки с определением технических характеристик ветродвигателя в режиме реального времени.

6. Разработать и испытать кольцевой концентратор воздушного потока двухроторной ветроэнергетической установки для увеличения ее мощности в регионах со среднегодовой скоростью ветра от 4 м/с.

7. Выполнить технико-экономический расчет эффективности применения вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки с кольцевым концентратором воздушного потока в качестве автономного источника энергоснабжения удаленного сельскохозяйственного производства с учетом разделения механической энергии вращающегося вала на два потока для выработки электроэнергии и для привода рабочих механизмов.

Научную новизну исследований составляют:

– системный научно-методический подход к разработке вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки с применением структурных моделей и аналитических методов расчета, устанавливающих функциональные связи между конструктивными параметрами и энергетическими показателями;

– способ определения энергетических характеристик роторных ветродвигателей, опирающийся на теорию лобового воздействия ветрового потока на лопасти и характер взаимодействия воздушного потока с рабочими органами ротора при различных его положениях;

– способ соединения вала ротора ветродвигателя с рабочим механизмом, позволяющий, постепенно наращивая свой крутящий момент вхолостую, а затем преодолевая сопротивление пружины, плавно начинать вращение рабочих механизмов до полной нагрузки и использования энергии ветра от 2 м/с, защищенный патентом;

– способ параллельной и последовательно-параллельной зарядки аккумуляторных батарей, позволяющий регулировать напряжение электрогенератора с учетом малых и больших диапазонов скоростей ветрового потока, защищен двумя патентами;

– способ измерения мощностных характеристик ветродвигателя при разных ветровых нагрузках, позволяющий плавно загрузить вал ветродвигателя и получить полную информацию об энергетических параметрах в режиме реального времени, защищенный патентом;

– разработанные требования к проектированию конструкции вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки и её опорной фермы с кольцевым концентратором воздушного потока, способствующие повышению ее мощности при среднегодовых скоростях ветра от 4,0 до 5,0 м/с, защищенные патентом;

– номограмма для определения мощностных и эксплуатационных параметров роторного ветродвигателя с кольцевым концентратором воздушного потока, позволяющая рационально подобрать технологические машины и оборудование для автономного энергоснабжения сельскохозяйственных товаропроизводителей.

Теоретическую и практическую значимость работы представляют:

– рассмотренный научно-методический подход к разработке вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок позволяет расширить функциональные связи между конструктивными параметрами и энергетическими показателями;

– предложенный способ определения энергетических характеристик роторных ветродвигателей, позволяет учитывать характер взаимодействия воздушного потока с его рабочими органами;

– разработанные технические средства, позволяющие повысить эффективность работы вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки за счет расширения пределов использования энергии ветра (пат. № 2639930; пат. № 2649908 и № 2705796);

– предложенный измерительный комплекс, позволяет получить полную информацию об энергетических параметрах ветродвигателя в режиме реального времени (пат. № 2585482);

– разработанные технические критерии к проектированию конструкции вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок, способствуют увеличению годовой выработки при среднегодовых скоростях ветра от 4,0 до 5,0 м/с, (пат. № 2572356);

– полученная номограмма мощностных и эксплуатационных параметров роторного ветродвигателя с кольцевым концентратором воздушного потока, позволяет рационально использовать технологические машины и оборудование для автономных сельскохозяйственных потребителей.

Методология и методы исследования. В качестве методологической основы использовался системный анализ, позволяющий выявить прямые и обратные связи исследуемого объекта с взаимодействующими факторами с непрямолинейной зависимостью, оказывающими существенное влияние на энергетические параметры разрабатываемого объекта. В работе исходя из постановки решаемых задач и с учетом особенностей исследуемого объекта при получении основных результатов использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследований. Экспериментальные исследования выполнены в лабораторных и производственных условиях на моделях и опытном действующем образце с использованием соответствующих методик планирования и методов моделирования, в том числе и самопишущих, приборов измерения энергетических величин, а также устройств и приспособлений, изготовленных автором.

Результаты исследований обрабатывались с использованием программных систем, пакетов и сред с проверкой достоверности теоретических положений.

Экономическая оценка эффективности использования ВО РВЭУ проведена в соответствии со стандартными методами определения экономической эффективности применения НИР и ОКР в сельском хозяйстве.

Положения, выносимые на защиту.

1. Предложенный метод по разработке вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок, позволяет создавать новые конструкции, исследовать энергетические характеристики экспериментальных вертикально-осевых роторных ветродвигателей, показывающие ряд преимуществ по сравнению с существующими аналогами.

2. Для определения конструктивных параметров ветродвигателя необходимо учитывать распределение потока воздуха на рабочие органы, их взаимное расположение на ветродвигателе и энергетический потенциал мест эксплуатации.

3. Разработанные технические критерии по проектированию конструкции вертикально-осевых роторных ветродвигателей позволяют повысить их эксплуатационные характеристики.

4. Применение пружинной муфты и электромагнитного реле для переключения аккумуляторных батарей с параллельной на последовательно-параллельную зарядку позволяют повысить эффективность работы вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки за счет расширения пределов использования энергии ветра.

5. Для повышения мощности вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки в районах со среднегодовыми скоростями ветра от 4 м/с целесообразно применять разработанный кольцевой концентратор воздушного потока.

6. Использование сочетания базового источника энергии гарантированного энергоснабжения, в качестве которого применяется традиционный топливный генератор, и преобразователей энергии ветра в механическую энергию вращающегося вала, разделенную на два потока, является эффективным средством решения проблемы энергоснабжения удаленных сельскохозяйственных производителей.

7. Технико-экономические показатели эффективности функционирования вертикально-осевой ветроэнергетической установки для энергоснабжения удален-

ных сельскохозяйственных производителей позволяют проводить оценку технической и экономической целесообразности с учетом прогнозирования конструктивных, энергетических и стоимостных параметров.

Степень достоверности полученных результатов. Достоверность исследований и полученные результаты подтверждены высокой степенью сходимости теоретических и экспериментальных параметрических данных, в том числе с использованием прикладных компьютерных программ, положительными результатами многолетних испытаний, проведенных на полигоне нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Ставропольского ГАУ, г. Ставрополь, а также производственными испытаниями вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки в составе с саморегулирующим гидродинамическим нагревателем, показавшими рациональность нагрева воды для нужд потребителей.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований доложены и обсуждены на следующих научно-технических конференциях: Международной научно-практической конференции в рамках Международной агропромышленной выставки «Агроуниверсал», 2012–2020 гг., г. Ставрополь; ежегодной научно-практической конференции электроэнергетического факультета Ставропольского ГАУ «Методы и технические средства повышения эффективности использования электрооборудования в промышленности и сельском хозяйстве», 2013–2019 гг., г. Ставрополь; I Международной научно-практической конференции «Цифровые технологии в сельском хозяйстве», 2018 г., г. Ставрополь; вебинаре «Как развивать ВИЭ в России без поддержки государства», 2019 г., г. Москва; Международной научной конференции «Инженерное обеспечение развития сельских районов», 2020–2021 гг., г. Елгава, Латвия; Международной научно-практической конференции «Современные тенденции машиностроения и техносферной безопасности», 2020 г., г. Ростов-на-Дону, ДГТУ; Всероссийской научно-технической онлайн-видеоконференции «Электрооборудование, электротехнологии и возобновляемые источники энергии в АПК», 2020 г., г. Москва, ФГБНУ ФНАЦ ВИМ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 7 разделов, основных результатов и выводов, списка литературы, включающего 298 источников,

из них 23 на иностранном языке, и приложений. Основная часть диссертации содержит 377 страниц машинописного текста, в том числе – 99 рисунков и 30 таблиц.

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 39 научных работах, в том числе 14 в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 3 – в международных системах цитирования (*Scopus*), 6 патентах на изобретение и 1 монографии. Объем публикаций 22,29 п. л., из которых доля авторского вклада – 8,39 п. л.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, изложены цель и задачи исследований, приведены сведения о научной новизне, практической значимости, положения, выносимые на защиту, а также апробация работы.

В разделе 1 «Анализ использования ветроэнергетических установок и тенденции развития ветроэнергетики для децентрализованного сектора энергопотребителей» проанализированы размеры и виды хозяйственной деятельности удалённых от системы энергоснабжения фермерских хозяйств сельскохозяйственной направленности.

С учетом освоения земель на Дальнем Востоке порядка 90 тыс. га, 60–70 % выделенных земель, а значит, и вновь организуемых фермерских хозяйств не попадают в зону централизованного или автономного электроснабжения. Практически на всей рассматриваемой территории преобладают ветра со среднегодовой скоростью 3...5 м/с, которые также характерны для Ставрополья, Каргалинских и Калмыцких степей, испытывающих дефицит централизованного энергоснабжения. Энергетические преобразователи ветра должны обеспечить децентрализованных энергопотребителей, расположенных автономно в природном ландшафте, с использованием в сфере автономного энергопотребления установок мощностью 2...5 кВт.

Проведен обзор энергетических средств, применяемых в удалённых хозяйствах, выявлена проблема энергоснабжения и предложен способ её решения за счёт ВО РВЭУ с лопастями, представляющими часть цилиндрической поверхности, обладающими многими положительными характеристиками, которые свойственны им, а именно: малая стартовая скорость ветра, равная 2,0 м/с, при которой ротор начинает вращение; независимость работы от направления ветрового потока, что позволяет более полно использовать его энергию; все механизмы, присоединённые

к вертикальному валу, находятся внизу и доступны для технического обслуживания и ремонта, их мощность ограничивается только потребностью производства; нет ограничения по расположению от жилища; шумовая нагрузка минимальна и не беспокоит людей; роторный ветродвигатель сам запускается; абсолютно безопасен для птиц и пчел, поскольку его контур хорошо просматривается; работает в любую погоду, центробежно очищается от снега и льда; обладает устойчивостью к сильному ветру, вплоть до ураганного, и при этом использует его энергию; высокая приспособленность для индивидуального применения в хозяйствах различного направления; возможность использования механической энергии вертикально вращающегося вала как для выработки электроэнергии, так и для привода различных механизмов напрямую, что значительно сокращает потребность в АКБ; роторная установка хорошо вписывается в ландшафт.

Для реализации вышеизложенных преимуществ вертикально-осевых роторных ветродвигателей с целью разработки надежной в работе ветроустановки в условиях отсутствия как теоретических основ расчета, так и практических рекомендаций по изготовлению, сдерживающих ее применение в хозяйственной деятельности удаленных энергопотребителей, создалась явная необходимость в проведении аналитических исследований, лабораторной проверки и натурных испытаний экспериментального образца с целью рекомендации его для внедрения в децентрализованных хозяйствах в районах РФ со среднегодовыми скоростями ветра от 4 м/с.

В разделе 2 «Научно-методические основы разработки роторных ветроэнергетических установок» исходя из поставленных задач рассмотрены научно-обоснованные подходы к разработке ВО РВЭУ, структура которой с учетом положений системного подхода представлена на рисунке 1.

При отсутствии как обобщённых, так и фрагментарных теоретических выкладок по аэродинамике вертикально-осевого роторного ветродвигателя, у которого лопасти представляют собой часть цилиндрической поверхности, была определена сила ветрового потока на одну лопасть в нескольких положениях, которые она занимает при вращении вокруг оси, и проходящей по её внутренней кромке через каждые 30° от 0° до 360° .

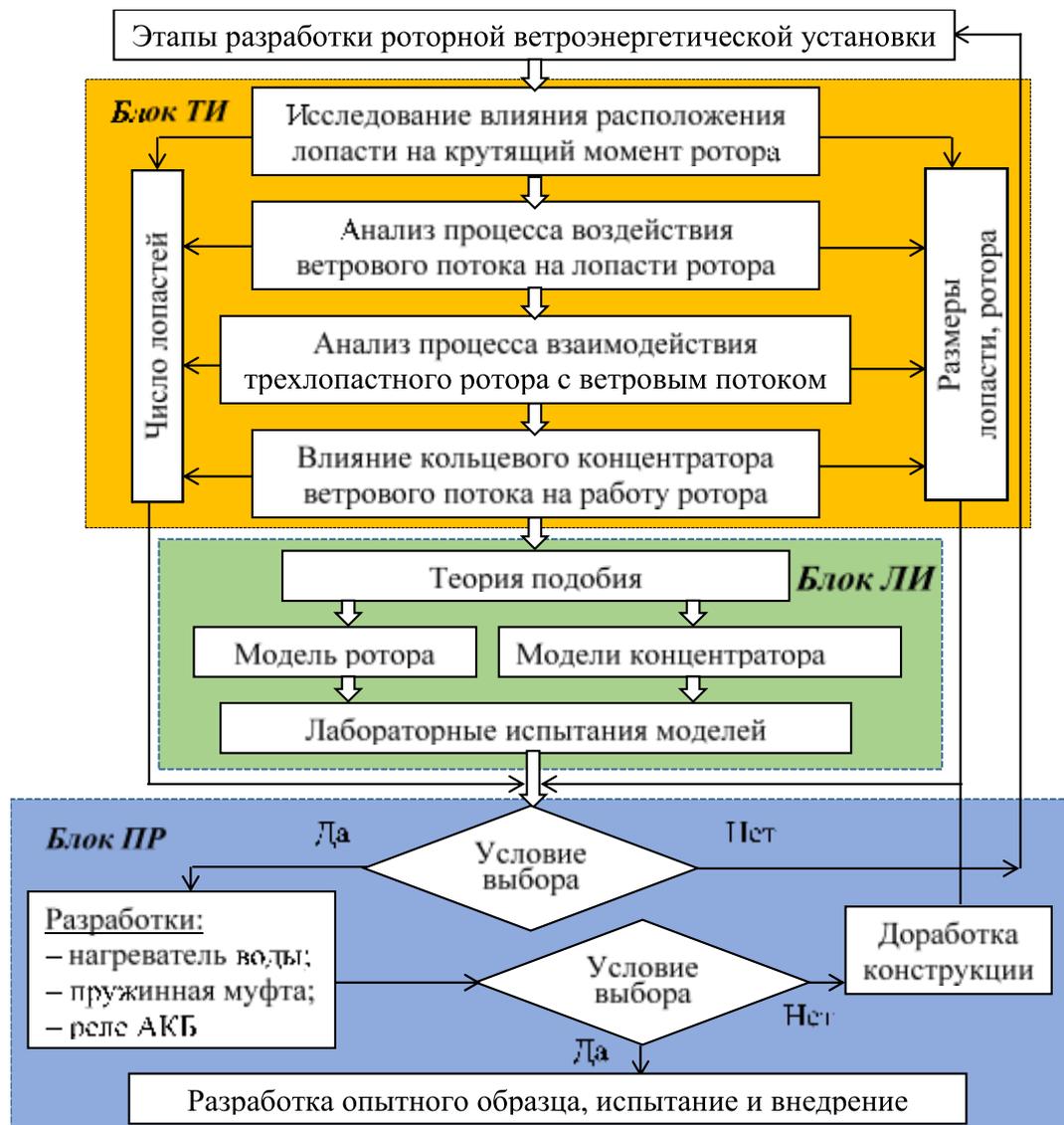


Рисунок 1 – Структурная схема научно-методического подхода разработки ВО РВЭУ

При исследовании была взята площадь миделевого сечения одной лопасти в зависимости от её угла поворота и за радиус вращения-хорда сегмента лопасти и высота лопасти, равные по 1 м. При повороте лопасти будут изменяться длина проекций хорды и высоты сегмента. В таком случае расчет проводился графо-аналитическим способом с учетом масштаба этих величин, взятых из чертежа (рисунок 2).

Сила P , Н, от давления ветрового потока определяется по формуле

$$P = 0,5\rho Fv_0^2C_x, \quad (1)$$

где ρ – плотность воздуха, равная 1,225 кг/м³;

F – площадь поверхности проекции лопасти, м²;

v_0 – расчетная скорость ветрового потока, равная 9 м/с;

C_x – коэффициент сопротивления площади проекции лопасти в зависимости от геометрической формы, выбираем по рекомендациям справочной литературы.

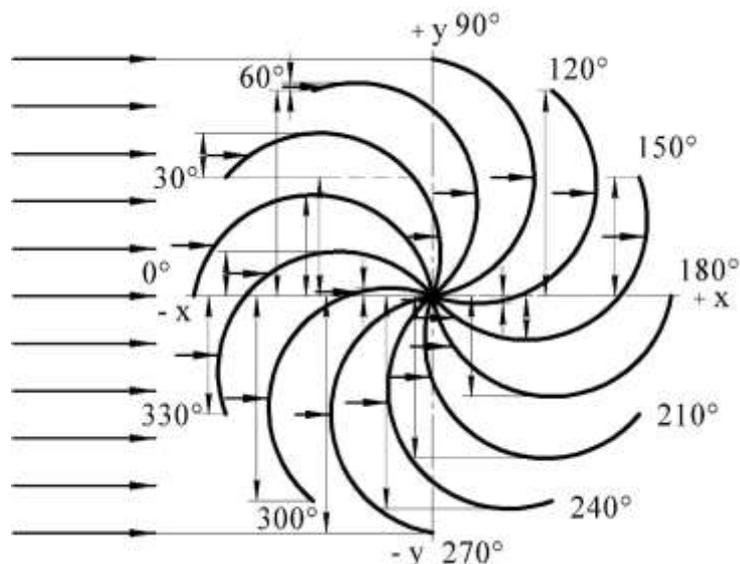


Рисунок 2 – Фиксированные положения лопасти при её повороте на угол от 0° до 360° через каждые 30°

Полученные графо-аналитическим расчетом величины сил, воздействующих на лопасть, позволили получить представление о крутящих моментах, возникающих под их воздействием с учетом их положительной или отрицательной величины во всех положениях лопасти, которые сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Суммарный крутящий момент $M_{кр. сум}$, Н·м, создаваемый лопастью в зависимости от угла поворота

Угол поворота γ , град.	Вогнутая поверхность лопасти			Выпуклая поверхность лопасти			Суммарный момент $M_{кр. сум}$, Н·м
	Сила P , Н	Плечо м	Момент $M_{кр}$, Н·м	Сила P , Н	Плечо м	Момент $M_{кр}$, Н·м	
0	0	0	0	-5,89	0,2	-1,18	-1,18
30	+31,91	0,26	+8,30	-0,95	0,56	-0,53	+7,77
60	+58,50	0,48	+28,08	0	0	0	+28,08
90	+66,48	0,50	+33,24	0	0	0	+33,24
120	+58,50	0,46	+26,91	-0,10	0,02	-0,002	+26,91
150	+31,91	0,26	+8,30	-0,69	0,06	-0,41	+7,89
180	0	0	0	-5,89	0,2	-1,18	-1,18
210	0	0	0	-11,13	0,32	-3,56	-3,56
240	0	0	0	-14,73	0,44	-6,48	-6,48
270	0	0	0	-16,37	0,5	-8,20	-8,20
300	0	0	0	-2,62	0,02	-0,05	-6,25
				-14,41	0,43	-6,20	
330	0	0	0	-3,28	0,08	-0,26	-2,15
				-7,86	0,24	-1,89	
360	0	0	0	-5,89	0,2	-1,18	-1,18

Полученные результаты позволили наглядно представить на графиках изменение крутящего момента, создаваемого ветровым потоком, на одной, двух, трех и четырех лопастях путем сдвига кривой крутящего момента для двухлопастного на 180° , трехлопастного на 120° и 240° и четырехлопастного на 90° относительно остальных лопастей (рисунок 3).

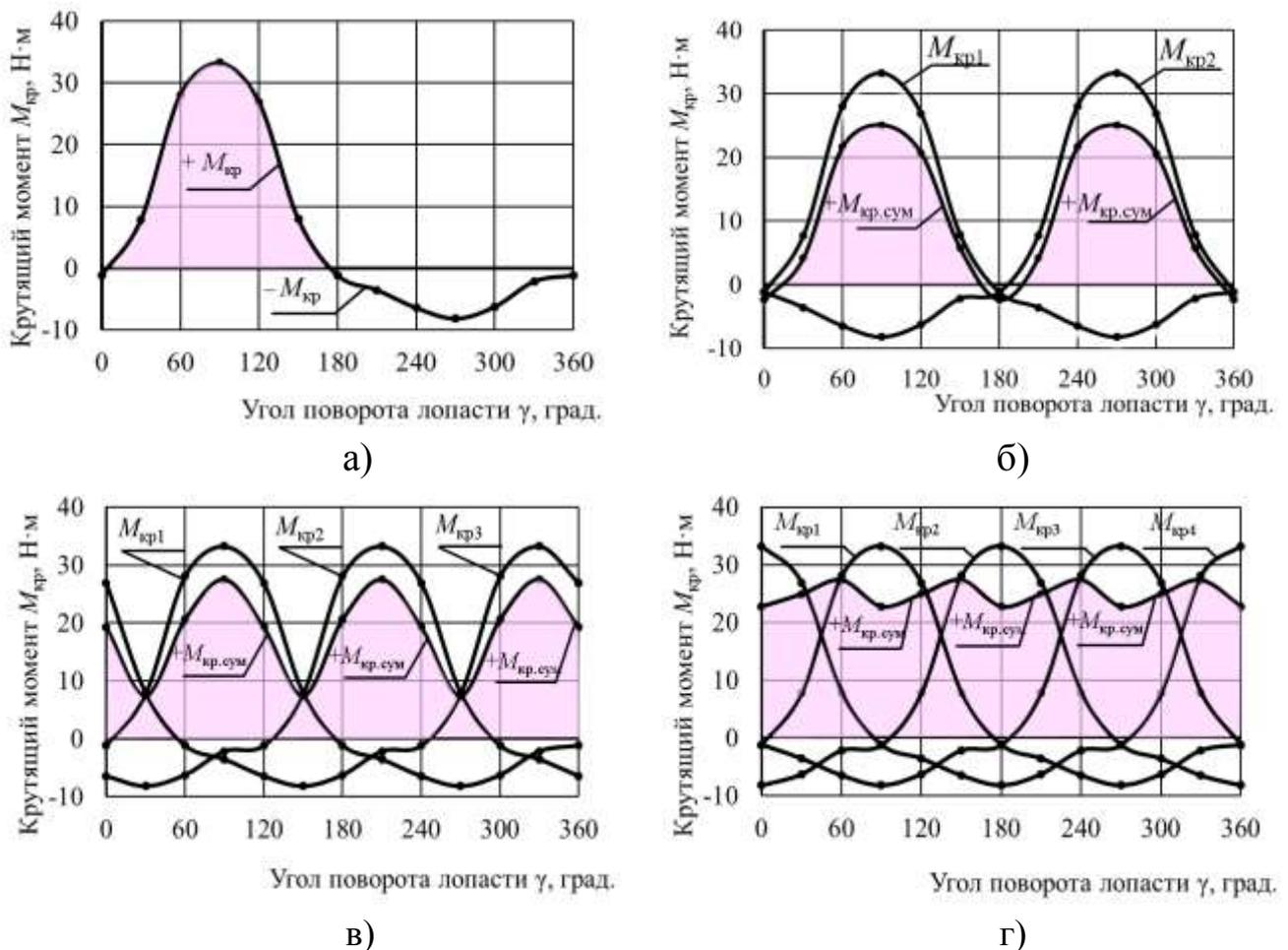


Рисунок 3 – Изменение крутящего момента, создаваемого ветровым потоком в зависимости от угла поворота: а) на одной лопасти; б) на двух лопастях; в) на трех лопастях; г) на четырёх лопастях

Из диаграммы следует, что величина крутящего момента зависит не только от угла поворота лопасти, но и от того, на выпуклую или вогнутую ее поверхность воздействует ветровой поток.

Безусловно, что однолопастной ветродвигатель работать не может. У двухлопастного имеются большие провалы крутящего момента. Трехлопастной ветродвигатель значительно выравнивает крутящий момент, делая его более равномерным на полном обороте. У четырехлопастного крутящий момент еще более равномерный

и не уступает по величине. Создается впечатление, что наилучшим по крутящему моменту является четырехлопастной ветродвигатель. Но такой вывод неправомерен, поскольку при наложении диаграмм нами не учитывались неравномерность крутящего момента и экранирование лопастей друг друга. Сопоставление диаграмм коэффициентов неравномерности крутящего момента Ψ и экранирования лопастей θ представлено на рисунке 4.

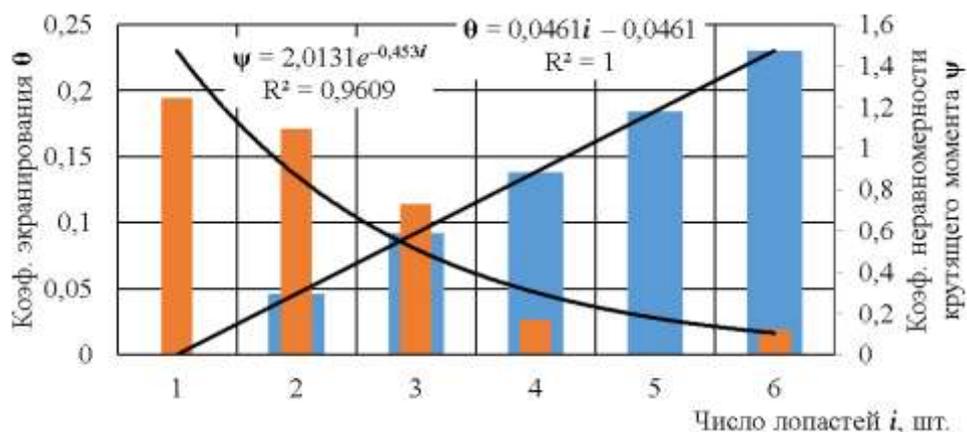


Рисунок 4 – Сопоставление коэффициентов неравномерности крутящего момента и экранирования лопастей, создаваемых ветровым потоком на ветродвигателе, в зависимости от числа лопастей

Из диаграммы отчетливо видно, что оптимальным является трехлопастная компоновка ротора ветроколеса. Если считать получение предварительных крутящих моментов первым шагом в исследовании работы роторного ветродвигателя, то вторым шагом, вытекающим из анализа полученных данных, является анализ изменения направления ветрового потока при воздействии его на лопасти и обтекание им лопастей при изменении их угла поворота от 0° до 360° .

На рисунке 5 представлены воздействия ветрового потока отдельно на вогнутую (а) и выпуклую (б) проекции лопастей. Если на вогнутой поверхности воздушный поток создает давление и образует воздушную подушку, с которой он стекает по краям кромок, не используя полностью свою кинетическую энергию на образование крутящего момента, то с выпуклой поверхности он полностью стекает. Если соединить эти лопасти внутренними кромками, то получим общую схему воздействия воздушного потока на двухлопастном ветродвигателе. При этом общая схема изменилась. Часть воздушного потока, стекающего с выпуклой поверхности,

направляется на вогнутую поверхность лопасти, увеличивая давление на нее. Однако избавиться от стекания воздушной подушки не удалось. Следовательно, необходимо дать потоку воздуха пространство, через которое он бы стекал не через внешнюю кромку наружу, а через внутреннюю кромку внутрь ветродвигателя, как представлено на рисунке 6.

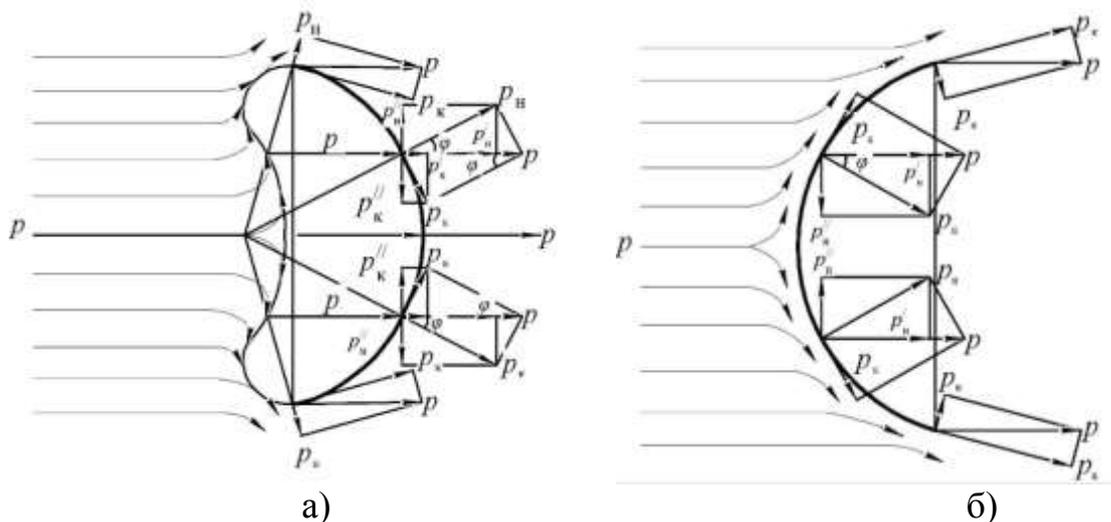


Рисунок 5 – Расчётная схема давления потока воздуха на лопасть:
 а) – на вогнутую поверхность лопасти; б) – на выпуклую поверхность лопасти

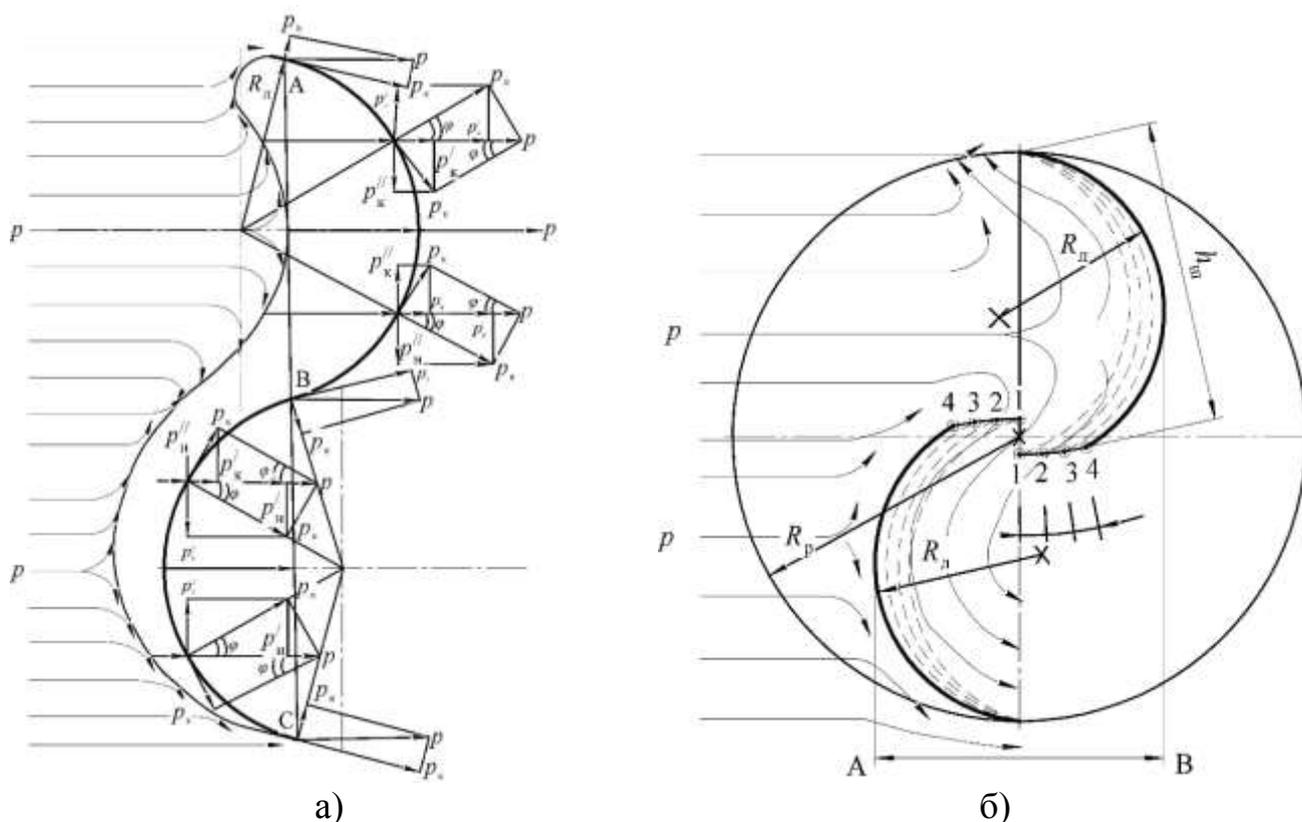


Рисунок 6 – Гипотетическая схема распределения воздушных потоков:
 а) – без проходного пространства; б) – с проходным пространством
 в двухлопастном ветродвигателе

В результате того, что между смежными сторонами лопастей образовался зазор, а лопасти заняли положение не перпендикулярное своим проекциям к направлению воздушного потока, то воздух, поджатый на вогнутой поверхности, устремляется в зону разряжения, образованную за выпуклой поверхностью, и нейтрализует ее отрицательное воздействие.

К рациональности таких схем пришли многие исследователи. Но в доступной нам литературе нет анализа движения потоков воздуха, крутящих моментов, относительного расположения лопастей, что предстоит выяснить экспериментальным путем.

В разделе 3 «Теоретические исследования процесса взаимодействия лопастей роторного ветродвигателя с ветровым потоком» приведены материалы графо-аналитических исследований, позволившие перейти к разработке трехлопастной схемы роторного ветродвигателя с учетом движения воздушного потока по лопастям. На рисунке 7 представлена гипотетическая схема распределения воздушных потоков в положении рабочей лопасти 90° , а также схема сил, действующих на лопасти ветродвигателя.

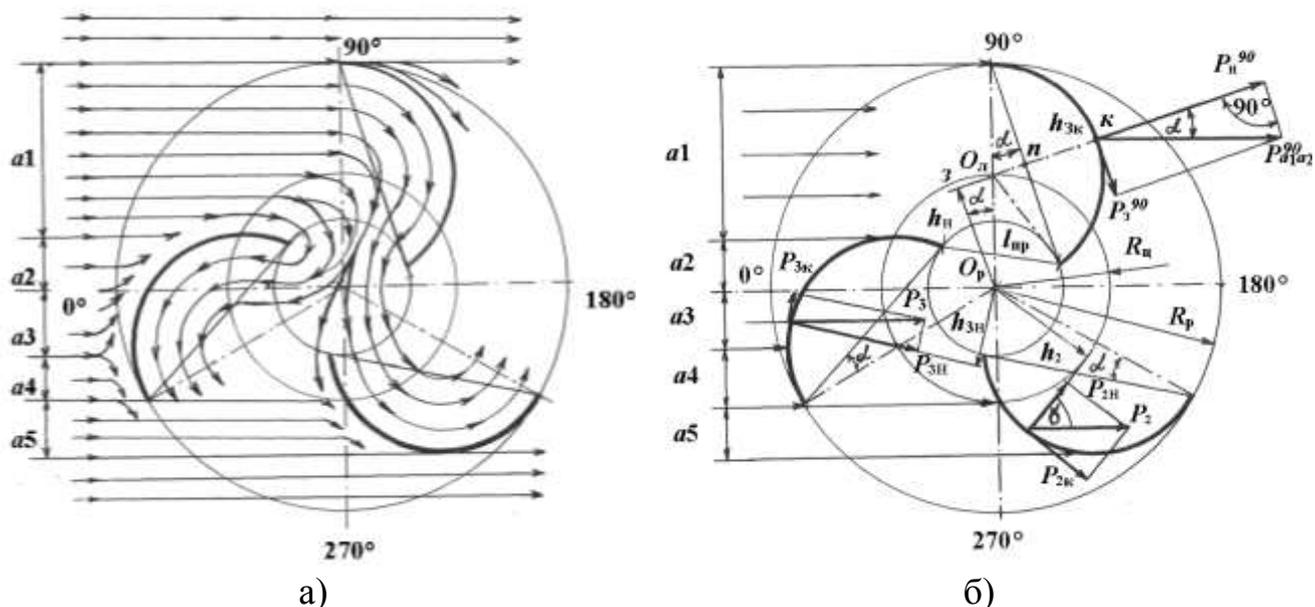


Рисунок 7 – Рабочая лопасть в положении рабочей лопасти 90° :
 а) – гипотетическая схема распределения воздушных потоков; б) – схема сил, действующих на лопасти роторного ветродвигателя

Благодаря повороту всех трех лопастей на угол α между их внутренними кромками образуется пространство с проходным сечением, через которое воздушный поток, сходящий с рабочей лопасти, закручивается и направляется на вогнутые поверхности двух других лопастей.

Для определения действующих сил и крутящих моментов, возникающих на лопастях, разработана расчётная схема основных геометрических параметров ветродвигателя (рисунок 7б). За опорный параметр взят радиус ротора R_p . Ширина лопасти $h_{ш}$ была взята равной её радиусу R_l , чтобы избежать экранирования их друг друга. Радиус цилиндрической поверхности выбран из расчёта наибольшего сопротивления лопасти воздушному потоку и обеспечивающим возможно больший угол закручивания, при котором сила, воздействующая на вогнутую цилиндрическую поверхность, будет максимальной.

Таким радиусом является $R_l = h_{ш} = R_p/2$, при котором, согласно теории гидродинамики, угол закручивания потока составляет 180° , а сила воздействия воздушного потока на лопасть становится наибольшей. Для обеспечения схода воздушного потока с лопасти к центру вращения ротора через проходное сечение угол наклона хорды лопасти α был предварительно взят равным 18° . Его оптимальную величину предстояло определить экспериментально.

Определение действующих сил и крутящих моментов на рабочей лопасти в положении 90° выражалось через массовые расходы воздуха, его скорость и геометрические размеры зон.

Суммарный массовый расход воздуха $G_{сум}$, кг/с, через зоны $a1$, $a2$ и $a3$, м, равен

$$G_{сум} = h_l \rho (a1 + a2 + a3) v_o, \quad (2)$$

где h_l – высота лопасти, м.

Массовый расход воздуха в проходном сечении $G_{пр}$, кг/с, будет равен

$$G_{пр} = G_{сум} = h_l l_{пр} \rho v_{пр}, \quad (3)$$

а скорость воздушного потока в проходном сечении $v_{пр}$, м/с, будет равна

$$v_{пр} = h_l \rho (a1 + a2 + a3) v_o / h_l \rho l_{пр} = a1 + a2 + a3 / l_{пр} v_o, \quad (4)$$

где $l_{пр}$ – ширина проходного сечения, м.

Сила P_{a1a2}^{90} , Н, воздействия воздушного потока на вогнутую поверхность рабочей лопасти с учётом её наклона на угол α и с учётом ее убегания определяется выражением

$$P_{a1a2}^{90} = G_{a1a2} (v_o - v_{y6}) = \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) v_o (v_o - v_o/3) = \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) 2/3 v_o^2, \quad (5)$$

где G_{a1a2} – массовый расход воздуха зон $a1$ и $a2$, кг/с.

Составляющая силы $P_{\text{н}}^{90}$, Н, будет равна

$$P_{\text{н}}^{90} = P_{a1a2} \cos \alpha = \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) \cdot \frac{2}{3} v_o^2 \cos \alpha. \quad (6)$$

Крутящий момент, создаваемый этой силой, $M_{\text{н}}^{90}$, Н·м, будет равен

$$M_{\text{н}}^{90} = P_{\text{н}} h_{\text{н}} = \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) \cdot 2/3 v_o^2 h_{\text{н}} \cos \alpha, \quad (7)$$

где $h_{\text{н}}$ – плечо, м, равное половине радиуса $R_{\text{р}}$.

$$M_{\text{н}}^{90} = R_{\text{р}}/2 h_{\text{л}} (a1 + a2) \rho 2/3 v_o^2 \cos \alpha = R_{\text{р}}/3 \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) v_o^2 \cos \alpha. \quad (8)$$

Вторая составляющая сила P_3^{90} , Н, будет закручивать воздушный поток по внутренней поверхности рабочей лопасти в сторону проходного сечения и также создавать крутящий момент

$$M_3^{90} = P_3^{90} h_{\text{зк}} C_x = \rho h_{\text{л}} (a1 + a2) \cdot 2/3 v_o^2 \sin \alpha h_{\text{зк}} C_x, \quad (9)$$

где $h_{\text{зк}}$ – плечо, м, на котором действует сила P_3^{90} ;

C_x – коэффициент аэродинамического сопротивления, равный 1,34.

Масса воздуха $m_{\text{врл}}$, кг, подвергающаяся закручиванию по внутренней поверхности рабочей лопасти, определяется как величина, равная

$$m_{\text{врл}} = h_{\text{л}} a1 \rho \pi R_{\text{л}}. \quad (10)$$

Центробежная сила $P_{\text{цр}}^{90}$, Н, образованная движением закрученного потока воздуха, равна

$$P_{\text{цр}}^{90} = 0,7071 \pi h_{\text{л}} a1 \rho (2/3 v_o)^2. \quad (11)$$

Сила $P_{\text{цр}}^{90}$ направлена по радиусу лопасти и приложена на плече $h_{\text{н}}$, м, образуя вращающий момент $M_{\text{цр}}^{90}$, Н·м, равный

$$M_{\text{цр}}^{90} = 0,7071 \pi h_{\text{л}} a1 \rho (2/3 v_o)^2 h_{\text{н}}. \quad (12)$$

Масса воздушного потока с рабочей лопасти устремляется в проходное сечение, увеличивая в нем скорость $v_{\text{пр}}$, м/с, разделяется на три потока, один из которых оказывает центробежное давление на вторую лопасть, его масса $m_{\text{в2л}}$, кг, определяется выражением

$$m_{\text{в2л}} = h_{\text{л}} \frac{1}{3} l_{\text{пр}} \rho \pi R_{\text{л}}. \quad (13)$$

Угловая скорость лопасти $\omega_{2л}$, рад/с, равна

$$\omega_{2л} = \frac{v_0 - v_{y6}}{R_l}. \quad (14)$$

Центробежная сила $P_{ц2}^{90}$, Н, образованная движением закрученного потока воздуха по внутренней поверхности второй лопасти со стороны проходного сечения, с учетом, что $R_l \approx R_p/2$ и скорость убегания лопасти составляет $1/3v_0$, будет равна

$$P_{ц2}^{90} = 0,7071\pi h_l \frac{1}{3} l_{пр} \rho (v_0 - v_{y6})^2. \quad (15)$$

Сила $P_{ц2}^{90}$, Н, направлена по радиусу лопасти R_l , а не по радиусу R_p ротора, поэтому по отношению к оси вращения ротора будет приложена на плечо h_2 , м, и момент $M_{ц2}^{90}$, Н·м, от ее воздействия будет равен

$$M_{ц2}^{90} = 0,7071\pi h_l \frac{1}{3} l_{пр} \rho (v_0 - v_{y6})^2 h_2. \quad (16)$$

При определении воздействующих сил и моментов на последующую за рабочей третьей лопасть был учтен сход воздушного потока, а также силовое воздействие на нее воздушных потоков в зонах $a2$, $a3$ и $a4$, влияние которых было проанализировано.

Учитывая, что поверхность лопасти представляет собой часть выпуклой цилиндрической поверхности, сила воздействия на её обтекаемую поверхность P_3^{90} , Н, будет определяться выражением

$$P_3^{90} = h_l (a2 + a3 + a4) \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) (1 - \cos\beta). \quad (17)$$

В данном случае имеет место выпуклая поверхность лопасти, величина угла β постоянно меняется и создаётся неопределённость. Поэтому для определения силы P_3^{90} рационально воспользоваться коэффициентом динамического сопротивления тела цилиндрической формы, равным $C_x = 0,33$.

Тогда для определения силы P_3^{90} может быть использовано выражение

$$P_3^{90} = h_l (a2 + a3 + a4) \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x, \quad (18)$$

на плече $h_{3н}$, м, что будет определяться отрицательным выражением

$$M_3^{90} = h_l (a2 + a3 + a4) \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x h_{3н}. \quad (19)$$

Касательная сила $P_{пк}^{90}$, Н, будет увлекать воздушный поток к сходу с выпуклой поверхности на внутреннюю вогнутую поверхность рабочей лопасти.

Вторая лопасть частично экранирована впереди идущей лопастью, а открытая часть лопасти находится в хорошо обтекаемом воздушным потоком положении, и сила ее сопротивления P_2^{90} , Н, определяется выражением

$$P_2^{90} = h_{л2} a_5 \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x, \quad (20)$$

в котором $C_x = 0,33$.

Вращающий момент M_2^{90} , Н·м, определяется выражением

$$M_2^{90} = h_{л2} a_5 \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) h_2 C_x. \quad (21)$$

Суммарный вращающий момент $M_{сум}^{90}$, Н·м, в положении рабочей лопасти 90° равен

$$\begin{aligned} M_{сум}^{90} &= M_H^{90} + M_3^{90} + M_{цр}^{90} + M_{ц2}^{90} - M_3^{90} - M_2^{90} = \\ &= \frac{R_p}{3} \rho h_{л1} (a_1 + a_2) v_0^2 \cos \alpha + \rho h_{л1} h_{зк} (a_1 + a_2) \frac{2}{3} v_0^2 \sin \alpha C_x + \\ &+ 0,7071 \pi h_{л1} a_1 \rho \left(\frac{2}{3} v_0 \right)^2 h_H + 0,7071 \pi h_{л1} \frac{1}{3} l_{пр} \rho (v_0 - v_{y6})^2 h_2 - \\ &- h_{л1} (a_2 + a_3 + a_4) \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x h_{зн} - h_{л2} a_5 \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) h_2 C_x. \quad (22) \end{aligned}$$

Поскольку все размеры чертежа в диссертации выдержаны в масштабе, то необходимые размеры могут быть определены в относительном масштабе, если взять радиус ротора $R_p = 1$ м, высоту лопасти $h_{л1} = 1$ м. Остальные размеры – плечо крутящих моментов, угол наклона лопастей α – определяются исходя из размеров на чертеже.

Подставив значения приведённых выше величин в формулу (22), для положения рабочей лопасти при 90° получим $M_{сум}^{90} = 75,48$ Н·м, мощность роторного ветродвигателя N_{90} , Вт

$$N_{90} = M_{сум}^{90} \omega_p, \quad (23)$$

где ω_p – угловая скорость ротора, рад/с, при скорости ветра 9 м/с равна 3,0 рад/с.

Мощность ветродвигателя для положения рабочей лопасти 90° будет равна

$$N_{90} = 226,44 \text{ Вт.}$$

Мощность $N_{в.п}$, Вт, ветрового потока определяется по известной формуле

$$N_{в.п} = \frac{\rho F v_0^3}{2} \quad (24)$$

и составляет $N_{в.п} = 893,03$ Вт.

Коэффициент использования энергии ветра (КИЭВ) в положении рабочей лопасти 90° определяется по формуле

$$\xi_{90} = \frac{N_{90}}{N_{в.п}} \quad (25)$$

и составит $\xi_{90} = 0,254$.

Чтобы иметь представление о характере взаимодействия массы воздушного потока на лопасти ротора в целом, были проведены аналогичные графо-аналитические исследования в остальных характерных положениях рабочей лопасти – 120° , 150° , 180° , при повороте ротора на 210° положения повторяются.

Суммарный момент на роторе в положениях рабочей лопасти 120° , 150° и 180° будет равен сумме моментов выражений (26), (27) и (28)

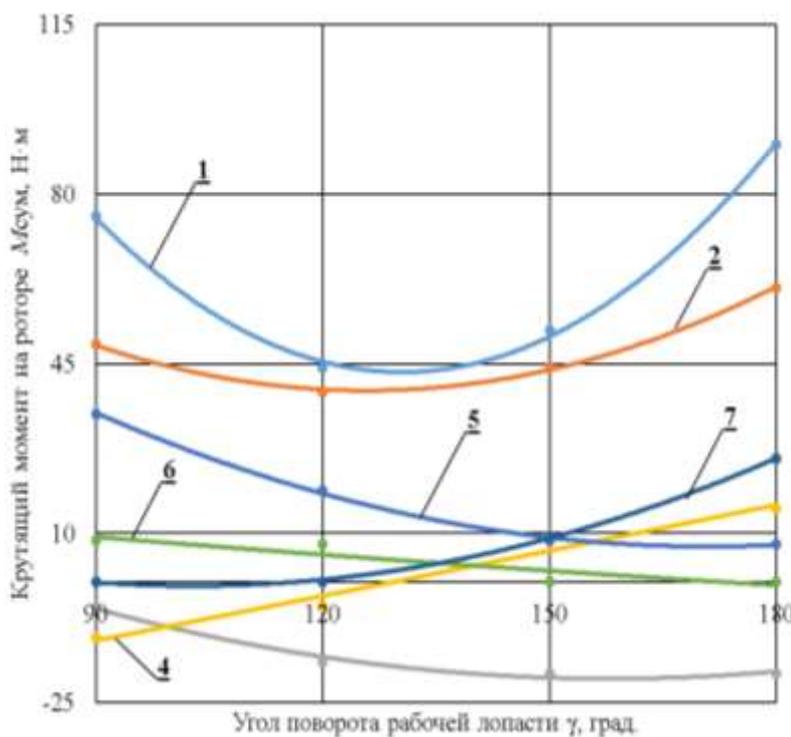
$$\begin{aligned} M_{\text{сум}}^{120} &= M_{\text{р}}^{120} + M_{\text{цр}}^{120} + M_{\text{ц2}}^{120} - M_3^{120} - M_2^{120} = \\ &= \frac{2}{3} \rho h_{a1a2} h_{\text{л}} (a1 + a2) v_0^2 C_x + 0,7071 \pi h_{\text{л}} a1 \rho \left(\frac{2}{3} v_0 \right)^2 h_{a1a2} + \\ &+ 0,7071 \pi h_{\text{л}} \frac{1}{3} l_{\text{пр}} \rho (v_0 - v_{y6})^2 h_2 - h_{\text{л}} a2 \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x h_3 \sin \beta_2 - \\ &- \frac{4}{3} h_{\text{л}} a4 \rho v_0 (v_0 + v_{y6}) C_x h_2 \cos \beta_3 ; \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{сум}}^{150} &= M_{\text{р}}^{150} + M_{\text{цр}}^{150} + M_3^{150} + M_{\text{ц3}}^{150} - M_2^{150} = \\ &= \rho h_{\text{л}} R_{\text{л}} v_0 (v_0 - v_{y6}) h_{\text{р}} C_x + 0,7071 \pi h_{\text{л}} \frac{1}{3} l_{\text{пр}} \rho (v_0 - v_{y6})^2 h_{\text{р}} + \\ &+ \rho h_{\text{л}} a2 v_0 (v_0 - v_{y6}) h_3 C_x + 0,7071 \pi h_{\text{л}} a2 \rho \left(\frac{2}{3} v_0 \right)^2 h_3 - \\ &- \rho a4 h_{\text{л}} v_0 (v_0 + v_{y6}) h_2 C_x ; \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{сум}}^{180} &= M_3^{180} + M_{\text{ц3}}^{180} + M_{\text{р}}^{180} + M_{\text{цр}}^{180} - M_2^{180} = \\ &= \rho h_{\text{л}} a1 v_0 (v_0 - v_{y6}) \sin \beta h_3 C_x + 0,7071 \pi h_{\text{л}} a1 \rho \left(\frac{2}{3} v_0 \right)^2 h_3 + \\ &+ \rho h_{\text{л}} \frac{1}{2} l_{\text{пр}} (v_{\text{пр}} - v_{y6})^2 h_{\text{р}} C_x + 0,7071 \pi h_{\text{л}} \frac{1}{3} l_{\text{пр}} \rho (v_0 - v_{y6})^2 h_{\text{р}} - \\ &- \rho a3 h_{\text{л}} v_0 (v_0 + v_{y6}) h_2 C_x . \end{aligned} \quad (28)$$

После подстановки размеров и углов, взятых из схем, представленных в диссертации, в соответствующие формулы были получены суммарные крутящие моменты: $M_{\text{сум}}^{120} = 44,19$; $M_{\text{сум}}^{150} = 51,86$ и $M_{\text{сум}}^{180} = 90,3$ Н·м. Мощность ветродвигателя в положениях равна $N_{120} = 132,56$; $N_{150} = 155,58$ и $N_{180} = 270,9$ Вт. Коэффициент использования энергии ветра соответственно $\zeta_{120} = 0,148$; $\zeta_{150} = 0,174$ и $\zeta_{180} = 0,303$. Средний КИЭВ $\zeta_{\text{ср}} = 0,22$.

Анализ составляющих суммарного крутящего момента ротора в зависимости от положения рабочей лопасти от 90° до 180° (рисунок 8) показал, что наравне с силой давления воздушного потока существенное влияние на него оказывает крутящий момент, вызванный центробежными силами, который в свою очередь зависит от ширины проходного сечения, образованного углом α , представляющим раскрытие лопастей. Влияние угла α на мощность и как следствие КИЭВ необходимо проверить экспериментально.



1 – суммарный крутящий момент на роторе $M_{\text{сум}} = 0,0194 \gamma^2 - 5,056 \gamma + 373,22$, $R^2 = 0,9975$;
 2 – крутящий момент I (рабочей) лопасти $M_I = 0,0073 \gamma^2 - 1,8417 \gamma + 155,27$, $R^2 = 0,9973$;
 3 – крутящий момент II лопасти $M_{II} = 0,0031 \gamma^2 - 0,9886 \gamma + 58,069$, $R^2 = 0,9832$;
 4 – крутящий момент III лопасти $M_{III} = 0,00007 \gamma^2 + 0,2927 \gamma - 39,069$, $R^2 = 0,9778$;
 5 – крутящий момент от центробежных сил I (рабочей) лопасти $M_{\text{цI}} = 0,0042 \gamma^2 - 1,4431 \gamma +$

$+ 130,56$, $R^2 = 0,9983$;
 6 – крутящий момент от центробежных сил II лопасти $M_{\text{цII}} = 0,0002 \gamma^2 - 0,1619 \gamma + 22,281$, $R^2 = 0,8326$;
 7 – крутящий момент от центробежных сил III лопасти $M_{\text{цIII}} = 0,0044 \gamma^2 - 0,9134 \gamma + 46,107$, $R^2 = 0,9991$

Рисунок 8 – Изменение крутящего момента, создаваемого ветровым потоком на трёхлопастном ветродвигателе, в зависимости от положений лопастей и угла поворота

С целью увеличения мощности ветродвигателя в районах со среднегодовой скоростью ветра с 4...5 м/с был предложен кольцевой концентратор воздушного потока (ККВП) (пат. №2572356) и проанализировано графо-аналитическим способом его влияние на лопасти в положениях рабочей лопасти 90° , 120° , 150° и 180° (рисунок 9).

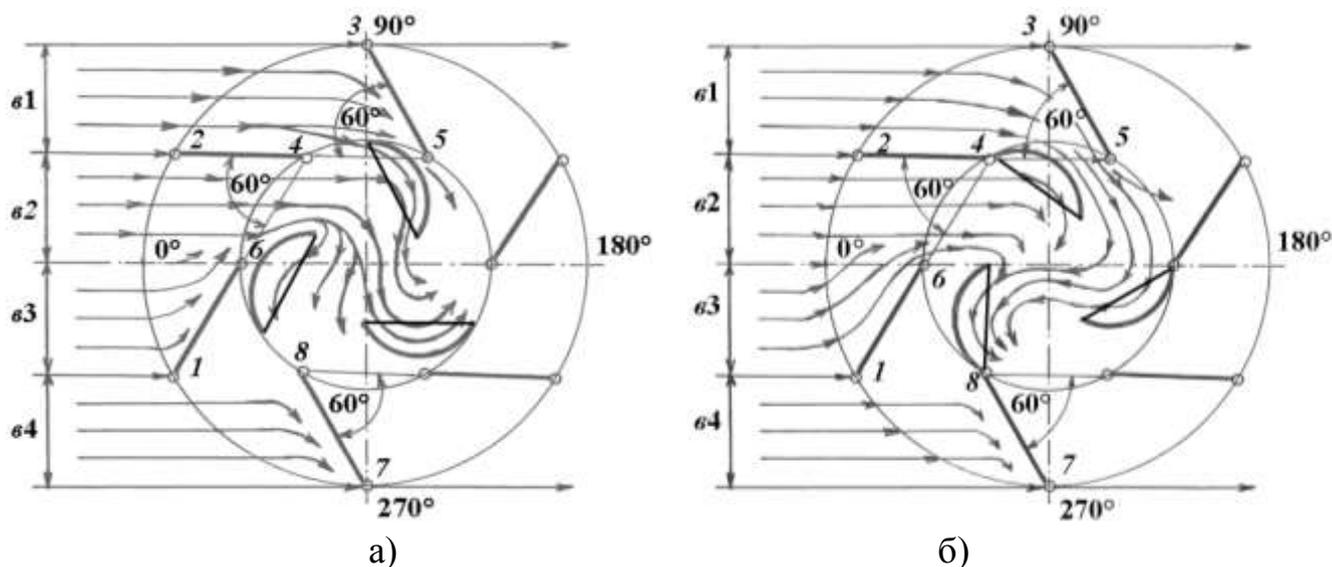
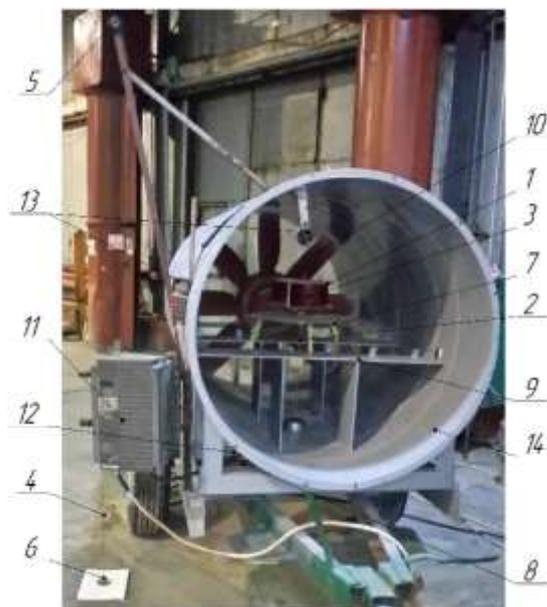
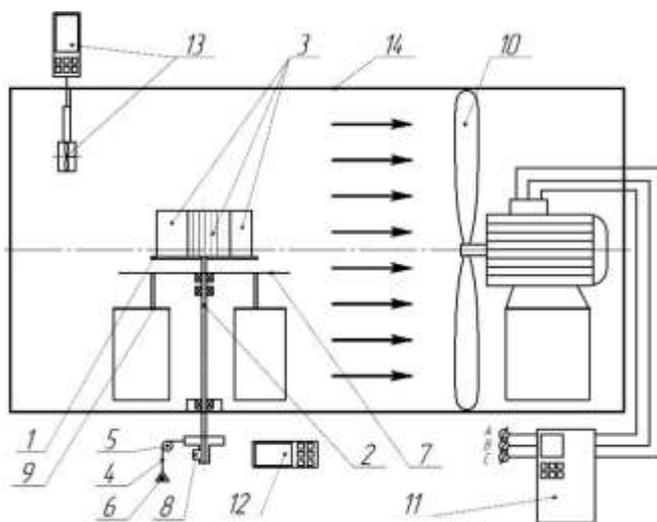


Рисунок 9 – Гипотетическая схема распределения воздушных потоков по лопастям под воздействием кольцевого концентратора: а) – в положении рабочей лопасти 90° ; б) – в положении рабочей лопасти 180°

Анализ показал, что кольцевой концентратор вносит значительные изменения воздействующих сил и крутящих моментов на лопасти ротора, для чего появилась необходимость определения энергетических характеристик на модели ветродвигателя без кольцевого концентратора и с ним, чтобы иметь возможность принять конструктивные решения при разработке вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки.

В разделе 4 «Методика и результаты лабораторных исследований взаимодействия воздушного потока с лопастями модели ротора ветродвигателя» представлена методика разработки ВО РВЭУ, в основу которой был положен метод динамического пошагового конструирования геометрической конфигурации рабочих лопастей. Все геометрические размеры – радиус лопасти, высота сегмента, длина хорды – были приведены к размеру внешнего радиуса вращения ротора, что позволило в дальнейшем перенести их с модели на реальный ротор.

Для проведения лабораторных (стендовых) исследований была разработана установка (рисунок 10).



а)

б)

1 – диск; 2 – ось; 3 – лопасти; 4 – нить; 5 – блок; 6 – груз; 7 – подставка;
8 – прерыватель; 9 – опора; 10 – вентилятор; 11 – преобразователь частоты;
12 – счетчик оборотов; 13 – анемометр; 14 – труба

Рисунок 10 – Лабораторная установка для исследования энергетических характеристик модели ротора ветродвигателя в зависимости от количества лопастей и их взаимного расположения: а) – схема установки; б) – общий вид установки

Цель исследования – определить величины крутящих моментов, частоты вращения ротора, мощности при фиксированной скорости воздушного потока, которая по известным рекомендациям принимается за расчетную на высоте флюгера.

Комплект оборудования для проведения исследования включал контрольно-измерительную аппаратуру и приборы для регистрации опытных данных. Величину крутящего момента находили по формуле

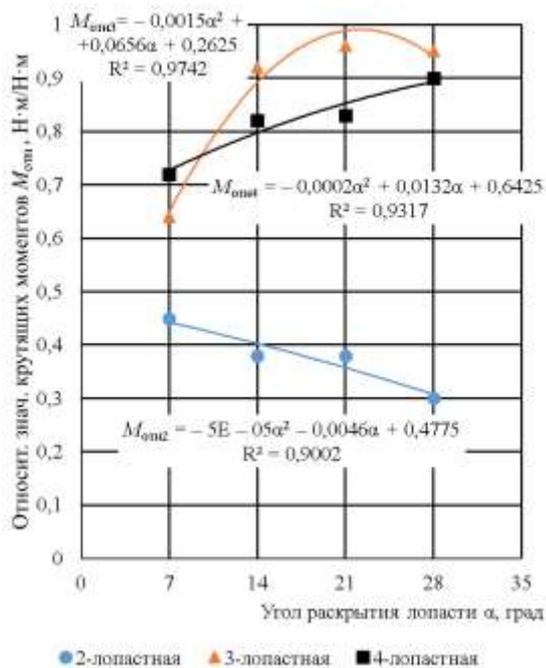
$$M_{кр} = m_{г}gl, \quad (29)$$

где $m_{г}$ – масса груза, кг;

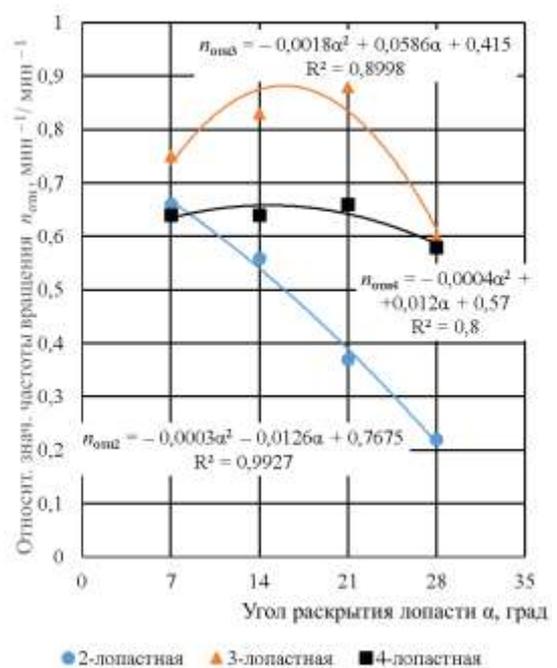
g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$;

l – длина плеча от точки крепления нити до оси вращения, м.

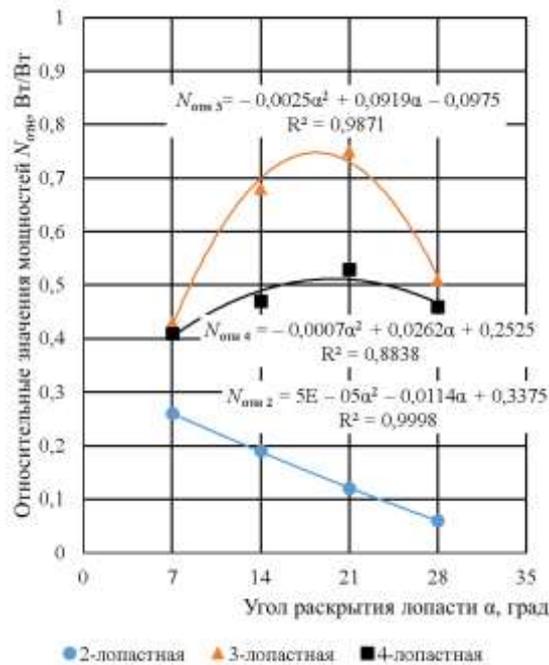
Для удобства сравнения величин энергетических характеристик полученных результатов они были преобразованы в относительные величины (рисунок 11).



а)



б)



в)

Рисунок 11 – Относительные энергетические характеристики модели роторного ветродвигателя в зависимости от количества лопастей и их взаимного расположения при скорости воздушного потока $v = 7,85 \text{ м/с}$: а) – график крутящих моментов

$M_{отн}$, $\text{Н}\cdot\text{м}/\text{Н}\cdot\text{м}$; б) – график частоты вращения ротора, $n_{отн}$, $\text{мин}^{-1}/\text{мин}^{-1}$; в) – график мощностей, $N_{отн}$, $\text{Вт}/\text{Вт}$

На графике (рисунок 11) представлены результаты проведенных экспериментов, из которых видно, что наибольший крутящий момент имеет трехлопастная модель при угле раскрытия лопастей 18° .

На рисунке 11б обращают на себя внимание данные четырехлопастной модели, у которой относительная частота вращения вала при углах раскрытия лопастей мало отличается. Это свидетельствует о правильности вывода о том, что при четырех лопастях они значительно экранируют друг друга.

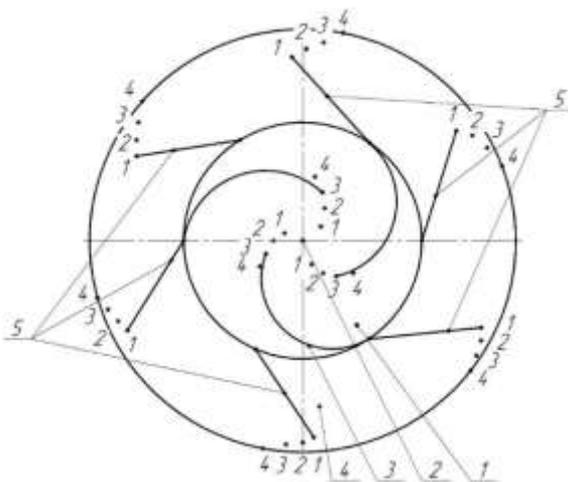
Наибольшую относительную частоту вращения и мощность развивает трехлопастная модель при угле раскрытия лопастей 18° . Об этом также свидетельствуют показатели относительного крутящего момента и относительной частоты вращения, которые в действительных единицах взаимосвязаны между собой выражением

$$N = M_{кр} 2\pi n / 60 , \quad (30)$$

где n – число оборотов, мин⁻¹.

Очевидно, что трехлопастная модель ротора ветродвигателя имеет лучшие энергетические характеристики. Поэтому лабораторные испытания эффективности использования ККВП проводились именно на ней.

Определение эффективности ККВП сводилось к определению крутящего момента, создаваемого моделью трехлопастного ротора на лабораторной установке (см. рисунок 9б) в зависимости от угла наклона плоских вертикальных направляющих в позициях 1, 2, 3 и 4 соответствующим углам 25° , 30° , 35° и 40° к направлению воздушного потока (рисунок 12).



1 – диск; 2 – ось; 3 – лопасти; 4 – концентратор воздушного потока; 5 – плоские вертикальные направляющие

Рисунок 12 – Схема установки угла наклона плоских вертикальных направляющих на лабораторной установке

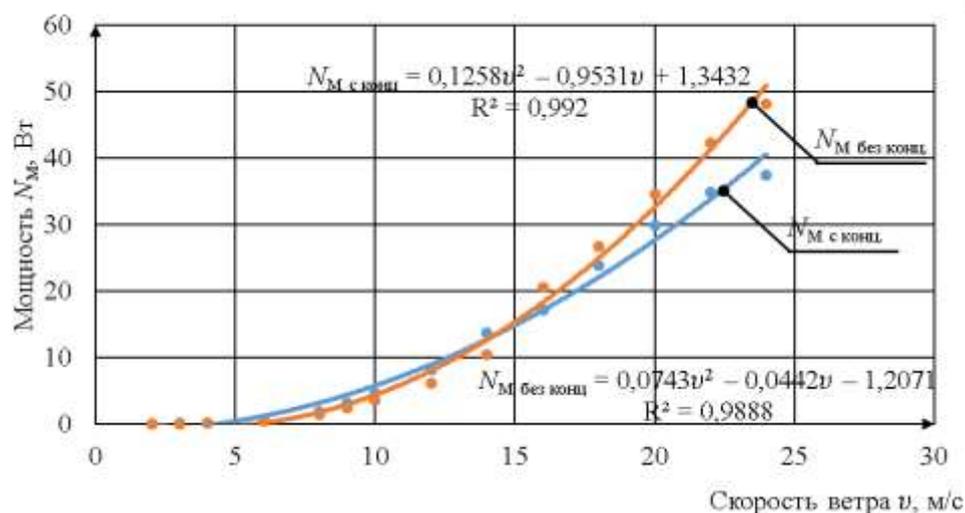
Мощность, развиваемую моделью трехлопастного ветродвигателя с ККВП, определяли по формуле (30).

Результаты лабораторных испытаний трехлопастной модели с концентратором воздушного потока представлены на рисунке 13.



Рисунок 13 – Зависимость мощности модели ротора $N_{Мср}$ от угла λ плоских вертикальных направляющих

размеры перспективных моделей и определить их энергетические показатели при продувке в аэродинамической трубе с изменением скорости воздушного потока от 2 до 24 м/с (рисунок 14).



$N_{М с конц.}$ – мощность на валу модели ВО РВЭУ с ККВП, Вт;

$N_{М без конц.}$ – мощность на валу модели ВО РВЭУ без ККВП, Вт

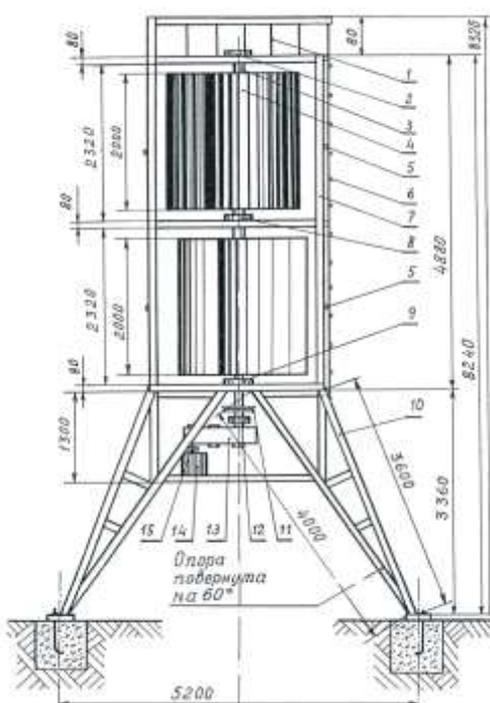
Рисунок 14 – Изменение мощности на валу моделей ВО РВЭУ с ККВП и без него в зависимости от скорости ветрового потока

Результаты проведенной продувки перспективных моделей в аэродинамической трубе показывают, что модель с кольцевым концентратором воздушного потока демонстрирует лучшие характеристики при скорости воздушного потока до 14 м/с. Модель без концентратора демонстрирует явные преимущества при скорости ветра от 14 м/с и выше. Энергетические характеристики обеих моделей находятся

на приемлемом уровне, и вопрос о конкретном их использовании можно рассматривать с позиции средних скоростей ветра в районе эксплуатации.

Полученные результаты лабораторных испытаний позволили разработать и изготовить вертикально-осевую двухроторную ветроэнергетическую установку (ВО ДРВЭУ) и ККВП с целью проведения натурных испытаний.

В разделе 5 «Разработка конструкции, изготовление экспериментального образца роторной ветроэнергетической установки и устройств, повышающих ее эффективность» приведены материалы проектирования конструкции ВО ДРВЭУ, смонтированной на трехопорной ферме с двумя ячейками и образованными тремя опорными площадками для роторов с гибкой связью между ними в виде шарнира Гука. Роторы по оси вращения смещены на 60° , что позволило сделать крутящий момент более равномерным. Общий вид и геометрические размеры установки представлены на рисунке 15.



а)

б)

1 – ограждение безопасности; 2, 8, 9 – подшипниковые опоры; 3 – вал;
4 – лопасти; 5 – пластина безопасности; 6 – лестница; 7 – рама; 10 – опора;
11 – шкив; 12, 15 – муфта; 13 – редуктор повышающий; 14 – генератор

Рисунок 15 – Двухроторная ветроэнергетическая установка:

а) – конструктивная схема; б) – общий вид с рабочими механизмами

При разработке конструкции ККВП были учтены результаты лабораторных исследований. Общий вид ВО ДРВЭУ с ККВП представлен на рисунке 16.



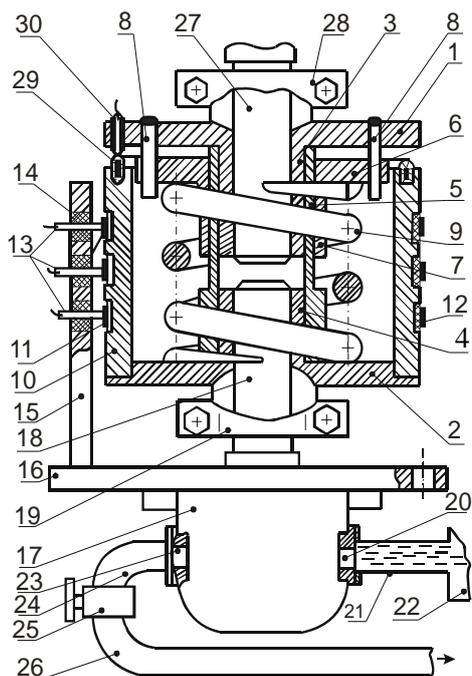
а)

б)

а) монтаж кольцевого концентратора; б) общий вид установки

Рисунок 16 – Вертикально-осевая двухроторная ветроэнергетическая установка с кольцевым концентратором воздушного потока

Для определения технических характеристик ветродвигателя в режиме рабочего времени был разработан и запатентован измерительный комплекс (пат. № 2585482), представленный на рисунке 17.

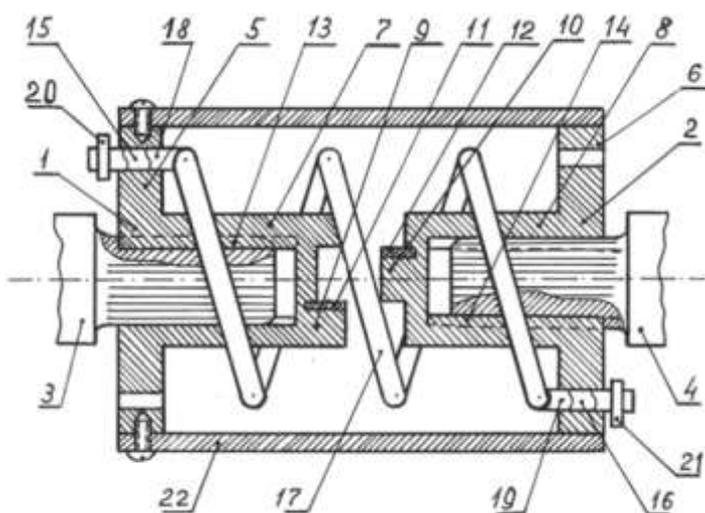


1, 2 – ведущий и ведомый фланцы; 3, 4 – ступицы ведущего и ведомого фланцев; 5 – центрирующая втулка; 6 – подвижный фланец; 7 – ступица подвижного фланца; 8 – штифт; 9 – динамометрическая пружина; 10 – стакан; 11 – токосъёмные кольца; 12 – токонепроводящий участок; 13 – токосъёмные контакты; 14 – изоляция; 15 – стойка; 16 – опорная плита; 17 – шестерёнчатый насос; 18 – приводной вал насоса; 19 – зажим ведомого фланца; 20 – входное отверстие насоса; 21 – входной трубопровод; 22 – бак; 23 – выходное отверстие насоса; 24, 26 – выходные трубопроводы; 25 – вентиль; 27 – вал ветродвигателя; 28 – зажим ведущего фланца; 29 – кольцевой реохорд; 30 – электрический контакт

Рисунок 17 – Схема динамометрической муфты измерительного комплекса

Комплекс позволяет одновременно измерять частоту вращения вала ротора n , мин^{-1} , крутящий момент $M_{\text{кр}}$, $\text{Н}\cdot\text{м}$, на валу и мощность $N_{\text{в}}$, Вт , передаваемую на вал рабочей машины с выводом показателей этих величин на приборы или экран монитора компьютера. Принцип измерения крутящего момента на валу ротора основан на зависимости угла закручивания цилиндрической пружины от приложенного к ней крутящего момента. Угол закручивания измерялся по сопротивлению реохорда. Основным элементом измерительного комплекса – динамометрическая муфта.

При трогании ротор ветроустановки должен преодолеть свой собственный момент инерции и одновременно момент инерции рабочего механизма, на что необходим повышенный крутящий момент. Для уменьшения момента трогания была предложена пружинная муфта (рисунок 18), позволяющая ротору начинать вращение без нагрузки со стороны подсоединенных рабочих механизмов, постепенно наращивая свой крутящий момент вхолостую, а затем, преодолевая сопротивление пружины, плавно начинать вращение рабочих механизмов до полной нагрузки (пат. № 2639930).



1, 2 – ведущая и ведомая полу-муфты; 3, 4 – ведущий и ведомый валы; 5, 6 – фланцы; 7, 8 – ступицы; 9, 10 – выступы; 11, 12 – амортизирующие прокладки; 13, 14 – шлицы; 15, 16 – кольцевые прорези; 17 – винтовая пружина; 18, 19 – отогнутые концы винтовой пружины; 20, 21 – стопорные кольца; 22 – предохранительный кожух

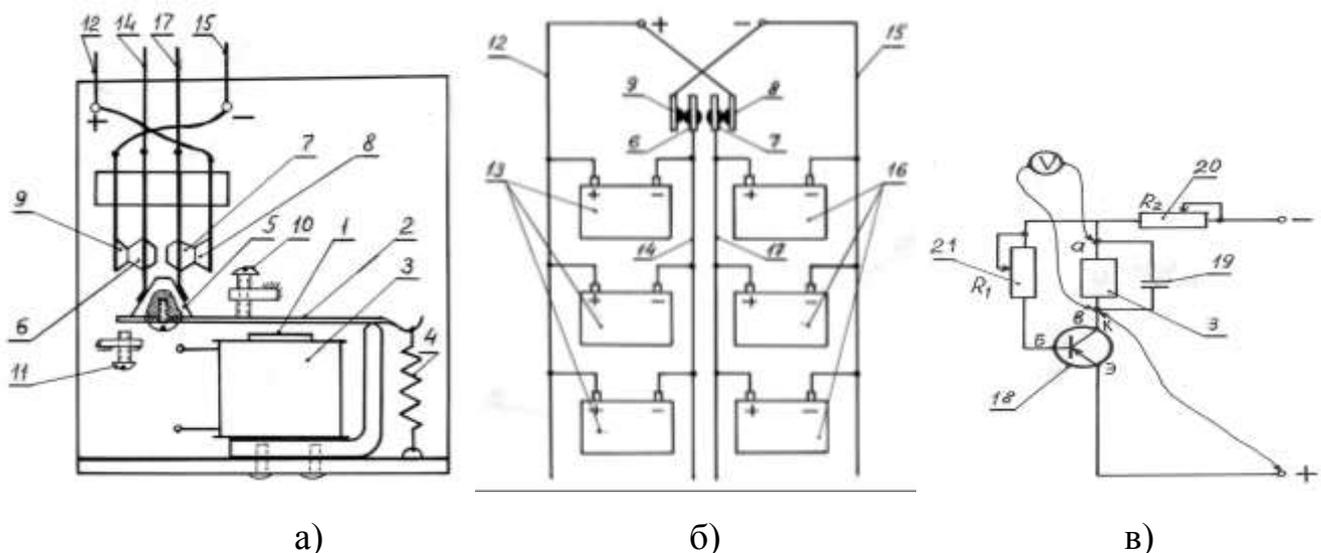
Рисунок 18 – Пружинная муфта

Применение пружинной муфты позволяет уменьшить стартовую скорость ветроустановки и сгладить колебания рабочих органов механизмов.

С учетом того, что ветроустановки малой мощности работают на зарядку аккумуляторных батарей с последующим преобразованием энергии инвертором для

работы электроустановок, предложен способ зарядки аккумуляторных батарей, заключающийся в следующем. Нами взят электрогенератор с номинальным напряжением 24 В, а заряжаемые АКБ использовали с номинальным напряжением 12 В. При малой скорости ветра электрогенератор не обеспечивает выработку 24 В для зарядки 24 В батарей, а 12 В он заряжает. Поэтому при малом ветре все 12 В батареи подключаются параллельно. С усилением ветра электрогенератор вырабатывает 24 В, и все АКБ переключаются на попарно-последовательную зарядку автоматически. То есть 12 В АКБ необходимо по две соединить последовательно, а все получившиеся пары подсоединить на зарядку параллельно. Таким образом, все 12 В АКБ при повышенной скорости ветра будут заряжаться при необходимом для них напряжении.

Для этого было разработано устройство «Электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей» (пат. № 2649908), электрическая схема которого представлена на рисунке 19.



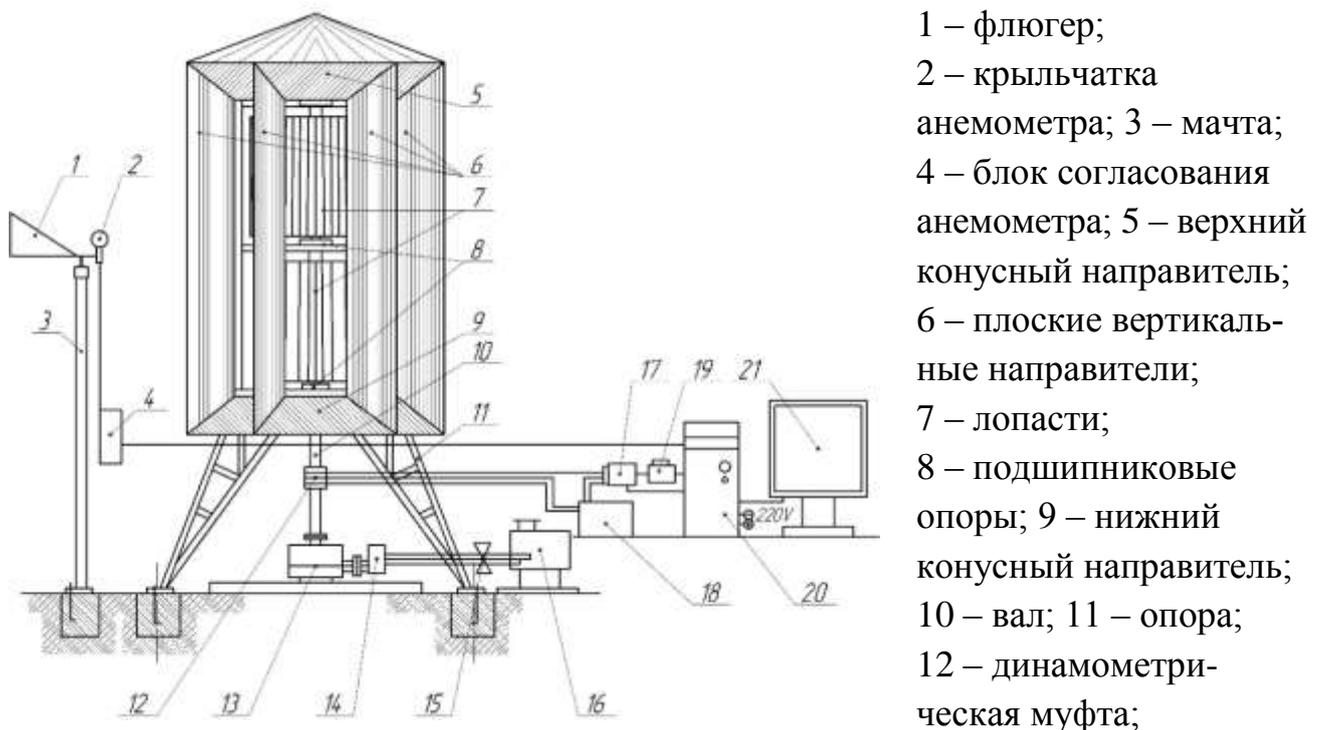
- 1 – сердечник; 2 – якорь; 3 – катушка; 4 – пружина; 5 – упор;
 6, 7, 8, 9 – управляемые контакты; 10, 11 – регулировочные винты;
 12, 14, 15, 17 – электрические шины; 13, 16 – аккумуляторные батареи;
 18 – транзистор; 19 – конденсатор; 20, 21 – сопротивление

Рисунок 19 – Схема устройства электромагнитного реле для переключения аккумуляторных батарей: а) – принципиальная схема электромагнитного реле; б) – электрическая схема параллельного и попарно-параллельного подключения аккумуляторных батарей на зарядку; в) – схема управляющего элемента на транзисторе

Совершенствуя данный способ, мы разработали реле, работающее на тиристорах (пат. № 2705796). Преимущество его состоит в отсутствии контактов, через которые происходит переключение. Их заменили тиристоры. Применение разработанных устройств при использовании ВЭУ малой мощности, работающих в агрегате с АКБ, значительно упрощает решение проблемы использования энергии ветра в широком диапазоне скоростей. Устройство располагается рядом с АКБ и доступно для технического обслуживания.

В разделе 6 «Испытания вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки» представлены результаты испытаний, проведенных на открытой местности, по классификации В. Ю. Милевского – 7б, что означает: местность открытая, 7 баллов; б – местность плоская, что вполне соответствует требованиям испытаний в ветреные периоды, когда средняя скорость ветра 2...24 м/с.

Схема экспериментальной установки представлена на рисунке 20.

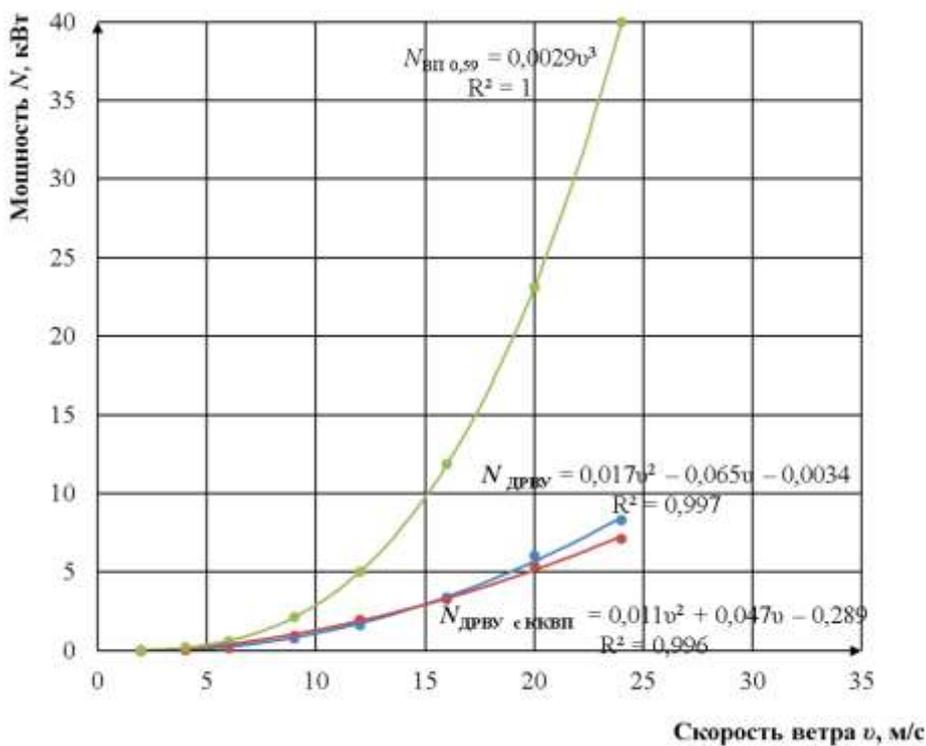


1 – флюгер;
 2 – крыльчатка анемометра; 3 – мачта;
 4 – блок согласования анемометра; 5 – верхний конусный направлятель;
 6 – плоские вертикальные направлятели;
 7 – лопасти;
 8 – подшипниковые опоры; 9 – нижний конусный направлятель;
 10 – вал; 11 – опора;
 12 – динамометрическая муфта;
 13 – угловой редуктор; 14 – масляный насос; 15 – регулировочный вентиль;
 16 – емкость для масла; 17 – усилитель сигнала TDA; 18 – магазин сопротивлений;
 19 – модуль «Sigma USB» АЦП ЦАП; 20 – ПК с программным обеспечением ZetLab и UNI-T; 21 – монитор

Рисунок 20 – Схема экспериментальной вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки для определения её энергетических характеристик

Скорость воздушного потока измеряли анемометром UT362 и фиксировали на экране и в памяти ПК. С помощью динамометрической муфты измеряли частоту вращения и крутящий момент на валу ротора ветродвигателя, которые с помощью программного обеспечения Zet-210 фиксировали на ПК с построением графика мощности на валу в данный момент времени. По каждой скорости формировали десять повторностей и обрабатывали их на модуле Sigma USB АЦП ЦАП с программным обеспечением ZetLab и UNI-T.

Испытания проводились для двухроторной установки без концентратора воздушного потока и совместно с ним. По результатам проведенных испытаний был построен график (рисунок 21), а также номограмма, позволяющая подобрать мощностные и эксплуатационные параметры механизмов и машин, использующих механическую энергию вращающегося вала ротора (рисунок 22).



$N_{\text{ВП } 0,59}$ – критерий Бетца-Жуковского исходя из площади $F = 8\text{ м}^2$;
 $N_{\text{ДРВЭУ}}$ – мощность ВО ДРВЭУ без ККВП, Вт;
 $N_{\text{ДРВЭУ с ККВП}}$ – мощность ВО ДРВЭУ с ККВП, Вт

Рисунок 21 – Изменение мощности на валу ВО ДРВЭУ с ККВП и без него в зависимости от скорости ветра

Эффективность использования вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки определяли в агрегате с саморегулирующимся гидродинамическим нагревателем (рисунок 23). Испытания проводили при средней скорости ветра 5 и 9 м/с.

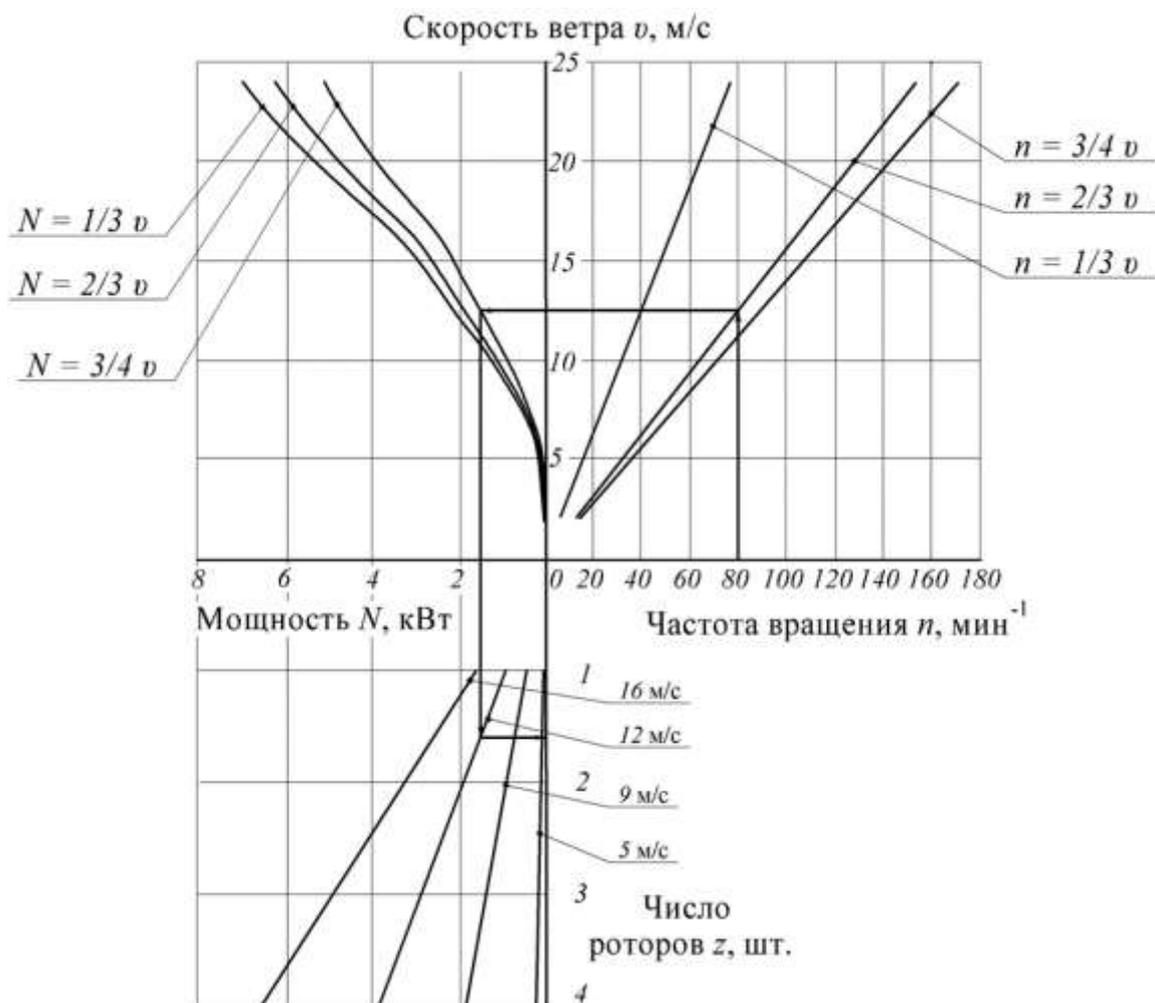


Рисунок 22 – Номограмма для определения мощностных и эксплуатационных показателей ВО ДРВЭУ с ККВП



Рисунок 23 – Общий вид саморегулирующегося гидродинамического нагревателя жидкости

По результатам испытаний был построен график (рисунок 24).

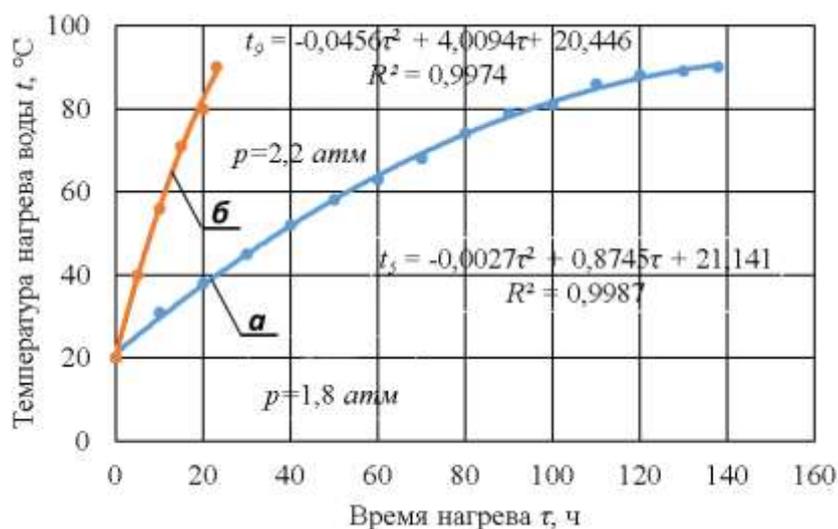


Рисунок 24 – Изменение температуры нагреваемой воды массой 200 кг при работе саморегулирующегося гидродинамического нагревателя с приводом от вала вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки:

а – при средней скорости ветра 5 м/с; *б* – при средней скорости ветра 9 м/с

По полученным данным были определены количество теплоты при $v = 9 \text{ м/с}$ $Q_{\text{теп}} = 249,3 \text{ МДж}$, количество энергии, принятое лопастями роторной ветроустановки, $E_{\text{в.л}} = 304,3 \text{ МДж}$, коэффициент тепловой активности $\eta_{\text{Э}} = 0,20$. Необходимо отметить, что на многих предприятиях воду нагревают не с помощью ТЭН, а с помощью гидродинамических нагревателей ввиду их высокой тепловой активности с приводом от электродвигателей.

Многолетние успешные испытания ВО ДРВЭУ в жестких ветровых условиях на территории ее установки позволяют рекомендовать ее для массового производства с целью использования как автономного источника.

В разделе 7 «Технико-экономическая эффективность использования вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки с кольцевым концентратором воздушного потока в качестве автономного источника на мини-фермах молочного направления» руководящими документами для выбора мини-ферм молочного направления послужили методические материалы доктора технических наук Ф. В. Серебренникова «Ветроэнергетические установки малой мощности для изолированного потребителя», в которых дан полный анализ технологических процессов мини-ферм молочного направления.

Особенностью предлагаемых технологий является то, что осуществление их предполагается с использованием имеющихся систем электроснабжения. Перед удаленными мини-фермами стоит проблема применения этих технологий на том же техническом уровне в отсутствие стационарных систем электроснабжения. Решением является использование базового источника дизельных электростанций (ДЭС) или ВО РВЭУ. В качестве примера решения этой проблемы были выбраны мини-фермы молочного направления на 10 дойных коров с наиболее полной технологией производства молока. Был проведен полный анализ энергопотребления устройствами и механизмами в технологических процессах, из которого (годовое потребление составило 7213,5 кВт·ч), выделены в отдельные группы механизмы и процессы, функционирующие только на электрической энергии с использованием энергии АКБ (769,785 кВт·ч), и механизмы, которые могут работать за счет механической энергии вращающегося вала ВО ДРВЭУ с ККВП (5640,71 кВт·ч), а также процесс доения (803 кВт·ч) за счет ДЭС.

В технологии функционирования мини-ферм наиболее приемлемым для определения эффективности является сравнительный метод рекомендуемых способов энергоснабжения.

С учетом жизненного цикла проекта 10 лет и роста цен на топливо с учетом годовой инфляции 5 % с 2021 по 2030 г. прогностический расчет себестоимости 1 кВт·ч по вариантам: I – 55 % ВЭУ + 45 % ДЭС; II – 70 % ВО ДРВЭУ + 30 % ДЭС и III – 100 % ДЭС, в виде графика представлен на рисунке 25, из которого видно, что средняя себестоимость 1 кВт·ч с учетом 10 лет эксплуатации составит по вариантам 55 % ВЭУ + 45 % ДЭС – 29,44 руб/кВт·ч, 70 % ВО ДРВЭУ + 30 % ДЭС – 22,39 руб/кВт·ч и 100 % ДЭС – 42,13 руб/кВт·ч.

Для осуществления технологии производства молока на мини-ферме на 10 коров при стоимости 1 кВт·ч 5,5 руб. годовая оплата электроэнергии от сетевой системы энергоснабжения составит 39 674,25 руб., а в себестоимости одного литра молока (24 руб/л) стоимость электроэнергии составит 0,66 руб/л. То есть без учета стоимости электроэнергии себестоимость равна 23,34 руб/л.

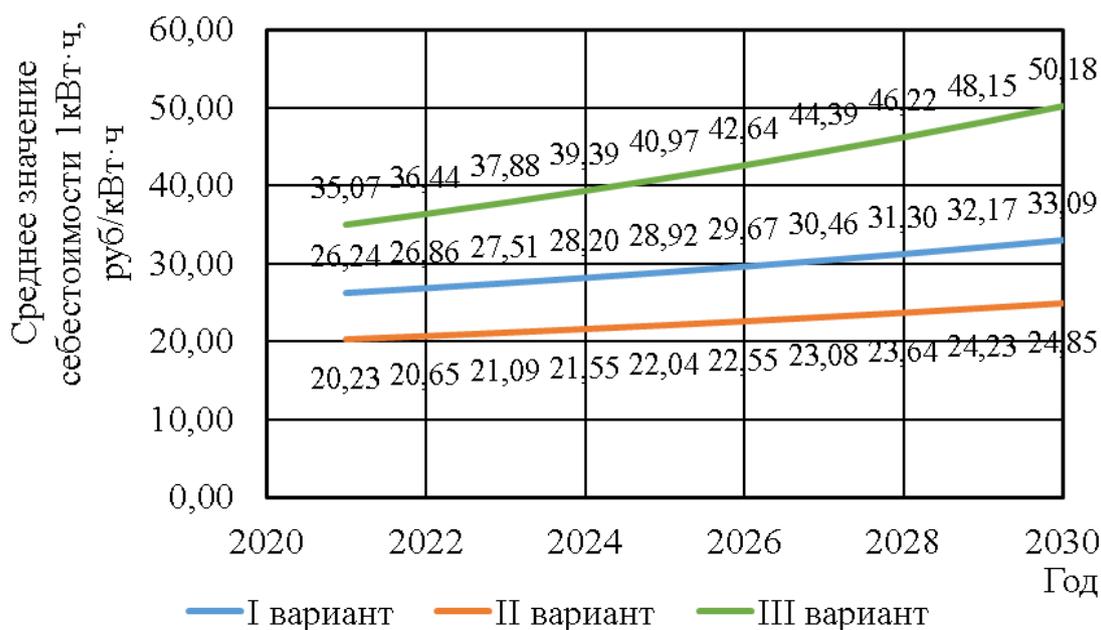


Рисунок 25 – Прогнозирование себестоимости 1 кВт·ч с учетом инфляции с 2021 по 2030 г. по вариантам энергоснабжения: I – 55 % ВЭУ + 45 % ДЭС; II – 70 % ВО ДРВЭУ + 30 % ДЭС; III – 100 % ДЭС

По I варианту (55 % ВЭУ + 45 % ДЭС) стоимость электроэнергии на производство 1 литра молока – 3,54 руб/л, а себестоимость молока – 26,88 руб/л. Для II варианта (70 % ВО ДРВЭУ + 30 % ДЭС) удорожание производства молока составит 2,69 руб/л, а себестоимость – 26,03 руб/л. При использовании только базового источника ДЭС стоимость электроэнергии на производство 1 литра молока – 5,07 руб/л, а себестоимость молока – 28,41 руб/л. Разница в себестоимости одного литра по II и III вариантам равна 2,38 руб./л. Годовая экономия по себестоимости на производство молока с применением варианта 70 % ВО ДРВЭУ + 30 % ДЭС по сравнению со 100 % ДЭС равна 142 800 руб., а окупаемость затрат составит 2,12 года.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ состояния энергообеспечения, в том числе удаленных децентрализованных сельскохозяйственных энергопотребителей, показывает необходимость внедрения в систему энергоснабжения возобновляемых источников энергии, которые могут служить автономными источниками для экономии органического топ-

лива. Проблема энергообеспечения сельскохозяйственных потребителей, удаленных от системы энергоснабжения, может быть решена в том числе за счет использования вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок.

2. Проведённые теоретические исследования и аналитические расчеты вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок показали следующее:

– определены рациональные конструктивные параметры рабочих лопастей по отношению к радиусу ротора, длина хорды лопасти $l_{\text{хор}} = 1,1 R_{\text{вн}}$; радиус закругления поверхности лопастей $R_{\text{л}} = 0,56 R_{\text{вн}}$; радиус закругления $R_{\text{л}}$ и длина хорды $l_{\text{хор}}$ определяют длину дуги l лопасти; высота полученного сегмента $h_{\text{сегм}}$ и угол α раскрытия лопасти 18° ;

– при расчетной скорости ветра 9 м/с максимальную теоретическую мощность развивает трехлопастной ротор с коэффициентом использования энергии ветра, равным 0,22;

– применение потокоформирующих элементов роторных двигателей для районов со среднегодовой скоростью ветра от 4 до 5 м/с позволит увеличить мощность роторного ветродвигателя.

3. Проведенные лабораторные испытания на моделях ротора и кольцевого концентратора воздушного потока, подтверждают результаты теоретических исследований о том, что модель ротора с тремя лопастями является наиболее эффективной по сравнению с ротором с двумя и четырьмя лопастями.

4. В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований были выработаны технические критерии конструкции вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок:

– конструкция должна иметь опорную ферму не менее чем с тремя опорными стойками и двумя опорными площадками для крепления вала ротора;

– для многороторной установки опорная ферма должна иметь количество ячеек, равное количеству роторов;

– валы всех роторов многороторных ветродвигателей соединяются через эластичную муфту и должны быть смещены относительно друг друга на угол, кратный количеству роторов.

Для повышения эффективности работы вертикально-осевой роторной ветроэнергетической установки разработаны следующие технические средства:

– пружинная муфта, соединяющая вал ветродвигателя с рабочими машинами, облегчает запуск в работу как механизмов привода, так и электрогенератора и позволяет установке устойчиво работать при скорости ветра от 2 м/с.

– электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей с параллельной зарядки на последовательно-параллельную – позволяющее увеличить использования энергии ветра в широком диапазоне его изменения.

5. Натурные испытания опытного образца вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки, по разработанной методике для определения технических характеристик ветродвигателя в режиме рабочего времени позволили получить следующие результаты:

– при скорости ветра 4 м/с мощность установки составляет 0,051; при 9 м/с – 0,751; при 16 м/с – 3,382 кВт;

– при скорости ветра 9 м/с получен коэффициент использования энергии ветра 0,21.

Использование механической энергии вращающегося вала вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки в агрегате с саморегулирующимся гидромеханическим нагревателем воды позволяет при скорости ветра 5 м/с нагревать массу воды 200 кг от 20 до 90°С за 138 часов, а при скорости ветра 9 м/с – за 23 часа.

6. В результате проведенных теоретических и лабораторных испытаний выработано основное требование к конструкции кольцевого концентратора воздушного потока, состоящие из шести плоских вертикальных направителей, соединённых между собой верхним и нижним усеченными конусными поверхностями.

Испытания вертикально-осевой двухроторной ветроустановки с кольцевым концентратором воздушного потока, показали увеличение мощность при скорости ветра 2 м/с на 28, при 4 м/с на 30, при 6 м/с на 27, при 9 м/с на 25, при 12 м/с на 18 %.

7. Научно обоснованы потребности в электроэнергии для мини-фермы на 10 дойных коров и объём её выработки ветроэнергетическими установками, работающих совместно с дизельной электростанцией, для регионов России со среднегодовыми скоростями ветра от 4 м/с. Определены технико-экономические показатели, разработанной вертикально-осевой двухроторной ветроэнергетической установки

с кольцевым концентратором воздушного потока. Эффективность от ее приобретения по сравнению с использованием дизельной электростанцией за 10 лет составляет 1 428 тыс. руб. при сроке окупаемости 2,12 года.

Рекомендации производству

Для успешного функционирования сельскохозяйственного производства обособленных товаропроизводителей, находящихся на значительном удалении от систем энергоснабжения на территориях Российской Федерации со среднегодовой скоростью ветра не менее 4 м/с, следует использовать следующие разработки:

- материалы по обоснованию оптимальных параметров ротора ветродвигателя и кольцевого концентратора воздушного потока;
- номограмму для определения мощностных и эксплуатационных параметров ВО ДРВЭУ с кольцевым концентратором воздушного потока;
- пружинную муфту для запуска ВО РВЭУ при малой скорости ветрового потока и расширения пределов ее использования;
- саморегулирующийся гидродинамический нагреватель в агрегате с ВО ДРВЭУ для нагрева воды;
- электронные устройства для попарно-параллельной зарядки АКБ.

Перспективы дальнейшей разработки темы

При дальнейшей разработке темы следует:

- обосновать новую систему технологических машин с универсальным приводом от электрической и механической энергии с учетом потребляемых мощностей в технологиях производства сельскохозяйственной продукции;
- разработать системы автоматизации управления потоками мощности ВО РВЭУ при работе технологических машин.

Основные результаты исследования отражены в следующих публикациях:

Статьи, опубликованные в изданиях, индексируемые в международных базах цитирования WoS, Scopus, Springer, Agris:

1. Determination of energy characteristics of two-rotor wind power installation [Text] / V. A. Alekseenko, Y. I. Gevora, D. A. Sidelnikov, A. A. Pluzhnikova // 19th International Scientific Conference: Engineering for rural development Proceedings. – Latvia University of Life Sciences and Technologies – 2020. – V. 19. – Pp. 1152–1156. DOI:10.22616/ERDev.2020.19.TF279

2. The Milking Unit Adapted to the Physiological Requirements for Machine Milking of Cows [Text] / I. V. Kapustin, E. I. Kapustina, D. I. Gritsay et al. // The Challenge of Sustainability in Agricultural Systems. – Springer Science and Business Media Deutschland GmbH – 2020. – V. 2. – Pp. 1011–1020. DOI:10.1007/978-3-030-72110-7_111.

3. Wind power plants functioning model in the power supply system [Text] / S. Kapov, V. Alekseenko, D. Sidelnikov et al. // Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing Ltd – 2020. – V. 1001(1). Article Number 012033. DOI:10.1088/1757-899X/1001/1/012033.

Публикации в ведущих изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

4. Измерительный комплекс для испытания ветроэнергетических установок [Текст] / В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин, Ю. И. Жевора, И. И. Газизов // Сельский механизатор. – 2019. – № 11. – С. 24–26.

5. Исследование роторного ветродвигателя при различном числе лопастей и их расположении [Текст] / В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин, В. А. Иноценко, И. И. Швецов // Сельский механизатор. – 2019. – № 4. – С. 42–43.

6. Обоснование мощности электрогенератора роторной ветроэнергетической установки на молочных фермах [Текст] / В. А. Алексеенко, Д. И. Грицай, А. А. Плужникова, В. А. Халюткин // Сельский механизатор. – 2019. – № 11. – С. 16–18.

7. Алексеенко, В. А. Роторный ветродвигатель [Текст] / В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин, И. Б. Юров // Сельский механизатор. – 2013. – № 7. – С. 30–31.

8. Алексеенко, В. А. Роторный ветродвигатель для фермерских хозяйств [Текст] / В. А. Алексеенко, А. А. Плужникова, В. А. Халюткин // Сельский механизатор. – 2018. – № 4. – С. 18–19.
9. Алексеенко, В. А. Управление работой системы энергоснабжения роторной ветроэнергетической установки [Текст] / В. А. Алексеенко, А. А. Плужникова, В. А. Халюткин // Сельский механизатор. – 2018. – № 5. – С. 26–27.
10. Алексеенко, В. А. Функциональная схема энергоснабжения молочных мини-ферм [Текст] / В. А. Алексеенко, Д. И. Грицай, Д. А. Сидельников // Сельский механизатор. – 2020. – № 11. – С. 14–15.
11. Экономическая эффективность применения роторной ветроэнергетической установки на мини-фермах молочного направления [Текст] / В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин, Д. И. Грицай и др. // Сельский механизатор. – 2019. – № 9. – С. 28–33.
12. Потребность в электроэнергии на удаленных молочных мини-фермах [Текст] / А. А. Плужникова, Р. Ю. Мерзликин, В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин // Сельский механизатор. – 2018. – № 4. – С. 16–17.
13. Алексеенко, В. А. Роторная ветроэнергетическая установка греет воду для мини-ферм [Текст] / А. А. Плужникова, В. А. Алексеенко, В. А. Халюткин // Сельский механизатор. – 2018. – № 4. – С. 22–23.
14. Комплексное использование энергии солнца и ветра [Текст] / В. А. Халюткин, М. А. Мастепаненко, В. А. Алексеенко, А. А. Плужникова // Сельский механизатор. – 2017. – № 1. – С. 40–41.
15. Усовершенствование ветроэнергетической установки [Текст] / В. А. Халюткин, В. А. Алексеенко, Д. И. Грицай, Д. А. Сидельников // Сельский механизатор. – 2019. – № 4. – С. 44–45.
16. Роторная ветроэнергетическая установка [Текст] / В. А. Халюткин, И. В. Атанов, М. А. Мастепаненко, В. А. Алексеенко // Сельский механизатор. – 2017. – № 1. – С. 30–31.
17. Исследование влияния концентратора воздушного потока на энергетические показатели модели вертикально-осевого роторного ветродвигателя

[Текст] / В. А. Алексеенко, Д. А. Сидельников, С. Н. Капов и др. // Вестник аграрной науки Дона. – 2020. – № 3 (51). – С. 87–92.

В монографиях:

18. Халюткин, В. А. Роторные ветроэнергетические установки для удаленных энергопотребителей. Экология и технико-экономические особенности использования [Текст] / В. А. Халюткин, В. А. Алексеенко // – Ставрополь : АГРУС Ставропольского гос. аграрного ун-та, 2017. – 104 с. ISBN 978-5-9596-1293-1.

Патенты РФ:

19. Патент № 2572356 РФ МПК7 F03D3/02, F03D3/04, F03D11/00. Роторный ветродвигатель с кольцевым концентратором воздушного потока [Текст] / Алексеенко В. А., Халюткин В. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО Ставропольский ГАУ. – № 2014146331/06 ; заявл. 18.11.2014 ; опубл. 10.01.2016, Бюл. № 1.

20. Патент № 2585482 РФ МПК G01L3/00. Устройство для измерения крутящего момента, скорости вращения вала и мощности на валу [Текст] / Халюткин В. А., Алексеенко В. А., Ульянов А. П., Красов П. С. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – № 2015110018/28/ ; заявл. 20.03.2015 ; опубл. 27.05.2016, Бюл. № 15.

21. Патент № 2639930 РФ МПК F16D 51/00. Пружинная муфта [Текст] / Халюткин В. А., Алексеенко В. А., Плужникова А. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – № 2016140955 ; заявл. 18.10.2016 ; опубл. 25.12.2017, Бюл. № 03.

22. Патент № 2649908 РФ МПК H01H 51/06. Электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей [Текст] / Плужникова А. А., Алексеенко В. А., Халюткин В. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – № 2017119811 ; заявл. 06.06.2017 ; опубл. 05.04.2018, Бюл. № 10.

23. Патент № 2698868 РФ МПК F03D3/02, F03D3/04. Роторный ветродвигатель [Текст] / Халюткин В. А., Алексеенко В. А., Иноценко В. А. ; заявитель и

патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – № 2019100171 ; заявл. 09.01.2019 ; опубл. 30.08.2019, Бюл. № 25.

24. Патент № 2705796 РФ МПК H01H 51/06, H01M 10/44, H02J 7/00. Электромагнитное реле для переключения аккумуляторных батарей с параллельной на попарно-параллельную зарядку [Текст] / Алексеенко В. А., Халюткин В. А. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО Ставропольский ГАУ. – № 2019115522; заявл. 21.05.2019 ; опубл. 12.11.2019, Бюл. № 32.

А также 15 публикаций в других изданиях.