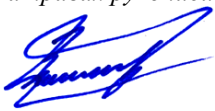
*На правах рукописи*



**ВАСИЛЬЕВ ВАЛЕРИЙ ЮРЬЕВИЧ**

# РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

Специальность 4.3.2 – Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса

**АВТОРЕФЕРАТ**
**диссертации на соискание ученой степени**
**кандидата технических наук**

Барнаул – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (ФГБОУ ВО АлтГТУ им. И.И. Ползунова)

| | |
|---|---|
| Научный руководитель | **Компанеец Борис Сергеевич,** кандидат технических наук, доцент |
| Официальные оппоненты: | **Русина Анастасия Георгиевна,** доктор технических наук, профессор, декан факультета энергетики ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет.<br>**Чебодаев Александр Валериевич,** кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой Электроснабжения сельского хозяйства ФГБОУ ВО «Красноярский государственный аграрный университет». |
| Ведущая организация: | Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Югорский государственный университет», г. Ханты-Мансийск. |

Защита состоится «20» ноября 2026 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 24.2.315.04, при ФГБОУ ВО "Кемеровский государственный университет", по адресу: 650056, г. Кемерово, бульвар Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-24-2-315-04/protects/.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 650000, г. Кемерово, ул.Красная, 6

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 24.2.315
д-р тех. наук, доцент — Горелкина Алена Константиновна

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** В соответствии со Стратегией развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года приоритетными задачами по усовершенствованию АПК России являются: стимулирование объемов производства сельскохозяйственной продукции, развитие мощностей хранения и переработки сельскохозяйственного сырья. Решение указанных задач требует повышения энергоемкости объектов сельского хозяйства, что впоследствии может привести к росту пиковых нагрузок и усилению суточных колебаний потребления электроэнергии. Как следствие, возникает необходимость увеличения генерирующих мощностей в сельских электрических сетях, что может стать серьезным вызовом для развития агропромышленного комплекса.

Одним из наиболее перспективных способов обеспечения выработки электроэнергии в сельских электрических сетях является применение собственной генерации на базе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), в частности энергии ветра, что подчеркивается Доктриной энергетической безопасности России и Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2050 года. Особое внимание к ВИЭ связывают со многими причинами, в том числе со снижением качества минерально-сырьевой базы.

Целесообразность использования объектов ветроэнергетики для энергоснабжения потребителей напрямую зависит от оценки выработки ветрогенератора. В зависимости от полученных результатов происходит определение оптимальных технических параметров ветроэнергетической установки (ВЭУ), которые позволяют с наименьшими затратами обеспечить потребителя необходимым количеством электроэнергии. В общепринятом подходе к расчету параметров ВЭУ зачастую динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров, включающей атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха, считается незначительным, а их значения принимаются за усредненные статичные величины. В то же время в реальных условиях их значения динамичны. Таким образом, общепринятый подход к оценке выработки ветрогенератора может приводить к повышению ошибки определения прогнозируемого количества вырабатываемой электроэнергии, что негативно сказывается на результатах поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетических установок и способности активных энергетических комплексов (АЭК), в том числе в АПК, обеспечивать собственные нужды в электроэнергии.

Комплексный анализ существующих подходов к оценке энергетического потенциала ветроэнергетических установок указывает на необходимость разработки новых моделей и методик расчетов объемов генерируемой электроэнергии, учитывающих динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров. Их внедрение позволит существенно повысить точность расчета выработки электроэнергии и оптимизировать технические параметры ветроэнергетической установки, что поспособствует повышению

эффективности ее работы и обеспечению рационального использования ресурсов АПК, в том числе ветроэнергетических.

Таким образом, развитие и внедрение новых моделей и методик расчета электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, является актуальной на сегодняшний день темой исследования.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с мероприятиями по обеспечению выполнения основных задач Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 8 сентября 2022 г. N 2567-р с изменениями на 7 февраля 2025 г.), Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года (утверждена Распоряжением Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. № 908-р), Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации (утверждена Указом Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216).

**Степень разработанности темы.** Большой вклад в развитие общей ветроэнергетики и моделирования работы ветроэнергетических установок внесли многие ученые, среди которых П.П. Безруких, В.В. Елистратов, Н.В. Зубова, А.Ю. Лаврик, Б.В. Лукутин, В.З. Манусов, Б.А. Соловьев, Э.В. Оганесян, В.Я. Федянин, G.A. Abbas, G. Edwards, M. Enomoto, K.A. Singh, R.R. Singh, M. Xiaomei и другие. Основная часть авторов исследует различные зависимости, связывающие величину электрической мощности, генерируемой ветроэнергетическими установками, с метеорологическими параметрами. Большое число работ посвящено созданию методов, алгоритмов и математических моделей, позволяющих строить более точные прогнозы значений скорости ветра в анализируемые периоды времени. Однако в рассматриваемой области до сих пор остается много нерешенных проблем, актуальных для электроснабжения агропромышленного комплекса, в том числе с использованием ветровых энергоресурсов.

Анализ подходов к расчету ветровых энергоресурсов и моделированию работы энергоустановок на базе энергии ветра показал, что общепринятые математические модели оценки энергетического потенциала местности и, следовательно, работы ветрогенераторов, не учитывают динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров на энергию ветрового потока. В результате расчетов может происходить снижение точности оценки ветровых энергоресурсов и моделирования работы энергоустановок на базе энергии ветра, вследствие чего существует вероятность выбора значений технических параметров ВЭУ, при которых эксплуатация проектируемого объекта не позволяет рационально использовать ресурсы, в том числе ветроэнергетические, что характеризует данное направление исследования как недостаточно проработанное.

**Целью диссертационного исследования** является разработка методики оптимизации технических параметров ветроэнергетической установки с учетом динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, в

том числе атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, на ветровые энергоресурсы для повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК.

Для достижения цели диссертационного исследования необходимо решить следующие **задачи**:

1. Провести анализ современных подходов к оценке электрической энергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками, и определению оптимальных значений технических параметров ВЭУ.
2. Разработать математическую модель оценки ветровых энергоресурсов, учитывающую динамическое влияние атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока.
3. Разработать математическую модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока.
4. Разработать алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для рационального использования ветровых энергоресурсов и повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК.

**Объект исследования** – процесс генерации электроэнергии на основе энергии ветра.

**Предмет исследования** – зависимость объема выработки электроэнергии и значений технических параметров ветроэнергетической установки от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха

**Методология и методы исследования.** В рамках проведенного исследования при решении поставленных задач использовались теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические методы исследования, используемые в данной диссертационной работе, опираются на фундаментальные законы теоретических основ электротехники, аэродинамики, общей физики и методы компьютерного и физического моделирования.

Для обоснования применимости результатов диссертационного исследования проводились как теоретические, так и экспериментальные исследования, в том числе с применением экспериментального комплекса для изучения работы ветроэнергетической установки в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров.

**Научная новизна** заключается в следующем.

1. Разработана математическая модель оценки ветровых энергоресурсов, отличающаяся учетом динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока, что позволяет повысить точность прогнозирования энергетического потенциала местности на величину до 6,91% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом.
2. Разработана математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока, отличающаяся

использованием удельной мощности ветрового потока в качестве критерия определения рабочей зоны ветрогенератора, что позволяет снизить ошибку при проведении оценки годовой выработки ветроэнергетической установки на величину до 18,07% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом.

3. Разработан алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для рационального использования ветровых энергоресурсов и повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК, отличающийся применением математической модели работы ветрогенератора при расчете электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой с заданными характеристиками в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, что может позволить добиться обеспечения потребности в электроэнергии при снижении значений ометаемой площади ветроколеса на величину до 74%.

**Теоретическая значимость работы.** Обоснована необходимость учета динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на ветровые энергоресурсы местности для повышения точности математических моделей их расчета и моделирования работы энергоустановок на базе энергии ветра.

Произведено совершенствование существующих методов и алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки.

**Практическую значимость работы.** Разработан программный комплекс обработки данных для многофакторной оценки ветровых энергоресурсов «ОДОВЭР» (свидетельство о государственной регистрации № 2024613439 опубл. 01.03.2024), который может применяться для оптимизации значения ометаемой площади ветроколеса в процессе разработки проекта электроснабжения потребителей с использованием энергии ветра, а также повышения точности прогнозирования выработки ветрогенератора при его применении в конкретной местности. Сформированы база данных «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0_01 в условиях изменяющейся относительной влажности окружающего воздуха» (свидетельство о государственной регистрации № 2025621910 опубл. 28.04.2025), база данных «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0_01 в условиях изменяющегося атмосферного давления» (свидетельство о государственной регистрации № 2025622041 опубл. 12.05.2025), которые могут быть использованы для определения энергетического потенциала ветроэнергетических установок. Результаты диссертационного исследования использованы при реализации курса практических занятий дисциплины Б1.В.7 «Возобновляемая энергетика в системах электроснабжения» и в тематиках выпускных квалификационных работ по направлениям подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», а также для расчета оптимальных значений технических

параметров ветроэнергетической установки для электроснабжения КФХ А.И. Макаренко и С.Б. Компанеец.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.**

Исследование, проводимое в рамках настоящей диссертационной работы, соответствует паспорту научной специальности ВАК РФ 4.3.2 «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса» в части области исследований:

8. Способы и технические средства передачи и распределения электроэнергии, принципы построения сельских электрических сетей и их компонентов, надежность и качество электроснабжения, средства мониторинга, автоматизации и интеллектуализации электроснабжения.

9. Энергоустановки, электростанции и энергетические комплексы на базе возобновляемых видов энергии для объектов АПК и социальной сферы на селе.

11. Прогноз потребности, развития и состояния энергоресурсов и их потребителей в АПК, мероприятия по их рациональному использованию. Анализ эволюции технических средств и электротехнологий в энергообеспечении АПК. Технико-экономические основы стандартизации по энергообеспечению объектов АПК и социальной сферы на селе.

**Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается** применением современной сертифицированной измерительной аппаратуры, а также соответствием результатов математического моделирования и лабораторных экспериментов.

**На защиту выносятся следующие основные положения.**

1. Математическая модель оценки ветровых энергоресурсов, отличающаяся учетом динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока, что позволяет повысить точность прогнозирования энергетического потенциала местности на величину до 6,91% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом.

2. Математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока, отличающаяся использованием удельной мощности ветрового потока в качестве критерия определения рабочей зоны ветрогенератора, что позволяет снизить ошибку при проведении оценки годовой выработки ветроэнергетической установки на величину до 18,07% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом.

3. Алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для рационального использования ветровых энергоресурсов и повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК, отличающийся применением математической модели работы ветрогенератора при расчете электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой с заданными характеристиками в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров,

что может позволить добиться обеспечения потребности в электроэнергии при снижении значений ометаемой площади ветроколеса на величину до 74%.

**Апробация работы.** Выносимые на защиту положения и основные результаты диссертационной работы представлялись и обсуждались на 8 Всероссийских и Международных научно-практических конференциях, среди которых: 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (Сочи, 2023), XX и XXI Всероссийские научно-технические конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (Барнаул, 2023-2024), Всероссийская научно-техническая конференция «Развитие энергетики Алтайского края и актуальные вопросы энергоснабжения, повышения энергетической эффективности и внедрения новых технологий» (Барнаул, 2022), XVI Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения» (Уфа, 2022), Международная студенческая научная конференция «Горинские чтения. Инновационные решения для АПК» (Майский, 2023), XXII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов, с международным участием в г. Нерюнгри, посвященная 30-летнему юбилею Технического института (филиала) СВФУ им. М.К. Амосова (Якутск, 2022), XV Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых «Россия молодая» (Кемерово, 2023).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы отражены в 18 опубликованных печатных работах, в том числе: одной публикации в издании, индексируемом в международной базе данных Scopus; трех статьях в научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ, из которых две опубликованы по научной специальности ВАК РФ 4.3.2 «Электротехнологии, электрооборудование и энергоснабжение агропромышленного комплекса»; одном свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ; двух свидетельствах о государственной регистрации баз данных; а также 11 публикациях в других научных изданиях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников из 109 наименований и приложений. Работа изложена на 125 листах машинописного текста, включая список использованных источников, содержит 11 таблиц и 36 рисунков. Общий объем приложений – 12 листов машинописного текста. Приложения содержат шесть рисунков и шесть таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы актуальность и цель работы, отражены ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Сформулированы цель и задачи исследования. Изложены основные положения диссертации, выносимые на защиту, приведены сведения о степени достоверности, реализации и апробации основных результатов работы.

**В первой главе** представлен анализ вопроса развития технологий ветроэнергетики и их роль в обеспечении реализации процессов

агропромышленного комплекса (АПК). На основании Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года сделан вывод о необходимости повышения уровня энергообеспечения потребителей в сельских электрических сетях. Приведена классификация потребителей АПК по назначению и характеру нагрузки и по категориям надежности энергоснабжения.

В качестве примера объектов производства, хранения и переработки сельхозпродукции рассмотрен зерноток с зерноочистительной установкой РВС-40, для которого определены ориентировочные характер нагрузки и график потребления электроэнергии.

Для увеличения генерирующих мощностей в сельских электрических сетях и обеспечения собственного электроснабжения объектов АПК предложено применение ветроэнергетических установок (ВЭУ) в качестве источника электроэнергии. Приведено пояснение структуры активного энергетического комплекса, в состав которого входит ВЭУ, генератор, накопители электроэнергии и инвертор.

Проведен анализ подходов к оценке электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой, и выбора технических параметров ВЭУ, по итогам которого выявлено отсутствие учета динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, включающей атмосферное давление, температуру и относительную влажность воздуха, на удельную мощность ветрового потока. Как следствие, общепринятые подходы могут иметь следующие недостатки, влияющие на эффективность работы ВЭУ и рациональное использование ресурсов АПК, в том числе ветроэнергетических:

– при расчете ветроэнергетического потенциала местности возможно снижение точности прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов;

– при моделировании работы ветрогенератора возможно увеличение ошибки расчетов электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ;

– возможно возникновение ошибки при определении значений технических параметров ветроэнергетической установки, в частности номинальной мощности генератора и ометаемой площади ветроколеса, вследствие ошибки при моделировании работы ВЭУ и оценке электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой за расчетный период времени.

Следовательно, актуальным на сегодняшний день направлением исследований является разработка нового подхода к оценке ветроэнергетического потенциала, позволяющего производить расчеты мощности ветрового потока и количества электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором с учетом динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров. Кроме того, необходима разработка новых математических моделей, позволяющих производить более точное моделирование работы ветроэнергетической установки, а также алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ВЭУ.

**Во второй главе** представлены результаты исследования влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на

ветровые энергоресурсы местности. Получена математическая модель оценки состояния ветровых энергоресурсов в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров. Произведена дифференциальная оценка влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока.

Согласно общепринятому подходу к оценке ветровых энергоресурсов местности, расчет удельной мощности ветрового потока производится при среднестатистических значениях плотности воздуха зоны потенциального размещения ветрогенератора. Использование таких моделей не позволяет учесть динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров на удельную энергию ветрового потока. Для решения данной проблемы разработана математическая модель оценки ветровых энергоресурсов местности в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, представленная уравнением (1).

$$W_{уд}(t) = \int_0^t N_{уд}(t)dt = \int_0^t \left( \frac{P_{атм}(t) - 2{,}315 \cdot \varphi(t) \cdot \mathrm{e}^{\left(\frac{\alpha \cdot (T(t) - 273{,}15)}{\beta + T(t) - 273{,}15}\right)}}{573{,}8 \cdot T(t)} \cdot v^3(t) \right) dt, \qquad (1)$$

где $N_{уд}$ – удельная мощность ветрового потока, Вт;

$P_{атм}$ – атмосферное давление, Па;

T – температура воздуха, °C;

φ – относительная влажность воздуха, %;

v – скорость ветра, м/с;

t – интервал времени, соответствующий анализируемому периоду, с.

Адекватность разработанной модели подтверждена экспериментальными исследованиями. Во время проведения опытов произведено измерение мощности $N_{эксп}$, генерируемой экспериментальной установкой, при фиксированном значении атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Экспериментальные значения сравнивались с результатами расчета теоретических значений мощности, вырабатываемой ветрогенератором, в соответствии с разработанной математической моделью ($N_{дин}$) и общепринятым подходом ($N_{оп}$) при помощи уравнений (2) и (3) соответственно.

$$N_{дин} = \frac{P_{атм} - 2{,}315 \cdot \varphi \cdot \mathrm{e}^{\left(\frac{\alpha \cdot (T - 273{,}15)}{\beta + T - 273{,}15}\right)}}{573{,}8 \cdot T} \cdot v^3 \cdot S_{вк} \cdot \xi \cdot \eta, \qquad (2)$$

ξ – коэффициент использования энергии ветра;

η – коэффициент полезного действия ветрогенератора;

$S_{вк}$ – ометаемая площадь ветроколеса, м$^2$.

$$N_{оп} = \frac{\rho_{ср}}{2} \cdot v_{сср}^3 \cdot S_{вк} \cdot \xi \cdot \eta = \frac{1{,}246}{2} \cdot 9^3 \cdot 0{,}018 \cdot 0{,}32 = 2{,}616 \text{ Вт}, \qquad (3)$$

где $\rho_{ср}$ – среднестатистическая плотность воздуха в городе Барнауле;

$v_{стр}$ – среднестатистическая скорость ветра с учетом функции распределения по градациям, м/с.

Для количественной оценки точности математических моделей проведен сравнительный анализ результатов расчетов генерируемой мощности. Результаты исследования приведены в таблице 1 и на рисунках 1-3.

Таблица 1 – Данные для сравнительного анализа точности математической модели оценки ветроэнергетических ресурсов

| Критерий | N=f(T) | | N=f($P_{атм}$) | | N=f(φ) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $N_{ОП}$ | $N_{дин}$ | $N_{ОП}$ | $N_{дин}$ | $N_{ОП}$ | $N_{дин}$ |
| $\overline{\Delta_{расч}}$, Вт | 0,12 | 0,02 | 0,09 | 0,019 | 0,12 | 0,02 |
| $S_{Nрасч}$, % | 0,13 | 0,03 | 0,09 | 0,022 | 0,12 | 0,02 |
| $\overline{\delta_{расч}}$, % | 4,89 | 0,92 | 3,58 | 0,76 | 4,78 | 0,84 |
| $\delta_{расч.мин}$, % | 1,24 | 0 | 2,39 | 0,04 | 3,24 | 0,08 |
| $\delta_{расч.макс}$, % | 8,91 | 2,26 | 6,56 | 1,55 | 6,78 | 2,16 |

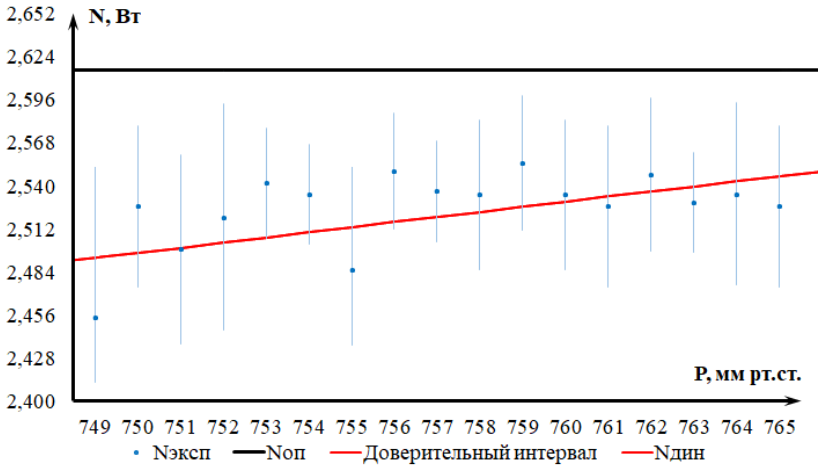



Рисунок 1 – Зависимости генерируемой мощности от атмосферного давления

По итогам сравнительного анализа результатов расчетов и экспериментальных измерений выяснено, что использование разработанной математической модели оценки ветровых энергоресурсов в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров позволяет повысить точность расчетов в среднем на величину 3,97%, а для отдельно взятых опытов возможно повышение точности на величину до 6,91% относительно общепринятой математической модели.

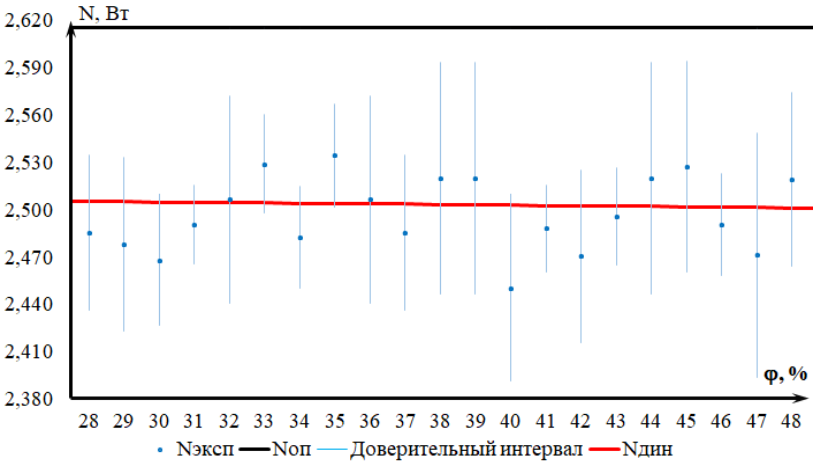



Рисунок 2 – Зависимость генерируемой мощности от относительной влажности воздуха

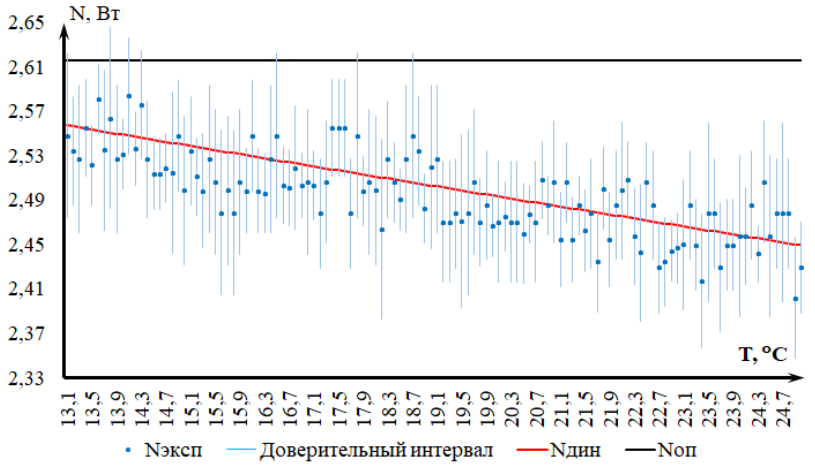



Рисунок 3 – Зависимость генерируемой мощности от температуры

Для оценки значимости факторов математической модели оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на основе уравнения (1) составлены функции зависимости удельной мощности ветрового потока от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. По результатам исследования выяснено, что температура и атмосферное давление вносят значимый вклад в изменение величины удельной мощности ветрового потока ($\delta N(T) \in [31{,}58; 34{,}43]\%$; $\delta N(P_{атм}) \in [7{,}71; 7{,}91]\%$). Относительная влажность воздуха может являться значимым либо незначимым фактором в

зависимости от значений температуры и атмосферного давления ($\delta N(\varphi) \in [0{,}01;\ 2{,}16]\%$).

**В третьей главе** приводится разработанная математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на мощность ветрового потока, что достигается путем использования удельной мощности ветрового потока в качестве критерия определения рабочей зоны ветрогенератора и позволяет повысить точность расчета электроэнергии, генерируемой ветроэнергетической установкой за счет снижения ошибки при определении рабочей зоны на энергетической характеристике ветрогенератора.

В соответствии с общепринятым подходом к моделированию рабочих процессов ВЭУ работу ветрогенератора можно описать следующей математической моделью

$$\text{при } t_i \in [t_{i-1}; t_i]\ W_i(t) = \begin{cases} 0, \text{ при } v(t) < v_0; \\ \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left( \dfrac{\rho_{ср} \cdot v_i^3(t)}{2} \cdot S_{вк} \cdot \eta \cdot \xi \right) dt, \text{ при } v_0 \le v(t) < v_{ном}; \\ N_{ном.ВЭУ} \cdot \tau, \text{ при } v_{ном} \le v(t) < v_{max}; \\ 0, \text{ при } v(t) \ge v_{max}. \end{cases} \quad (4)$$

где $v_0$ – стартовая скорость ВЭУ, м/с;

$v_{ном}$ – номинальная скорость ВЭУ, м/с;

$v_{max}$ – максимальная скорость ВЭУ, м/с;

$N_{ном.ВЭУ}$ – номинальная мощность ветрогенератора, Вт;

$\tau$ – время работы ветрогенератора, с.

При этом совокупная электроэнергия, вырабатываемая ветрогенератором за рассматриваемый период времени, определяется следующим образом

$$W_{ВЭУ} = \sum_{i=1}^{n} W_i \ , \quad (5)$$

где Wi – электроэнергия, вырабатываемая в i-тый промежуток времени, кВт·ч;

n – количество интервалов расчета электроэнергии.

Согласно результатам моделирования работы ветрогенератора, проведенного в соответствии с общепринятым подходом, при варьировании значения плотности воздуха переход энергетической характеристики ветрогенератора из одной рабочей зоны в другую происходит при различных значениях скорости ветра. Для моделируемой ВЭУ в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края ошибка определения точки перехода энергетической характеристики в зону работы ветрогенератора на номинальной мощности достигает значения 5,8%, а в зону остановки ВЭУ – 5,67%.

Таким образом, при расчете значения электроэнергии, генерируемой ВЭУ, в соответствии с общепринятым подходом возможно возникновение ошибки при

определении режима работы ветрогенератора, что может привести к ошибке в расчетах количества вырабатываемой электроэнергии.

Следовательно, моделирование работы ветрогенератора в соответствии с общепринятым подходом не позволяет достоверно определить диапазон работы ВЭУ. Для решения данной проблемы предлагается математическая модель работы ветрогенератора, в которой в качестве критерия определения рабочей зоны ветрогенератора используется удельная мощность ветрового потока, определяемая выражением

$$N_{уд} = \frac{P_{атм} - 2,315 \cdot \varphi \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T-273,15)}{\beta + T - 273,15}\right)}}{573,8 \cdot T} \cdot v^3. \quad (6)$$

При этом математическая модель работы ветрогенератора описывается следующей системой уравнений

$$\text{при } t_i \in [t_{i-1}; t_i]\ W_i(t) = \begin{cases} 0, \text{ при } N_{уд}(t) < N_{уд.0}; \\ \int_0^{t_\eta} (N_{уд}(t) \cdot S \cdot \xi \cdot \eta)\mathrm{d}t, \text{ при } N_{уд.0} \le N_{уд}(t) < N_{уд.ном}; \\ N_{ген.ном} \cdot \tau, \text{ при } N_{уд.ном} \le N_{уд}(t) < N_{уд.max}; \\ 0, \text{ при } N_{уд} \ge N_{уд.max}. \end{cases} \quad (7)$$

где $N_{уд.0}$ – стартовая удельная мощность ветрового потока, Вт;

$N_{уд.max}$ – максимальная удельная мощность ветрового потока, Вт;

$N_{уд.ном}$ – номинальная удельная мощность ветрового потока, Вт.

Исходя из математической модели работы ветрогенератора, точка выхода ветрогенератора на номинальную мощность определяется следующим образом

$$N_{уд.ном} = \frac{N_{ном.ВЭУ}}{\eta \cdot \xi \cdot S}. \quad (8)$$

Учитывая, что при изменении ометаемой площади ветроколеса изменяется значение $N_{уд}$, следовательно, и $N_{уд.ном}$, предположим, что существует значение максимальной эффективной ометаемой площади ветроколеса ($S_{max}$), при котором достигается максимально возможная выработка электроэнергии ВЭУ с заданными параметрами в климатических условиях анализируемой территории ($W_{max}$), описываемые уравнениями (9) и (10).

$$S_{max} = \frac{N_{ном.ВЭУ}}{N_{уд.0} \cdot \xi \cdot \eta}, \quad (9)$$

$$W_{max}(t) = \sum_{i=1}^{k} \left( \int_{t-1}^{t} N_{ном.ВЭУ} dt \right). \quad (10)$$

По результатам моделирования работы ВЭУ с использованием разработанной математической модели работы ветрогенератора в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края была построена

соответствующая энергетическая характеристика (рисунок 4), на которой отсутствует варьирование точки перехода из одной зоны в другую.

На основании математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, представленной системой уравнений (7), произведен расчет годовой выработки электроэнергии моделируемой ветроэнергетической установкой в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края, результаты которого приведены в таблице 2.

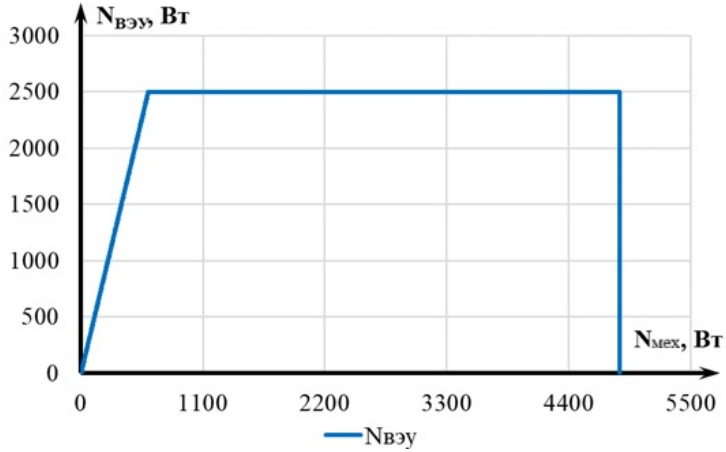



Рисунок 4 – Энергетическая характеристика для моделируемой ветроэнергетической установки в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края

Таблица 2 – Результаты математического моделирования работы ВЭУ в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края

| Год | $W_{дин.i}$, кВт·ч | $W_{ОП.i}$, кВт·ч | $\partial_W$, % |
|---|---|---|---|
| 2018 | 363,5 | 429,2 | 18,07 |
| 2019 | 307 | 354,5 | 15,47 |
| 2020 | 282,1 | 326,7 | 15,81 |
| 2021 | 260,4 | 295,1 | 13,33 |
| 2022 | 341,5 | 375,3 | 9,90 |
| 2023 | 305,8 | 354,6 | 15,96 |
| 2024 | 359,3 | 411,8 | 14,61 |
| 2025 | 256,4 | 299,9 | 16,97 |

По результатам сравнительного анализа моделирования работы ВЭУ с использованием общепринятой и разработанной математических моделей работы ветрогенератора использование математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров позволяет снизить ошибку в определении электроэнергии, генерируемой ВЭУ, до значений на величину 18,07%, что обусловлено уточнением границ

перехода энергетической характеристики ветрогенератора из одной зоны в другую, а также отсутствия вариативности энергетических характеристик.

Нормирование годовой выработки электроэнергии как случайной величины позволило путем применения функции Лапласа определить, что риск нахождения фактического значения вырабатываемой за год электроэнергии ниже 95%-ного доверительного интервала составляет приблизительно $(P(Z<-0,84)) \approx 0,20$, что соответствует риску 20%.

**Четвертая глава** посвящена разработке алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки, в частности ометаемой площади ветроколеса и номинальной мощности ветрогенератора, в основе которого лежит математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния группы метеорологических параметров. Приведен процесс поиска оптимальных значений технических характеристик ВЭУ. Произведена оценка технического результата от внедрения разработанного алгоритма.

Для рационального использования ресурсов, в том числе ветроэнергетических, предлагается решение задачи поиска оптимального значения ометаемой площади ветроколеса при условии обеспечения потребителя необходимым количеством электроэнергии

$$\begin{cases} S_{вк} \in (0, S_{\max}) \\ W_{потр} \le W_{ВЭУ} \\ W(t) = \sum_{i=1}^{n} W_i(t) \end{cases}. \quad (11)$$

Для решения поставленной задачи предложен алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки, основанный на определении количества генерируемой электроэнергии за расчетный период времени, с использованием математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического влияния группы метеорологических параметров (рисунок 5). Для практической реализации предлагаемого алгоритма разработан программный комплекс «ОДОВЭР» (свидетельство о регистрации № 2024615033 от 01.03.2024).

Практическое применение результатов диссертационного исследования произведено на примере поиска оптимальных значений технических параметров ВЭУ для обеспечения электроэнергией зерноочистительной установки РВС-40 со среднесуточной потребляемой мощностью 4,372 кВт в климатических условиях села Каип Ключевского района Алтайского края.

Для расчетов значений генерируемой электроэнергии использована база данных метеорологических параметров из открытых источников, в том числе база данных сайта ООО «Расписание Погоды». При расчетах вырабатываемой электроэнергии принято допущение о том, что $\eta \cdot \xi = 0,4$. В соответствии со среднестатистическим значением плотности воздуха стартовая удельная мощность ветрового потока (при стартовой скорости 3 м/с) составляет $N_{уд.0} = 17$ Вт,

максимальная удельная мощность ветрового потока (при максимальной скорости ветра $v_{max}$ = 18 м/с) $N_{уд.max}$ = 3665 Вт.

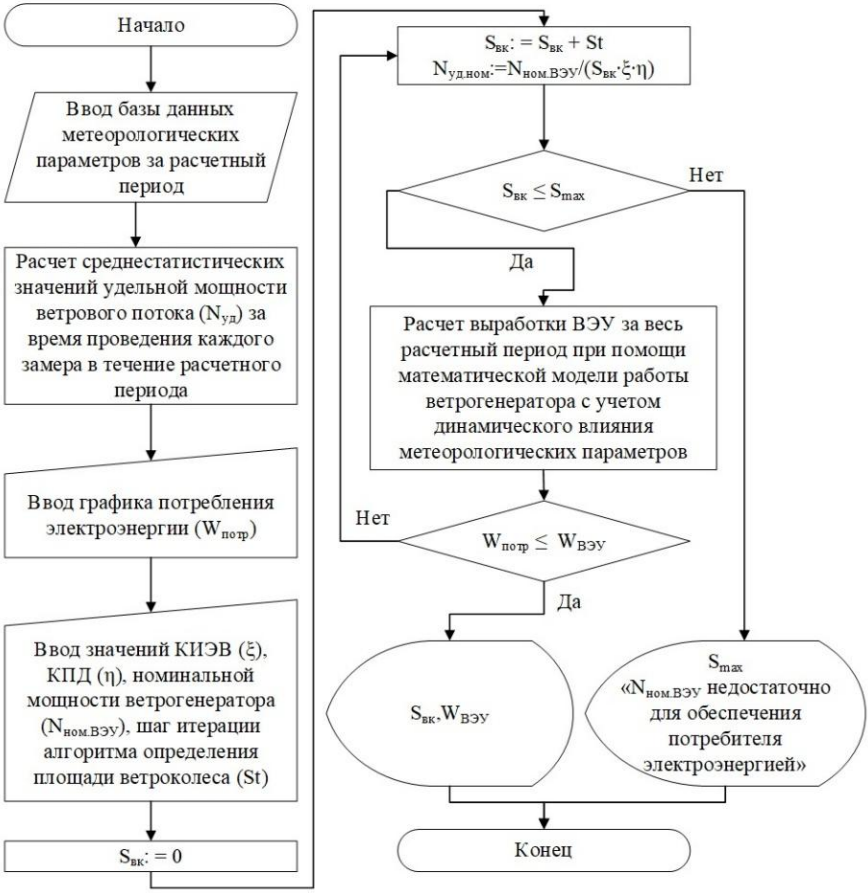



Рисунок 5 – Блок-схема алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

Номинальная мощность ветроэнергетической установки определяется из стандартного ряда следующим образом

$$N_{ном.ВЭУ} \geq N_{сут} = 5,5 \text{ кВт}.$$

Согласно общепринятому подходу к определению технических параметров ВЭУ, ометаемая площадь ветроколеса определяется при помощи следующего выражения

$$S_{общ} = \frac{2 \cdot N_{ном.ВЭУ}}{\rho_{ср} \cdot v_{сгр}^3 \cdot \xi \cdot \eta} = \frac{2 \cdot 5500}{1,257 \cdot 104,5 \cdot 0,38} = 441 \text{ м}^2,$$

где $N_{потр}$ – среднегодовая потребляемая мощность, Вт;

$\rho_{ср}$ – среднегодовая плотность воздуха для села Каип, кг/м$^3$;

$v_{сгр}$ – средняя за период скорость ветра с учетом функции ее годового распределения на территории села Каип, м/с.

Согласно результатам моделирования работы ветрогенератора в климатических условиях села Каип Ключевского района Алтайского края не удалось обеспечить установку РВС-40 необходимым количеством электроэнергии при использовании предполагаемой ВЭУ с указанными выше параметрами. Аналогичным образом проведена оценка выработки ветроэнергетической установки при изменении номинальной мощности ветрогенератора в соответствии со стандартным рядом номинальных значений мощностей до следующих значений: 6,3; 7,5; 11; 15; 18,5 и 22 кВт. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

| № п/п | $N_{ном.ВЭУ}$, Вт | $S_{опт}$, м$^2$ | $S_{оп}$, м$^2$ | δS, % | $W_{год.опт}$, кВт·ч | $W_{год.оп}$, кВт·ч |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5500 | 831 | 220 | 278 | 23390 | 17778 |
| 2 | 6300 | 952 | 252 | 278 | 26792 | 20364 |
| 3 | 7500 | 1133 | 301 | 276 | 31895 | 24243 |
| 4 | 11000 | 534 | 441 | 21 | 38318 | 35557 |
| 5 | 15000 | 317 | 601 | 47 | 38331 | 48487 |
| 6 | 18500 | 261 | 741 | 65 | 38349 | 59800 |
| 7 | 22000 | 231 | 881 | 74 | 38376 | 71114 |

Таким образом, применение разработанного алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетических установок позволяет для гарантированного энергообеспечения уменьшить номинальную мощность ветрогенератора при увеличении ометаемой площади ветроколеса, либо уменьшить ометаемую площадь ветроколеса при равных значениях номинальной мощности ветрогенератора на величину до δS = 74%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований разработана методика оптимизации технических параметров ветроэнергетической установки с учетом динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, в том числе атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, на ветровые энергоресурсы для повышения эффективности.

1. По результатам проведенного анализа современного состояния вопроса расчета электроэнергии, вырабатываемой энергоустановками на базе энергии ветра, установлено, что существующие подходы к оценке состояния ветровых энергоресурсов обладают рядом ограничений. В частности, использование усредненных характеристик ветрового потока не в полной мере отражает реальную изменчивость его мощности, что может приводить к снижению

точности расчетов вырабатываемой электроэнергии и, как следствие, возникновению ошибок при выборе оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. Это, в свою очередь, может приводить к нерациональному использованию ресурсов объектов АПК, включая ветровые энергоресурсы. На основе теоретических обоснований зависимости мощности ветрового потока от комплексного влияния расширенной группы метеорологических параметров выявлена возможность разработки математических моделей, позволяющих производить более точную оценку ветроэнергетических ресурсов и выработки ветрогенератора, что может поспособствовать оптимизации технических параметров ветроэнергетической установки.

2. Доказано, что использование разработанной математической модели оценки ветровых энергоресурсов позволяет на основании учета динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока повысить точность прогноза электроэнергии, вырабатываемой энергоустановкой на базе энергии ветра, на величину до 6,91% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом.

3. Выявлено, что атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха оказывают значимое влияние на ветроэнергетические ресурсы местности. Путем математического моделирования выяснено, что, в зависимости от значений атмосферного давления и температуры воздуха, относительная влажность воздуха может как оказывать влияние на удельную мощность ветрового потока, так и не оказывать его совсем ($\delta N \in [0{,}01; 2{,}7]$ %). Влияние атмосферного давления на удельную мощность ветрового потока практически не изменяется при варьировании значений относительной влажности и температуры воздуха ($\delta N \in [7{,}71; 7{,}91]$ %). При уменьшении атмосферного давления и увеличении относительной влажности воздуха увеличивается влияние температуры на ветровые энергоресурсы ($\delta N \in [31{,}58; 34{,}43]$ %).

4. Выявлено, что применение разработанной математической модели работы ветрогенератора, предназначенной для оценки значения электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, позволяет снизить ошибку расчета выработки ВЭУ за счет использования удельной мощности ветрового потока в качестве критерия определения рабочей зоны ветрогенератора. Путем математического моделирования выяснено, что для работы ветроэнергетической установки с заданными параметрами в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края ошибка при проведении оценки годовой выработки ветроэнергетической установки снижается на величину до 18,07% по сравнению с расчетами, проведенными в соответствии с общепринятым подходом, что соответствует разнице между значениями годовой выработки ветрогенератора, рассчитанными при помощи общепринятого подхода ($W_{ОП}$ = 429,2 кВт·ч) и математической модели работы ветрогенератора в условиях

динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров ($W_{дин}$ = 363,5 кВт·ч).

5. Показано, что разработанный алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки позволяет определить минимальное необходимое значение ометаемой площади ветроколеса для гарантированного обеспечения потребителя электроэнергией, в том числе в АПК, и уменьшить значение ометаемой площади ветроколеса на величину до 74% по сравнению со значением ометаемой площади ветроколеса, определяемой в соответствии с общепринятым подходом, что соответствует уменьшению значения ометаемой площади ветроколеса с $S_{ОП}$ = 881 м$^2$ до $S_{опт}$ = 231 м$^2$.

В перспективе возможно использование результатов диссертационной работы для развития методологии мониторинга и управления рабочими процессами ветроэнергетических установок в составе энергетических комплексов на территории сельскохозяйственных объектов, а также при разработке специализированных ветровых турбин, проектируемых с учетом особенностей географии и микроклимата территорий агропромышленного комплекса.

## ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

### Статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, определенных ВАК РФ

1. **Васильев, В.Ю.** Многофакторная математическая модель оценки энергетического потенциала ветроэнергетической установки / **В.Ю. Васильев**, Б.С. Компанеец, Е.М. Антонова // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2026. – № 2. – С. 43-48.

2. **Васильев, В.Ю.** Принципы расширенного микроклиматического прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов в АПК / **В.Ю. Васильев**, Е.В. Титов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 7(237). – С. 103-107. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-237-7-103-107.

3. **Васильев, В.Ю.** Обоснование развития подходов к расчету ветроэнергетических установок / **В.Ю. Васильев**, Е.В. Титов // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2024. – № 8(238). – С. 107-110. – DOI 10.53083/1996-4277-2024-238-8-107-110.

### Статьи, опубликованные в изданиях, входящих в базу цитирования WebOfScience и Scopus

4. **Vasilev V.** Assessment of Meteorological Parameters Group Impact on the Wind Energy Resources of an Area / **V.Y. Vasilev**, B.S. Kompaneets // 2023 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). – 2023. – P. 136-140. – DOI: 10.1109/ICIEAM57311.2023.10139031.

### Свидетельства о государственной регистрации баз данных и программ для ЭВМ

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621910 Российская Федерация. «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0_01 в условиях изменяющейся

относительной влажности окружающего воздуха» : заявл. 15.04.2025 : опубл. 28.04.2025 / **В.Ю. Васильев**, Б.С. Компанеец, С.Ф. Нефедов, Е.М. Антонова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова».

6. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622041 Российская Федерация. «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0_01 в условиях изменяющегося атмосферного давления» : заявл. 15.04.2025 : опубл. 12.05.2025 / **В.Ю. Васильев**, Б.С. Компанеец, С.Ф. Нефедов, Е.М. Антонова ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024615033 Российская Федерация. Программный комплекс обработки данных для многофакторной оценки ветровых энергоресурсов «ОДОВЭР» : № 2024613439 : заявл. 20.02.2024 : опубл. 01.03.2024 / **В.Ю. Васильев**, Б.С. Компанеец, С.Ф. Нефедов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

**Публикации в иных рецензируемых изданиях**

8. **Васильев, В.Ю.** Моделирование энергетического потенциала ветроэнергетических установок для электроснабжения города Барнаула / **В.Ю. Васильев** // Молодежь – Барнаулу : материалы XXVI городской научно-практической конференции молодых ученых, Барнаул, 01–30 ноября 2024 года. – Барнаул: ООО «АлКом», 2025. – С. 426.

9. **Васильев, В.Ю.** Возможность развития подхода к определению места размещения ветроэнергетических установок / **В.Ю. Васильев** // Наука и молодежь : Материалы XXI Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 15–19 апреля 2024 года. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2024. – С. 290-292.

10. **Васильев, В.Ю.** Оценка влияния климатических особенностей на ветроэнергетический потенциал города Барнаула / **В.Ю. Васильев** // Молодежь – Барнаулу : Материалы XXV городской научно-практической конференции молодых ученых, Барнаул, 01–30 ноября 2023 года. – Барнаул: ООО "Алком", 2024. – С. 392.

11. **Васильев, В.Ю.** Проблема обеспечения качественного электроснабжения сельскохозяйственных потребителей / **В.Ю. Васильев**, Е.В. Титов // Россия молодая : Сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 18-21 апреля 2023 года. – Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2023. – С. 21504.1-21504.3.

12. **Васильев, В. Ю.** Применение ветроэлектрических установок для электроснабжения потребителей города Барнаула / **В.Ю. Васильев** // Молодежь

- Барнаулу : МАТЕРИАЛЫ XXIV ГОРОДСКОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ, Барнаул, 01–30 ноября 2022 года. – Барнаул: Алтайский государственный университет, 2023. – С. 399-400.

13. **Васильев, В.Ю.** Экономическое обоснование развития метода определения ветроэнергетического потенциала / **В.Ю. Васильев** // Наука и молодежь : Материалы XX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Барнаул, 17-21 апреля 2023 года. Том 1. Часть 1. – Барнаул: Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, 2023. – С. 323-325.

14. **Васильев, В.Ю.** Анализ предпосылок развития ветроэнергетики в АПК России / **В.Ю. Васильев**, Е.В. Титов // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : Материалы Международной научной конференции, Майский, 14-15 марта 2023 года. Том 4. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. – С. 20-21.

15. **Васильев, В.Ю.** Возможность развития методики проектирования ветроэнергетических установок в АПК / **В.Ю. Васильев**, Е.В. Титов // Горинские чтения. Инновационные решения для АПК : Материалы Международной научной конференции, Майский, 14-15 марта 2023 года. Том 4. – Майский: Белгородский государственный аграрный университет имени В.Я. Горина, 2023. – С. 22-23.

16. **Васильев, В.Ю.** Нормативно-правовые предпосылки развития ветроэнергетики в Алтайском крае / **В.Ю. Васильев** // Интеллектуальная энергетика - 2022 : Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, Барнаул, 22 сентября 2022 года / Ред.-сост. С.О. Хомутов, С.А. Родт, В.И. Сташко. – Барнаул: Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов, 2022. – С. 294-295.

17. **Васильев, В.Ю.** Влияние климатических условий на работу ветряных установок / **В.Ю. Васильев** // Материалы XXII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, с международным участием в г. Нерюнгри, посвященной 30-летнему юбилею Технического института (филиала) СВФУ им. М.К. Аммосова : Материалы конференции, Нерюнгри, 28-29 октября 2022 года / Редколлегия: А.В. Рукович, Н.Н. Гриб, П.Ю. Кузнецов [и др.]. – Якутск: Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, 2022. – С. 30-32. – DOI 10.52994/9785751333737_007.

18. **Васильев, В.Ю.** Проблемы использования ветряных электростанций в России / В.Ю. Васильев // Мавлютовские чтения : Материалы XVI Всероссийской молодежной научной конференции. В 6-ти томах, Уфа, 25–27 октября 2022 года. Том 3. – Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2022. – С. 321-323.

**Личный вклад автора.** Все основные положения диссертации разработаны автором лично. Автору принадлежат методика, основные решения и научное редактирование изданий полностью.