

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

*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

**Диссертация**  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
кандидат технических наук,  
доцент  
Компанеев Борис Сергеевич

Барнаул, 2026 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                         | 4  |
| ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ<br>НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПОДХОДОВ К РАЦИОНАЛЬНОМУ<br>ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ.....         | 14 |
| 1.1 Исторические аспекты развития ветроэнергетики .....                                                                                               | 14 |
| 1.2 Использование ветровых энергоресурсов для энергоснабжения<br>объектов АПК .....                                                                   | 15 |
| 1.3 Анализ современных подходов к оценке электроэнергии,<br>вырабатываемой ветроэнергетическими установками.....                                      | 21 |
| Выводы по главе 1.....                                                                                                                                | 26 |
| ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА<br>.....                                                                                       | 28 |
| 2.1 Теоретическое обоснование и разработка математической модели<br>оценки ветровых энергоресурсов .....                                              | 28 |
| 2.2 Экспериментальное исследование динамического влияния<br>расширенной группы метеорологических параметров на ветроэнергетический<br>потенциал ..... | 32 |
| 2.3 Сравнительный анализ математических моделей оценки<br>ветроэнергетического потенциала.....                                                        | 41 |
| 2.4 Дифференциальная оценка влияния расширенной группы<br>метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока .....                    | 48 |
| Выводы по главе 2.....                                                                                                                                | 54 |
| ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА .....                                                                                                   | 57 |
| 3.1 Моделирование работы ветрогенератора на основе общепринятого<br>подхода .....                                                                     | 57 |
| 3.2 Разработка математической модели работы ветрогенератора .....                                                                                     | 67 |
| 3.3 Сравнительный анализ подходов к моделированию работы<br>ветрогенератора.....                                                                      | 72 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Выводы по главе 3.....                                                                                                                                 | 77  |
| ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ<br>ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ<br>МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА..... | 79  |
| 4.1 Разработка алгоритма поиска оптимальных значений технических<br>параметров ветроэнергетической установки.....                                      | 79  |
| 4.2 Программное обеспечение реализации алгоритма поиска оптимальных<br>значений технических параметров ветроэнергетической установки .....             | 84  |
| 4.3 Практическое применение алгоритма поиска оптимальных значений<br>технических параметров ветроэнергетической установки .....                        | 92  |
| 4.3.1 Методика оценки технического эффекта от внедрения результатов<br>исследований .....                                                              | 92  |
| 4.3.2 Оптимизация ометаемой площади ветроколеса для крестьянского<br>фермерского хозяйства .....                                                       | 95  |
| Выводы по главе 4.....                                                                                                                                 | 104 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                                                                                       | 106 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....                                                                                                                                | 109 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ А .....                                                                                                                                     | 126 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....                                                                                                                                     | 127 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ В.....                                                                                                                                      | 129 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....                                                                                                                                     | 132 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....                                                                                                                                      | 135 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** 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 исследования.** 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.

**Рабочая гипотеза** – учет зависимости ветровых энергоресурсов от динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров позволяет снизить ошибку при оценке энергетического потенциала ветроэнергетических установок, что позволяет повысить эффективность определения оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для обеспечения заданного уровня выработки электроэнергии ветрогенератором, тем самым обеспечивая рациональное использование ветроэнергетических ресурсов, в том числе объектами агропромышленного комплекса.

**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.

**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.

**Поставлены и решены следующие основные 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.

**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%.

**Соответствие паспорту 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. Техничко-экономические основы стандартизации по энергообеспечению объектов АПК и социальной сферы на селе.

**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.

**Практическая 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.

**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.

**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%.

**Обоснованность и достоверность научных положений.** Достоверность результатов исследований обеспечена применением современной

сертифицированной измерительной аппаратуры, а также соответствием результатов математического моделирования и лабораторных экспериментов.

**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-летию 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.

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

# **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПОДХОДОВ К РАЦИОНАЛЬНОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ ВЕТРОВЫХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ**

## **1.1 Исторические аспекты развития ветроэнергетики**

Энергия ветра используется людьми для осуществления технологических процессов, в том числе в агропромышленном комплексе (АПК), на протяжении тысячелетий. Согласно результатам исследований, самые древние фрагменты установок, работающих на базе энергии ветра, созданы более 2000 лет назад. С древних времен до периода промышленной революции при помощи энергии ветрового потока приводились в действие механизмы ветряных мельниц, производящих помол зерна [9, 81].

Социально-экономическое и технологическое развитие общества поспособствовало расширению как географии, так и сфер внедрения технологий на базе энергии ветра. Так, например, в средние века на территории Голландии ветроэнергетические установки (ВЭУ) использовались для осуществления технологических процессов маслобоек, бумажных фабрик, а также для осушения болот и откачки воды [9, 81].

В период промышленной революции отмечено снижение темпов развития ветроэнергетики. Одной из основных причин данного явления стало появление паровых машин и других механизмов, которые в тот период времени отличались большим КПД при меньшей себестоимости производства энергии [9, 81].

В конце XIX века наступила очередная фаза развития ветроэнергетики. В 1890 году в Дании изобретена первая ветряная электростанция (ВЭС), после чего со стороны правительства страны организована большая поддержка развития технологий, работающих на базе энергии ветра. Так, к 1910 году построено

несколько сотен ветроэнергетических установок, расчетная мощность которых варьировалась от 5 до 25 кВт [9, 81].

Середина XX века стала началом научно-технической революции, связанной с высокими темпами технологического развития общества. Создание новых и усовершенствование старых технологий привело к увеличению энергоемкости технологических процессов, что потребовало роста потребления энергии, в том числе электрической. Ограниченность минерально-сырьевой базы относят к основным причинам снижения качества месторождений [20, 47, 55, 81], что является одним из факторов, способствующих росту цен на традиционные виды топлива. Кроме того, нерациональное использование современных технологий приводит к негативному воздействию на окружающую природу [45, 46, 81]. Описанные выше процессы повысили актуальность поиска альтернативных источников энергии, что подчеркивает актуальность развития возобновляемой энергетики, в том числе ветроэнергетики, по всему миру. В настоящее время во всем мире активно ведутся работы по созданию технологий и оборудования в сфере ветроэнергетики, способствующих повышению эффективности работы ветроэнергетических установок [56, 58, 79, 80]. Большое количество работ посвящено исследованию различных зависимостей, связывающих величину электрической мощности, генерируемой ветроэнергетическими установками (ВЭУ), созданию методов, алгоритмов и математических моделей, позволяющих строить более точные прогнозы значений скорости ветра в анализируемые периоды времени.

## **1.2 Использование ветровых энергоресурсов для энергоснабжения объектов АПК**

На сегодняшний день к приоритетным задачам развития агропромышленного комплекса относятся стимулирование объемов производства сельскохозяйственной продукции и развитие мощностей хранения и переработки сельскохозяйственного сырья [57]. Результативность их решения сопряжена с

повышением энергоемкости и энергопотребления объектов АПК [16, 19, 57]. При этом необходимо учитывать особенности сельских электрических сетей и характер нагрузки.

По назначению и характеру нагрузки сельскохозяйственные потребители делятся на следующие группы: бытовые потребители, производственные объекты, коммунально-бытовые и социально-культурные потребители, объекты мелиорации и водного хозяйства, объекты переработки сельскохозяйственной продукции [11, 43].

К бытовым потребителям относятся жилые дома и бытовые объекты сельских населенных пунктов, например, жилые дома, коттеджи, общежития, индивидуальные хозяйства, бытовые помещения. Для данного типа потребителей характерны сравнительно небольшая мощность, ярко выраженные утренние и вечерние пики, сезонность нагрузки, значительная доля осветительной и бытовой нагрузки [11, 43].

К производственным объектам относятся электропотребители, непосредственно обеспечивающие сельскохозяйственное производство. К ним относятся животноводческие фермы, птицефабрики, свиноводческие комплексы, теплицы и т.д. Характер нагрузки данного типа потребителей отличается высокой установленной мощностью, преобладанием электродвигательной нагрузки, наличием пусковых токов, круглосуточной или циклической работы, сезонным изменением потребления [11, 43].

Коммунально-бытовые и социально-культурные потребители обеспечивают обслуживание сельского населения. К их числу относятся школы, больницы, магазины, клубы, детские сады, административные здания, системы уличного освещения. Нагрузка таких потребителей отличается относительно равномерным потреблением, преобладанием осветительной нагрузки, наличием дневных максимумов нагрузки, высокой социальной значимостью [11, 43].

Объекты мелиорации и водоснабжения представляют собой потребители, основной задачей которых является обеспечение водными ресурсами объектов АПК для реализации производственных, бытовых и социальных процессов. К ним



можно отнести насосные станции, системы орошения, станции водоснабжения, дренажные установки. Особенностью данного типа потребителей является наличие мощных электродвигателей, сезонность работы, циклический режим, высокая реактивная составляющая нагрузки [11, 43].

Объекты переработки сельскохозяйственной продукции предназначены для обработки, хранения, подготовки и производства различных видов сельскохозяйственной продукции. К ним относятся мельницы, молокозаводы, маслобойни, комбикормовые заводы, холодильные склады и т.д. Такие потребители имеют следующие особенности характера потребления электроэнергии: высокие единичные мощности, сменный график работы, значительные пусковые нагрузки, возможность возникновения кратковременных резких скачков потребления, требовательность к бесперебойному электроснабжению [11, 43].

В сельских электрических сетях также применяется классификация электроприемников по категориям надежности: I, II и III [11, 43, 61]. Для потребителей I категории надежности перерывы электроснабжения недопустимы, так как отсутствие электроэнергии может привести к значительным экономическим либо социальным потерям. Примерами таких потребителей являются крупные животноводческие комплексы, системы вентиляции птицефабрик, инкубаторы, насосы пожаротушения и т.д. Для потребителей II категории допускается кратковременный перерыв обеспечения питания электроустановок. К ним относится большинство производственных сельскохозяйственных объектов: кормоцеха, мастерские и т.д. III категория надежности допускает более длительный перерыв электроснабжения и включает в себя бытовые потребители, вспомогательные помещения, склады [11, 38, 43, 61].

По результатам анализа сельских электрических сетей выделяются две группы сельскохозяйственных потребителей: объекты производства, хранения и переработки сельхозпродукции и социально-бытовые объекты. Социально-бытовые объекты характеризуются незначительными изменениями потребления электроэнергии в течение года. Объекты производства, хранения и переработки

сельхозпродукции характеризуются выраженной сезонностью нагрузки, обусловленной особенностями производства продукции агропромышленного комплекса. Примером таких потребителей электроэнергии может служить зерноток с зерноочистительной установкой РВС-40, состав которого приведен в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Состав оборудования РВС-40 [42]

| Оборудование           | Мощность, кВт |
|------------------------|---------------|
| Привод вентилятора     | 11            |
| Привод шнеков          | 2,2           |
| Привод решетного стана | 1,1           |
| Итого                  | 14,3          |

Годовой график нагрузки зернотока имеет ярко выраженный сезонный характер. Основной максимум нагрузки приходится на период уборки урожая (август-октябрь), когда осуществляются очистка, транспортирование и подготовка зерна к хранению. В период посевной кампании зерноток используется преимущественно для подготовки семенного материала, что обуславливает средний уровень нагрузки. В зимний период наблюдается минимальное потребление электроэнергии. Подобная неравномерность требует учета при проектировании систем электроснабжения сельскохозяйственных предприятий, разработке мероприятий по энергосбережению и прогнозировании электрических нагрузок. Для сельскохозяйственных объектов Алтайского края примерный сезонный режим работы зерноток представлен в таблице 1.2.

Согласно результатам анализа вопроса энергообеспечения сельскохозяйственных потребителей примерно две трети территории Российской Федерации, на которых расположено более 40% сельскохозяйственных объектов, не имеют возможности подключения к Единой энергетической системе [46, 70, 75]. В таких условиях возникают трудности с электрификацией

Таблица 1.2 – Примерный сезонный режим работы зернотоков в Алтайском крае

| Период             | Месяцы          | Продолжительность, сут. | Нагрузка, % от установленной | Характеристика             |
|--------------------|-----------------|-------------------------|------------------------------|----------------------------|
| Зимний             | декабрь–февраль | 90                      | 5                            | Хранение и обслуживание    |
| Подготовительный   | март–апрель     | 61                      | 10                           | Ремонт и подготовка        |
| Посевная кампания  | май–июнь        | 61                      | 20                           | Подготовка семян           |
| Летний межсезонный | июль            | 31                      | 40                           | Начало поступления зерна   |
| Уборочная кампания | август–октябрь  | 92                      | 100                          | Максимальная загрузка      |
| Послеуборочный     | ноябрь          | 30                      | 40                           | Доработка и хранение зерна |

бытовых и производственных процессов в АПК, в результате чего существует риск снижения эффективности функционирования технологических процессов предприятий и необходимого уровня жизни сельского населения [62, 68, 71].

Перспективным способом увеличения генерирующих мощностей в сельских электрических сетях, а также обеспечения собственного электроснабжения объектов АПК является распределенная генерация, в том числе с использованием энергии ветра [5, 8, 13, 14, 77]. Применение ветроэнергетических установок в совокупности с накопителями и инверторами способствует обеспечению потребителей электрической энергией за счет преобразования энергии ветра с последующим накоплением выработанной электроэнергии, что позволяет применять их для энергообеспечения автономных и гибридных энергетических комплексов. Такие системы особенно широко применяются для электроснабжения удаленных объектов агропромышленного комплекса, фермерских хозяйств, насосных станций, животноводческих комплексов и других потребителей, расположенных на значительном расстоянии от централизованных электрических сетей [25, 26, 69].

ВЭУ с накопителями энергии имеют следующий принцип действия. Энергия ветрового потока преобразуется ветроколесом в механическую энергию вращения. Генератор преобразует механическую энергию в электрическую. Выработанная электроэнергия через контроллер заряда поступает в аккумуляторные батареи. Накопленная энергия используется для питания потребителей через инвертор, который преобразует постоянный ток аккумуляторов в переменный ток с требуемыми значениями напряжения и частоты, что способствует качественному и надежному электроснабжению вне зависимости от характера нагрузки и графика потребления электроэнергии. При наличии избыточной генерации часть энергии аккумулируется в накопителях, а при снижении скорости ветра питание нагрузки осуществляется за счет ранее накопленной энергии. При этом использование накопителей позволяет обеспечивать резервирование электроснабжения, сглаживать неравномерность графиков нагрузки, компенсировать кратковременные перебои питания, повышать качество и устойчивость электроснабжения, аккумулировать избыточную выработку электроэнергии [69].

Учитывая принцип работы системы генерации, состоящей из генератора ветроэнергетической установки, накопителя и инвертора, можно заключить, что ее использование в качестве источника энергии позволяет обеспечить потребителя с любым типом нагрузки необходимым количеством электроэнергии при выполнении следующих условий [69].

1. Для обеспечения бесперебойного питания электроустановок потребителя необходимо использование инвертора, мощность которого равна либо превышает максимальную потребляемую мощность [69].

2. Для обеспечения бесперебойного питания электроустановок потребителя необходимо использование накопителя энергии, способного сглаживать неравномерность генерации и потребления. В соответствии с потребностями активного энергетического комплекса, в котором планируется размещение ветроэнергетической установки для обеспечения выработки электроэнергии, рекомендуется выбирать накопители энергии исходя из данных о продолжительности автономной работы потребителя, емкости аккумуляторных

батарей, номинальному напряжению, номинальному входному току и выходному напряжению [69].

3. Для обеспечения выдачи накопителем объема электрической энергии, требуемого потребителю в течение расчетного периода, необходимо использовать ВЭУ, способную за расчетный период генерировать необходимое количество электроэнергии в соответствии с заданными режимами энергопотребления [69]. Стоит отметить, что для этого необходимо использование математических моделей, позволяющих наиболее точно определить значение генерируемой ВЭУ электроэнергии и ветроэнергетического потенциала местности. Разработке таких моделей посвящены дальнейшие разделы данной диссертационной работы.

### **1.3 Анализ современных подходов к оценке электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками**

Для обеспечения эффективности проекта электроснабжения потребителей сельского хозяйства на этапе выбора ветроэнергетических установок необходимо производить выбор оптимальных значений технических параметров ВЭУ, что способствует рациональному использованию ресурсов объектов агропромышленного комплекса, в том числе ветровых энергоресурсов. При этом для эффективного использования энергии ветра на первоначальных этапах разработки проекта энергоснабжения при помощи ветроэнергетических установок необходимо производить анализ достаточности ресурсов ветра в предполагаемых районах размещения ВЭУ и оценить целесообразность строительства ВЭС [10, 28, 60, 74]. В соответствии с общепринятыми подходами для количественной оценки состояния ветровых энергоресурсов используется удельная мощность ветрового потока, определяемая следующим выражением [49, 83-100, 103-105]

$$N_{\text{yo}} = \frac{\rho \cdot v^3}{2}, \quad (1.1)$$

где  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$v$  – скорость ветра, м/с.

При этом природный ветровой энергоресурс представляет собой кинетическую энергию воздушных масс, перемещающихся над определенной местностью. Одной из его основных характеристик является среднегодовая удельная мощность ветрового потока, определяемая следующим уравнением [29, 51, 107-109]

$$N_{cgy} = \frac{\rho_{cp} \cdot \sum_{i=0}^{v_{max}} (v_i^3 \cdot dF)}{2}, \quad (1.2)$$

где  $dF$  – годовая функция распределения скорости ветра;

$v_{max}$  – максимальное целочисленное значение скорости ветра для рассматриваемой местности в течение года, м/с;

$v_i$  –  $i$ -тое целочисленное значение скорости ветра, м/с;

$\rho_{cp}$  – среднестатистическая плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

В соответствии с общепринятым подходом к оценке электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетическими установками, рабочие режимы ВЭУ можно охарактеризовать при помощи зон работы ветрогенератора, отраженных на его энергетической характеристике. При этом в качестве критериев определения зоны работы ветроэнергетических установок используется скорость ветра, а мощность, генерируемая ВЭУ, определяется следующим выражением [36, 48]

$$N_{BЭУ}(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } v(t) < v_0; \\ \frac{\rho_{cp} \cdot v^3(t)}{2} \cdot S_{вк} \cdot \eta_{BЭУ} \cdot \xi, & \text{при } v_0 \leq v(t) < v_{ном}; \\ N_{ном.BЭУ}, & \text{при } v_{ном} \leq v(t) < v_{max.BЭУ}; \\ 0, & \text{при } v(t) \geq v_{max.BЭУ}, \end{cases} \quad (1.3)$$

где  $\xi$  – коэффициент использования энергии ветра;

$\eta_{BЭУ}$  – суммарный коэффициент полезного действия ВЭУ;

$S_{вк}$  – ометаемая площадь ветроколеса ВЭУ, м<sup>2</sup>;

$N_{ном.BЭУ}$  – номинальная мощность генератора, Вт;

$v_0$  – стартовая скорость ВЭУ, м/с;

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

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

При этом совокупная электроэнергия, вырабатываемая ветрогенератором за рассматриваемый период, определяется следующим образом [3, 6, 69]

$$W_{ВЭУ} = \sum_{i=1}^n W_i = \sum_{i=1}^n \left( \int_{t_{i-1}}^{t_i} N_{ВЭУ} dt \right), \quad (1.4)$$

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

$n$  – количество интервалов расчета электроэнергии;

$t_i$  –  $i$ -тый интервала расчета электроэнергии, с.

Оценка электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, согласно общепринятому подходу к расчету выработки ветроэнергетической установки, подразумевает использование постоянных значений плотности воздуха, соответствующих среднестатистическим значениям расширенной группы метеорологических параметров.

Однако значения указанных метеорологических параметров и их совокупный вклад в изменение величины плотности воздуха может значительно отличаться от среднестатистических параметров.

Известно, что ветер является перемещением газа над поверхностью планеты, состояние которого можно описать посредством уравнения Менделеева-Клапейрона [30]

$$PV = \frac{m}{M} RT, \quad (1.5)$$

где  $P$  – давление газа, Па;

$V$  – объем газа, м<sup>3</sup>;

$T$  – температура газа, К;

$m$  – масса газа, кг;

$M$  – молярная масса газа, кг/моль;

$R = 8,314$  Дж/(моль·К) – универсальная газовая постоянная.

Распишем плотность газа  $\rho$  через его массу и объем [30]

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (1.6)$$

Выразив объем  $V$  из (1.5) и подставив его в (1.6), получим

$$\rho = \frac{PM}{RT}. \quad (1.7)$$

Следовательно, значение плотности воздуха зависит от атмосферного давления и температуры воздуха. Как известно [1, 12], относительная влажность воздуха показывает отношение массы водяных паров, находящихся в некотором объеме воздуха, к массе насыщенного водяного пара, приходящегося на тот же объем воздуха. Тогда атмосферное давление можно определить следующим выражением [1, 12]

$$P_{атм} = P_C + P_{П}, \quad (1.8)$$

где  $P_C$  – парциальное давление сухого воздуха, Па;

$P_{П}$  – парциальное давление водяного пара, Па.

Следовательно, количество водяных паров, содержащихся в воздухе, влияет на плотность воздуха. Тогда плотность воздуха можно определить следующим образом

$$\rho = \frac{P_C M_C}{RT} + \frac{P_{П} M_{П}}{RT}, \quad (1.9)$$

где  $M_C$  и  $M_{П}$  – молярные массы сухого воздуха и водяных паров соответственно.

Таким образом, изменение атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха во времени может оказывать существенное динамическое влияние на плотность воздуха, являющуюся одной из характеристик,



определяющих его энергетические параметры, в том числе энергию, переносимую ветровым потоком. Однако общепринятый подход к оценке природных ветроэнергетических ресурсов не позволяет учитывать зависимость значения удельной мощности ветрового потока от динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, вследствие чего возможно снижение точности прогнозирования состояния ветровых энергоресурсов. Это связано с тем, что фактические значения мощности и электроэнергии, вырабатываемые ветроэнергетической установкой, могут значительно отличаться от значений, полученных расчетным путем при использовании общепринятых на сегодняшний день математических моделей и методик оценки выработки ветрогенератора. Следствием возникновения данной проблемы может стать нерациональное использование ресурсов, в том числе ветроэнергетических. Неточность оценки мощности ветрового потока и электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, может приводить к значительным простоям ВЭУ либо ее разрушению под воздействием скорости ветра и ветрового потока, превышающих нормативные номинальные значения [27, 41].

В соответствии с известными подходами к определению технических параметров ветроэнергетических установок выбор номинальной мощности ветроэнергетических установок происходит на основании данных о предполагаемой совокупной среднесуточной электрической мощности, потребляемой при обеспечении работы электрооборудования потребителей, электроснабжение которых планируется осуществлять при помощи проектируемой ветроэнергетической установки. При этом номинальная мощность ветрогенератора должна обеспечивать среднесуточные затраты электрической мощности потребителем [6, 11, 35]

$$N_{\text{ном.ВЭУ}} \geq N_{\text{сут}} \cdot \quad (1.10)$$

На основании полученных данных происходит расчет ометаемой площади ветроколеса при помощи следующего уравнения [2, 4, 34]

$$S_{\text{вк}} = \frac{2 \cdot N_{\text{ном.ВЭУ}}}{\rho_{\text{ср}} \cdot v_{\text{ср}}^3 \cdot \xi \cdot \eta}, \quad (1.11)$$

где  $v_{\text{ср}}$  – скорость ветра с учетом годовой функции распределения, м/с.

Таким образом, при расчете технических параметров ветроэнергетической установки используются среднестатистические значения плотности воздуха и скорости ветра. Использование уравнения (1.11) для поиска оптимального значения ометаемой площади ветроколеса может привести к неточности расчетов, так как не учитывается динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров на мощность, с которой ветровой поток воздействует на лопасти ВЭУ.

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.

## Выводы по главе 1

Согласно результатам анализа истории развития ветроэнергетики и применения ветровых энергоресурсов в России и мире, в настоящее время исследуемая отрасль энергетического сектора является одной из наиболее динамично развивающихся, что обусловлено сочетанием технологического прогресса, усилением роли государственной поддержки, а также влиянием климатических и экономических факторов. Кроме того, на сегодняшний день использование энергии ветра имеет значительный потенциал для обеспечения бесперебойного электроснабжения объектов АПК, что, в свою очередь, способно

позитивно повлиять на решение приоритетных задач, соответствующих Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации до 2030 года.

В то же время для эффективного использования ветроэнергетических установок для электроснабжения потребителей, в том числе в сельском хозяйстве, необходимо осуществление оценки энергетического потенциала местности, на основании чего происходит определение оптимальных параметров ветроэнергетической установки и расчет годовой выработки ветрогенератора. Однако использование математических моделей, соответствующих общепринятому подходу к прогнозированию состояния ветровых энергоресурсов и оценке количества генерируемой электроэнергии, может приводить к ошибке в расчетах выработки ветрогенераторов и определению технических параметров ВЭУ, при которых рациональное использование ресурсов, в том числе ветроэнергетических, становится невозможным, что обусловлено использованием усредненных характеристик ветрового потока, не в полной мере отражающих реальную изменчивость мощности ветрового потока.

В связи с этим видится необходимой разработка новых математических моделей, способных с большей точностью проводить оценку ветроэнергетического потенциала местности и производить расчеты генерируемой электроэнергии, что в дальнейшем может поспособствовать определению оптимальных значений технических параметров ветроэнергетических установок для повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК.

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА

### 2.1 Теоретическое обоснование и разработка математической модели оценки ветровых энергоресурсов

Как известно из [9, 23, 76], модель воздуха, протекающего через ветроколесо, представляет собой объемную геометрическую фигуру длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$ , поперечный разрез которой соответствует плоскости ветроколеса (рисунок 2.1). Учитывая то, что скорость представляет собой расстояние, пройденное телом за промежуток времени, массу из уравнения (1.6) можно выразить следующим образом [9, 36]

$$m = \rho \cdot S \cdot v \cdot \tau, \quad (2.1)$$

где  $\tau$  – промежуток времени, с.



Рисунок 2.1 – Пример модели протекания воздуха через ветроколесо

Как известно [9, 36], ветер является перемещением частиц воздуха. Энергию движения частиц воздуха можно описать уравнением кинетической энергии [30]

$$E_k = \frac{mv^2}{2}. \quad (2.2)$$

Из фундаментальных законов физики известно, что элементарная работа равна элементарной кинетической энергии [30]. Представив мощность как

кинетическую энергию, затраченную в единицу времени, мощность ветрового потока можно рассчитать следующим образом [30]

$$N = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}. \quad (2.3)$$

Тогда удельная мощность ветрового потока, определяемая как мощность ветрового потока, протекающая через единичную площадь, описывается следующим уравнением [9, 36]

$$N_{y\partial} = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{S \cdot 2} = \frac{\rho \cdot v^3}{2}. \quad (2.4)$$

Согласно общепринятому подходу к оценке состояния ветровых энергоресурсов, количественной характеристикой ветроэнергетического потенциала является среднегодовая удельная мощность ветрового потока, определяемая следующим образом [7, 9, 82]

$$N_{cgy} = \frac{\rho_{cp} \cdot \sum_0^{v_{\max}} (v^3 \cdot dF)}{2}. \quad (2.5)$$

Область применения данной модели ограничена, так как плотность воздуха принимается за постоянную величину, характерную для среднестатистических значений метеорологических параметров. Такой подход подчеркивает значимость изменения скорости ветра во времени, однако не учитывает динамику прочих характеристик воздуха. Для решения данной проблемы необходимо расширить перечень контролируемых метеорологических параметров, используемых для оценки ветроэнергетического потенциала местности.

Согласно уравнению (1.9), плотность воздуха зависит от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. В то же время связь плотности воздуха с атмосферным давлением и относительной влажностью

воздуха описывается через парциальные давления и молярные массы сухого воздуха и находящихся в воздухе водяных паров следующим образом [1, 12]

$$P_{\Pi} = \varphi \cdot P_{\text{НП}}, \quad (2.6)$$

где  $\varphi$  – относительная влажность воздуха, %;

$P_{\text{НП}}$  – давление насыщенного пара, Па.

Давление насыщенного пара зависит от температуры воздуха и находится при помощи уравнения [1, 12]

$$P_{\text{НП}} = 611,2 \cdot e^{\left( \frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+T-273,15} \right)}, \quad (2.7)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – поправочные коэффициенты.

В уравнении (2.7) поправочные коэффициенты зависят от температуры рассматриваемого воздуха. При  $T > 273,15$  К (0 °С)  $\alpha = 17,504$ ;  $\beta = 241,2$  °С. При  $T \leq 273,15$  К  $\alpha = 22,489$ ;  $\beta = 272,88$  °С.

Подставив (2.7) в (2.6), получим

$$P_{\Pi} = \varphi \cdot 611,2 \cdot e^{\left( \frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+T-273,15} \right)}. \quad (2.8)$$

С учетом того, что атмосферное давление представляет собой сумму парциальных давлений сухого воздуха и водяных паров [1, 12], парциальное давление сухого воздуха определяется следующим образом

$$P_C = P_{\text{атм}} - P_{\Pi} = P_{\text{атм}} - \varphi \cdot 611,2 \cdot e^{\left( \frac{\alpha(T-273,15)}{\beta+T-273,15} \right)}. \quad (2.9)$$

Выразив плотность воздуха из уравнения Менделеева-Клапейрона, получим [1, 12, 30]

$$\rho = \frac{P_C M_C + P_{\Pi} M_{\Pi}}{RT}. \quad (2.10)$$

Подставив уравнения (2.8) и (2.9) в уравнение (2.10), получим

$$\rho = \frac{P_{амм} \cdot M_C - (M_C - M_{II}) \cdot \varphi \cdot 611,2 \cdot e^{\left( \frac{(\alpha \cdot (T - 273,15))}{\beta + T - 273,15} \right)}}{RT}. \quad (2.11)$$

С учетом (2.11) удельная мощность ветрового потока определяется следующим образом

$$N_{y\partial} = \frac{P_{амм} \cdot M_C - (M_C - M_{II}) \cdot \varphi \cdot 611,2 \cdot e^{\left( \frac{(\alpha \cdot (T - 273,15))}{\beta + T - 273,15} \right)}}{2RT} \cdot v^3. \quad (2.12)$$

Подставив значения молярной массы сухого воздуха ( $M_c = 28,92$  г/моль) и молярной массы водяного пара ( $M_{II} = 18$  г/моль), а также значение универсальной газовой постоянной  $R = 8,314$  Дж/(моль·К) в уравнение (2.12), получим уравнение удельной мощности ветрового потока [15, 17, 106]

$$N_{y\partial} = \frac{P_{амм} - 2,315 \cdot \varphi \cdot e^{\left( \frac{(\alpha \cdot (T - 273,15))}{\beta + T - 273,15} \right)}}{573,8 \cdot T} \cdot v^3. \quad (2.13)$$

Тогда математическую модель оценки ветровых энергоресурсов в условиях динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха можно представить следующим уравнением [18, 22, 24]

$$W_{y\partial}(t) = \int_0^t N_{y\partial}(t) dt = \int_0^t \left( \frac{P_{амм}(t) - 2,315 \cdot \varphi(t) \cdot e^{\left( \frac{(\alpha \cdot (T(t) - 273,15))}{\beta + T(t) - 273,15} \right)}}{573,8 \cdot T(t)} \cdot v^3(t) \right) dt, \quad (2.14)$$

где  $t$  – интервал времени, соответствующий анализируемому периоду, с.

Следовательно, изменение атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха приводит к изменению значения удельной мощности ветрового потока и состояния ветровых энергоресурсов, что не

учитывается при использовании среднестатистической плотности воздуха в уравнении (2.5) и доказывает целесообразность разработки математической модели.

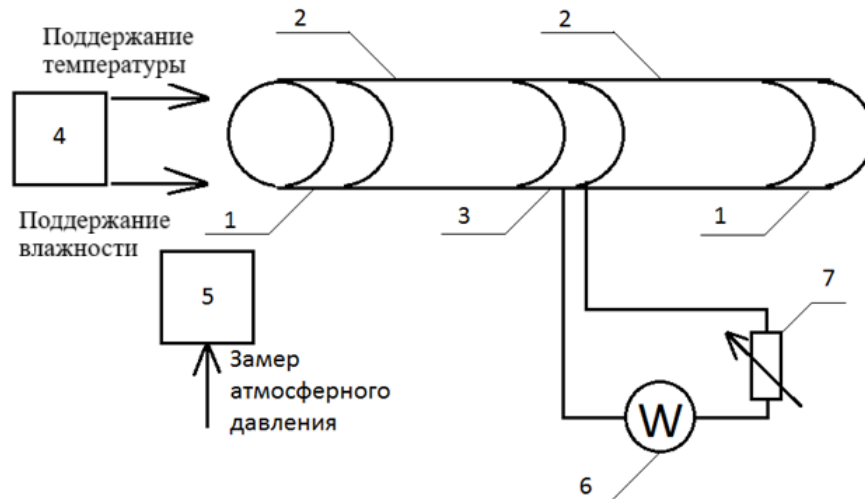
## **2.2 Экспериментальное исследование динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на ветроэнергетический потенциал**

Для подтверждения адекватности математической модели ветровых энергоресурсов в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров проведены экспериментальные исследования зависимости электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Для проведения опытов разработана установка, включающая в себя источник ветрового потока, воздуховод, ветрогенератор, а также устройства для измерения и поддержания значений метеорологических и электрических величин. Фото экспериментальной установки приведено на рисунке 2.2. Функциональная схема разработанной экспериментальной установки приведена на рисунке 2.3.



Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка





1 – источник ветрового потока, 2 – воздуховод, 3 – ветрогенератор, 4 – блок поддержания значений метеорологических параметров, 5 – блок измерений значений метеорологических параметров, 6 – ваттметр, 7 – регулируемая нагрузка

Рисунок 2.3 – Функциональная схема экспериментальной установки

В качестве источника ветрового потока использован нагнетатель воздуха Marshal MB3893. При его использовании совместно с воздуховодом достигается снижение уровня завихрения потока, набегающего на лопасти ветроколеса ветрогенератора. Воздуховод выполнен из полипропиленовой трубы внутренним диаметром 150 мм и длиной 1 м. Ветрогенератор выполнен на базе вентилятора Zalman ZM-F3 (SF) размером 150x150 мм, представляющего собой многолопастную горизонтально-осевую ветроэнергетическую установку очень малой мощности [32, 33].

Для измерения значений микроклиматических параметров использован цифровой многоцелевой анемометр NKTECH NK-W0 (рисунок 2.4), позволяющий производить измерения скорости ветра, относительной влажности и температуры воздуха в режиме реального времени. Измерительный прибор обладает следующими техническими параметрами:

- диапазон измерения скорости ветра: 0,3...30 м/с;
- разрешение измеряемой скорости ветра: 0,1 м/с;
- погрешность измерения скорости ветра:  $\pm 5\%$ ;

- диапазон измеряемой температуры воздуха:  $-10...50^{\circ}\text{C}$ ;
- разрешение измеряемой температуры воздуха:  $0,1^{\circ}\text{C}$ ;
- погрешность измерения температуры воздуха:  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ;
- диапазон измеряемой относительной влажности:  $20...99\%$ ;
- погрешность измерения относительной влажности воздуха:  $5\%$ ;
- разрешение измеряемой относительной влажности воздуха:  $1\%$ .



Рисунок 2.4 – Анемометр NKTECH NK-W0

Для измерения значения атмосферного давления использован аналоговый барометр B9100G (рисунок 2.5), имеющий следующие технические параметры:

- диапазон измерения атмосферного давления:  $930...1060$  ГПа;
- погрешность измерения атмосферного давления:  $5$  ГПа.

Для измерения напряжения и силы тока в цепи переменной нагрузки использованы цифровой мультиметр SmartBuy SBT-DT9201A с погрешностью показаний напряжения  $0,5\%$ , минимальным напряжением  $0,2$  В и аналоговый вольтамперметр производителя «Электроточприбор» модель «М2051» с классом точности  $0,5$ .



Рисунок 2.5 – Барометр B9100G

Изменение значений контролируемых метеорологических параметров обеспечивалось сменой времени проведения эксперимента, вентиляцией помещения, а также использованием следующих средств:

- тепловентилятор Equation 2000 Вт;
- увлажнитель воздуха Humidifier.

Электрическая схема экспериментальной установки представляет собой ЭДС генератора, его внутреннее сопротивление и батарею сопротивлений, выполняющих роль сопротивления нагрузки (рисунок 2.6).

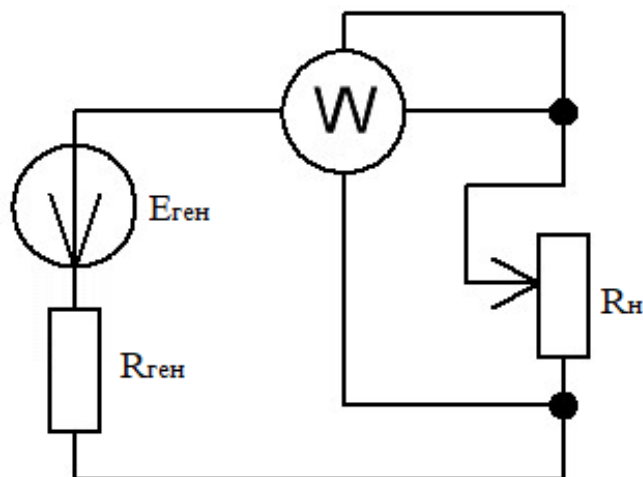


Рисунок 2.6 – Электрическая схема экспериментальной установки

В ходе экспериментального исследования динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на мощность ветрового потока и, соответственно, на величину вырабатываемой электрической энергии изменению подвергались только те метеорологические величины, влияние которых на исследуемый параметр подлежало оценке. Остальные параметры фиксировались на постоянном уровне: температура воздуха  $T_{\text{ср}} = 19\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха  $\varphi_{\text{ср}} = 38\%$ , атмосферное давление  $P_{\text{атм.ср.}} = 752\text{ мм рт.ст.}$ , скорость воздушного потока  $v_{\text{эксп}} = 9\text{ м/с}$ .

При проведении каждого опыта осуществлен контроль значений скорости ветрового потока, атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Изменение температуры и относительной влажности воздуха производилось путем нагревания, увлажнения и проветривания помещения.

Для построения зависимости мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, от атмосферного давления проводилась серия опытов в разные дни при различных значениях атмосферного давления. При этом значения температуры и относительной влажности воздуха поддерживались искусственно на одном уровне.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории при условии герметичности помещения, что позволило снизить влияние внешней среды на результаты проведения опытов. При проведении эксперимента удалось зарегистрировать изменение значений метеорологических факторов в следующих диапазонах:  $T \in [13; 25]\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $P_{\text{атм}} \in [749; 765]\text{ мм рт.ст.}$ ,  $\varphi \in [28; 48]\text{ \%}$ .

В рамках исследования составлена база данных результатов эксперимента, содержащая значения мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой в ходе проведения опытов. Суть каждого опыта заключалась в измерении генерируемой мощности при фиксированных значениях контролируемых метеорологических параметров. Для каждого набора значений метеорологических параметров проводилось 3 наблюдения, по результатам которых определены среднеарифметические значения генерируемой мощности следующим образом [44, 72, 78]

$$\overline{N_{\text{эксн}}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_{\text{эксн}.i}, \quad (2.15)$$

где  $N_{\text{эксн}.i}$  – результат  $i$ -того измерения генерируемой мощности, Вт;

$n$  – количество наблюдений, проводимых в рамках одного опыта.

Погрешность измерений определена как сумма случайных и систематических погрешностей [44, 72, 78]

$$\Delta N_{\Sigma} = \sqrt{\Delta N_{\text{случ}}^2 + \Delta N_{\text{сист}}^2}, \quad (2.16)$$

где  $\Delta N_{\Sigma}$  – погрешность измерений;

$\Delta N_{\text{случ}}$  – случайная погрешность;

$\Delta N_{\text{сист}}$  – систематическая погрешность.

Для расчета систематической погрешности необходимо определить среднюю квадратическую погрешность и коэффициент Стьюдента. Для поиска средней квадратической погрешности использовано следующее выражение [44, 72, 78]

$$S_{\overline{N_{\text{эксн}}}} = +\sqrt{\frac{S_{N_{\text{эксн}}}^2}{n}} = +\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (N_{\text{эксн}.i} - \overline{N_{\text{эксн}}})^2}{n \cdot (n-1)}}, \quad (2.17)$$

где  $S_{N_{\text{эксн}}}^2$  – выборочная дисперсия.

Коэффициент Стьюдента является табличным значением и определяется исходя из количества проводимых наблюдений  $n$  и степеней свободы  $m$ . В рамках проводимого эксперимента количество наблюдений  $n = 3$ , количество степеней свободы  $m = n - 1 = 2$ . Согласно таблице значений коэффициент Стьюдента для уровня значимости  $\alpha = 0,05$  равняется  $t_{\alpha,m} = 4,303$ . В таком случае случайная погрешность определяется следующим образом [44, 72, 78]

$$\Delta N_{\text{случ}} = t_{\alpha,m} \cdot S_{\overline{N_{\text{эксн}}}} = 4,303 \cdot S_{\overline{N_{\text{эксн}}}}. \quad (2.18)$$

Так как в рамках экспериментального исследования значение мощности определялось косвенно расчетным путем как произведение значений измерений

силы тока и напряжения, то для определения систематической погрешности изначально необходимо определить относительную погрешность следующим образом [44, 72, 78]

$$\partial_{N_{\text{сист}}} = \sqrt{\left(\frac{\partial \ln N}{\partial I}\right)^2 + \left(\frac{\partial \ln N}{\partial U}\right)^2} \cdot 100\% = \sqrt{\left(\frac{1}{I} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{1}{U} \cdot \Delta U\right)^2} \cdot 100\%, \quad (2.19)$$

где  $U$  – напряжение, В;

$I$  – сила тока, А;

$\Delta I$  – систематическая погрешность измерения силы тока, А;

$\Delta U$  – систематическая погрешность измерения напряжения, В.

Тогда систематическая погрешность определяется выражением [44, 72, 78]

$$\Delta N_{\text{сист}} = \partial_{N_{\text{сист}}} \cdot N_{\text{эсп}}. \quad (2.20)$$

Согласно техническим характеристикам цифрового мультиметра, применяемого для измерения силы тока, относительная погрешность составляет  $\delta I = \pm 0,5\%$ . Абсолютная погрешность измерений силы тока определяется следующим образом [44, 72, 78]

$$\Delta I = \frac{\partial I}{100} \cdot I. \quad (2.21)$$

Так как класс точности аналогового вольтамперметра, используемого для измерения напряжения, составляет 0,5, то абсолютная погрешность измерения рассчитывается при помощи уравнения [44, 72, 78]

$$\Delta U = \frac{0,5 \cdot U_{\text{max}}}{100}, \quad (2.22)$$

где  $U_{\text{max}}$  – верхний предел измерений шкалы напряжений, В.

Для определения выборочного коэффициента вариации использовано следующее выражение [44, 72, 78]

$$V = \frac{S_{N_{\text{эсп}}}}{N_{\text{эсп}}} \cdot 100\%. \quad (2.23)$$

По результатам вычисления коэффициентов вариации для зависимостей генерируемой мощности от температуры  $V_{N(T)}$ , атмосферного давления  $V_{N(P_{\text{атм}})}$  и относительной влажности воздуха  $V_{N(\varphi)}$  получены следующие результаты:

- коэффициент вариации  $V_{N(T)} = 1,47\%$ ;
- коэффициент вариации  $V_{N(P_{\text{атм}})} = 0,99\%$ ;
- коэффициент вариации  $V_{N(\varphi)} = 0,94\%$ .

Графики, визуально демонстрирующие исследуемую зависимость, представлены на рисунках 2.7-2.9. Полный объем экспериментальных данных приведен в приложении Г [65, 66].

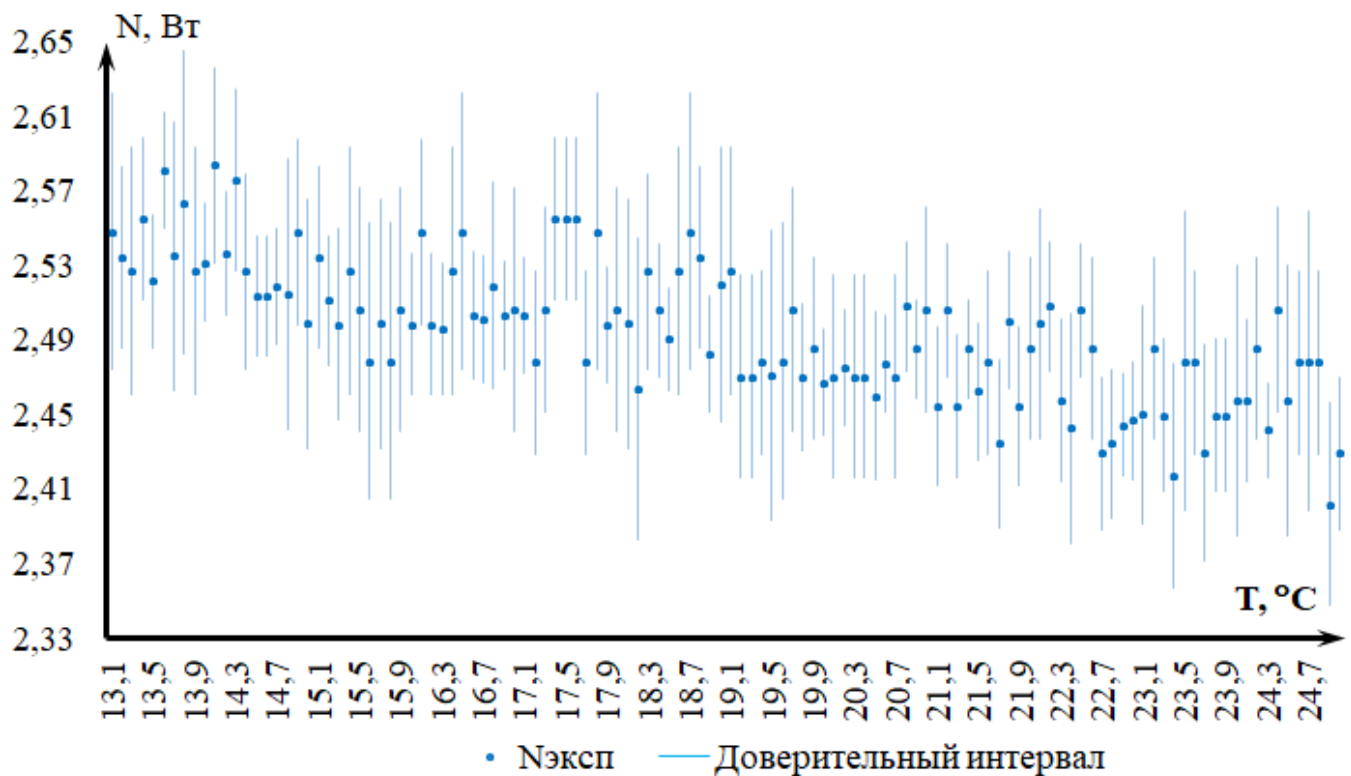


Рисунок 2.7 – Зависимость выработки экспериментальной установки от температуры окружающего воздуха

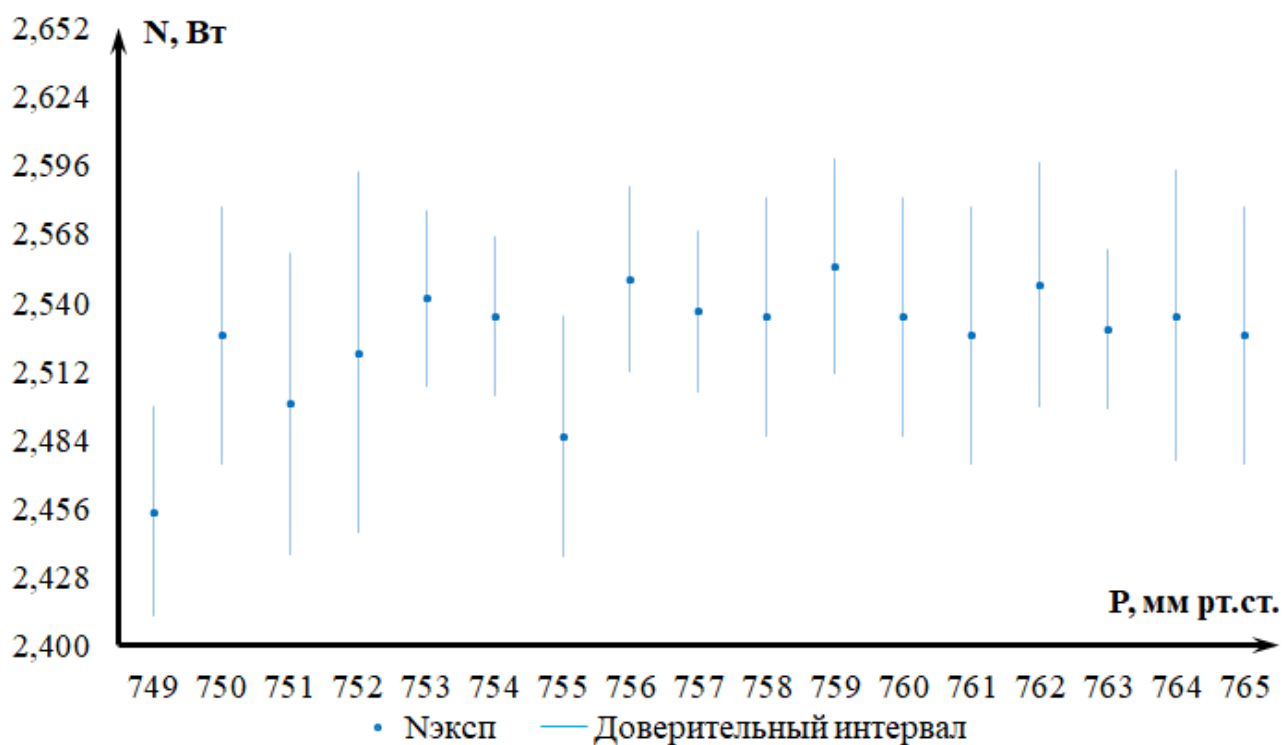


Рисунок 2.8 – Зависимость выработки экспериментальной установки от атмосферного давления

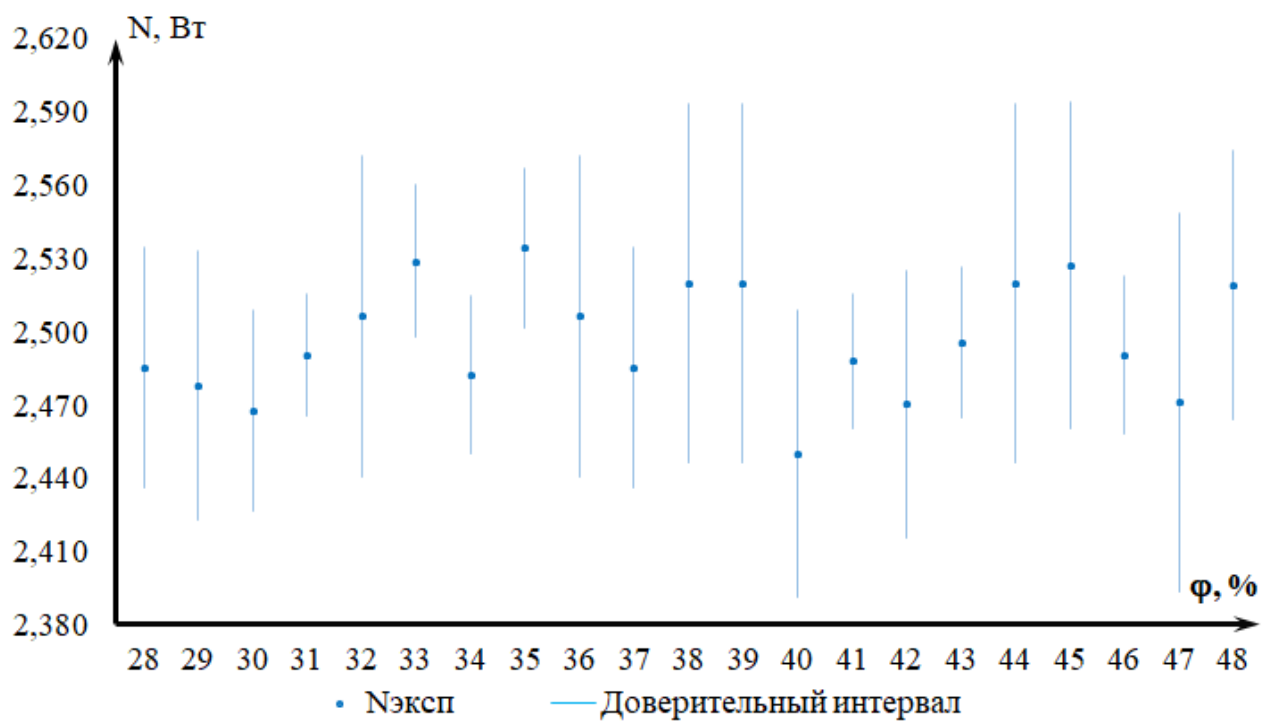


Рисунок 2.9 – Зависимость выработки экспериментальной установки от относительной влажности воздуха



В ходе составления базы данных результатов эксперимента проведена проверка результатов измерений на наличие грубых погрешностей, что обеспечило достоверность собранных данных. На основе проведенных исследований определены доверительные интервалы, позволяющие оценить математическое ожидание мощности, генерируемой экспериментальной установкой, что позволило определить область значений, соответствующую достоверным значениям экспериментальных данных.

### **2.3 Сравнительный анализ математических моделей оценки ветроэнергетического потенциала**

Для оценки точности общепринятой и разработанной математических моделей удельной мощности ветрового потока необходимо сравнить результаты расчетов с экспериментальными данными для каждого опыта и выполнить статистический анализ ошибок моделей. Мощность, генерируемая ветроэнергетической установкой, определяется следующим образом

$$N_{\text{эсп. уст.}} = N_{\text{уд}} \cdot S_{\text{вк}} \cdot \eta \cdot \xi. \quad (2.24)$$

Учитывая прямую пропорциональность между мощностью, генерируемой ВЭУ, и удельной мощностью ветрового потока, для расчета мощности в рамках сравнительного анализа точности математических моделей использованы следующие уравнения

$$N_{\text{он}} = \frac{\rho_{\text{ср}} \cdot v^3}{2} \cdot \xi \cdot \eta \cdot S_{\text{вк}}, \quad (2.25)$$

где  $N_{\text{он}}$  – расчетное значение выработки экспериментальной установки, определенное в соответствии с общепринятым подходом к оценке ветроэнергетического потенциала;

$$N_{дин} = \frac{P_{атм} - 2,315 \cdot \varphi \cdot e^{\left( \frac{(\alpha \cdot (T - 273,15))}{\beta + T - 273,15} \right)}}{573,8 \cdot T} \cdot v^3 \cdot \xi \cdot \eta \cdot S_{вк}, \quad (2.26)$$

где  $N_{дин}$  – расчетное значение выработки экспериментальной установки, определенное в соответствии с математической моделью оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров.

Используя уравнения (2.25) и (2.26), для каждого опыта произведен расчет мощности, генерируемой экспериментальной установкой, с учетом следующих данных:

- $S_{вк} = 0,018 \text{ м}^2$ ;
- $\xi \cdot \eta = 0,32$ ;
- $\rho_{ср} = 1,246 \text{ кг/м}^3$ .

Результаты расчета мощности, генерируемой экспериментальной установкой, приведены в приложении Д. Соответствующие графики приведены на рисунках 2.10-2.12.

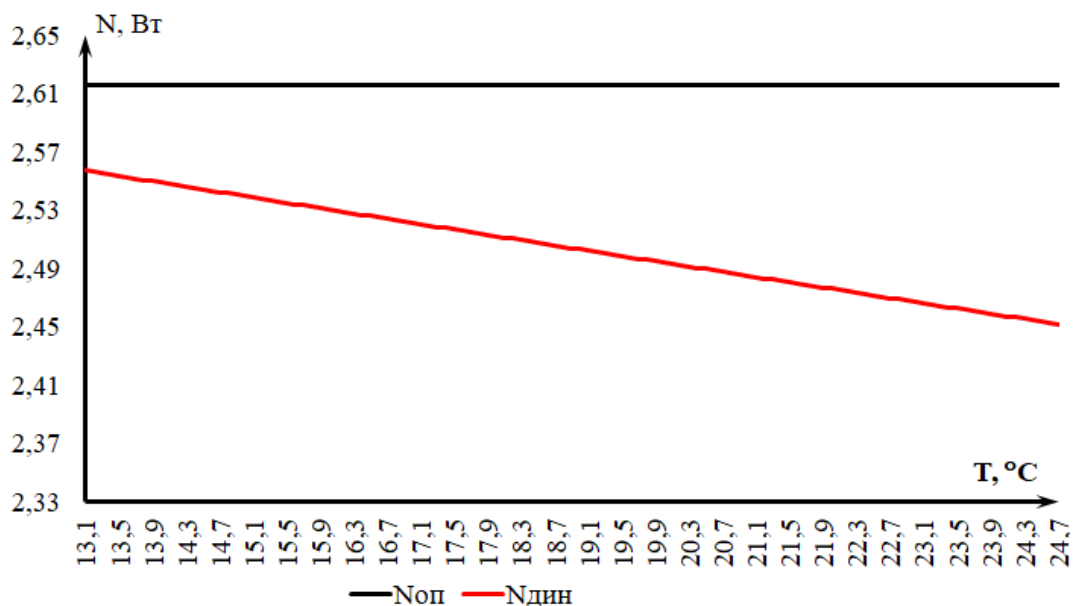


Рисунок 2.10 – Зависимость расчетных значений выработки экспериментальной установки от температуры окружающего воздуха

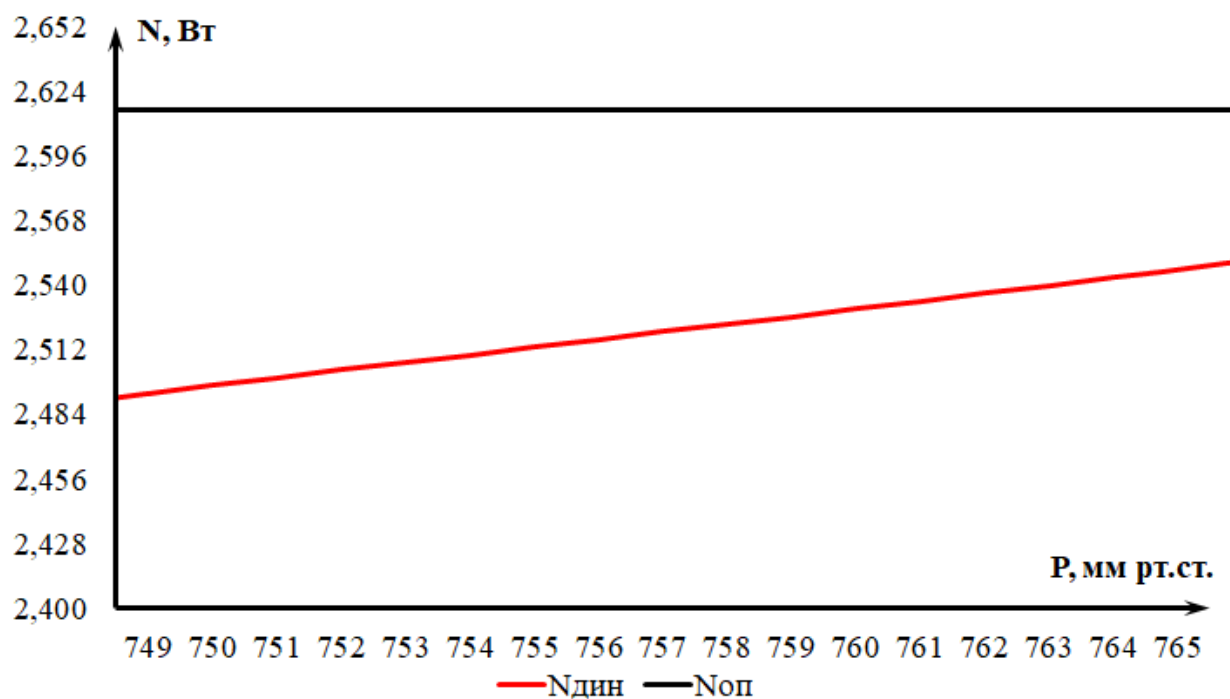


Рисунок 2.11 – Зависимость расчетных значений выработки экспериментальной установки от атмосферного давления

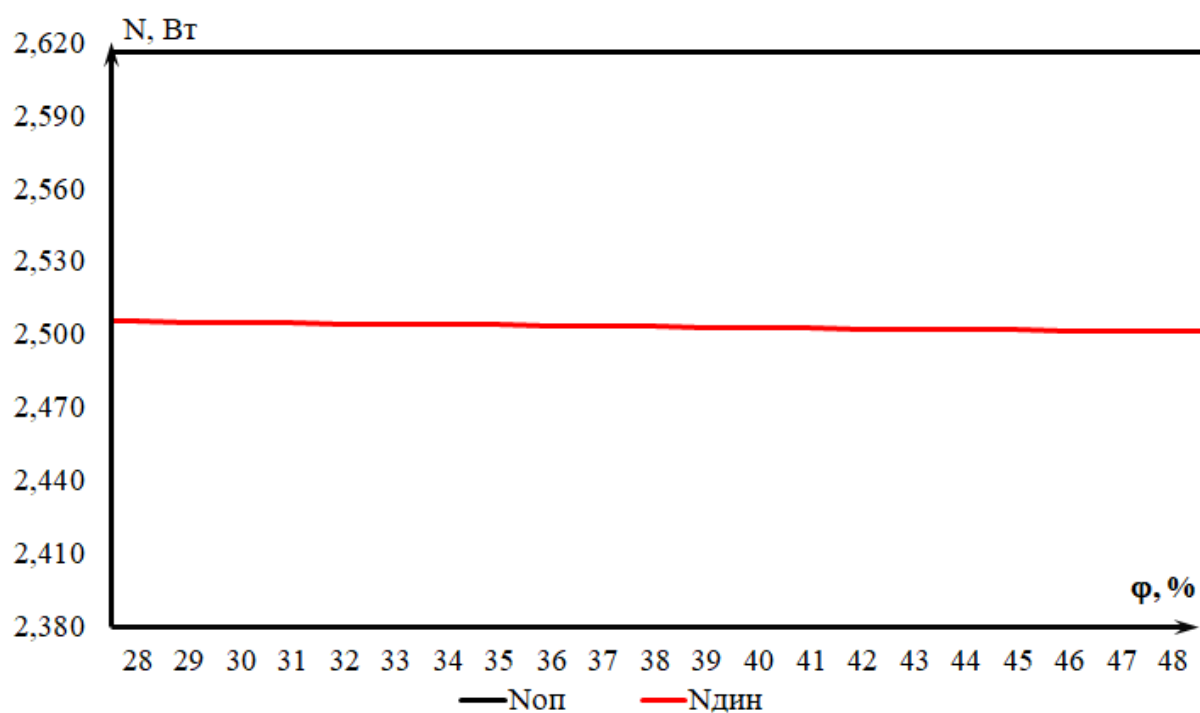


Рисунок 2.12 – Зависимость расчетных значений выработки экспериментальной установки от относительной влажности воздуха

Сопоставленные графики экспериментальных и расчетных значений приведены на рисунках 2.13-2.15.

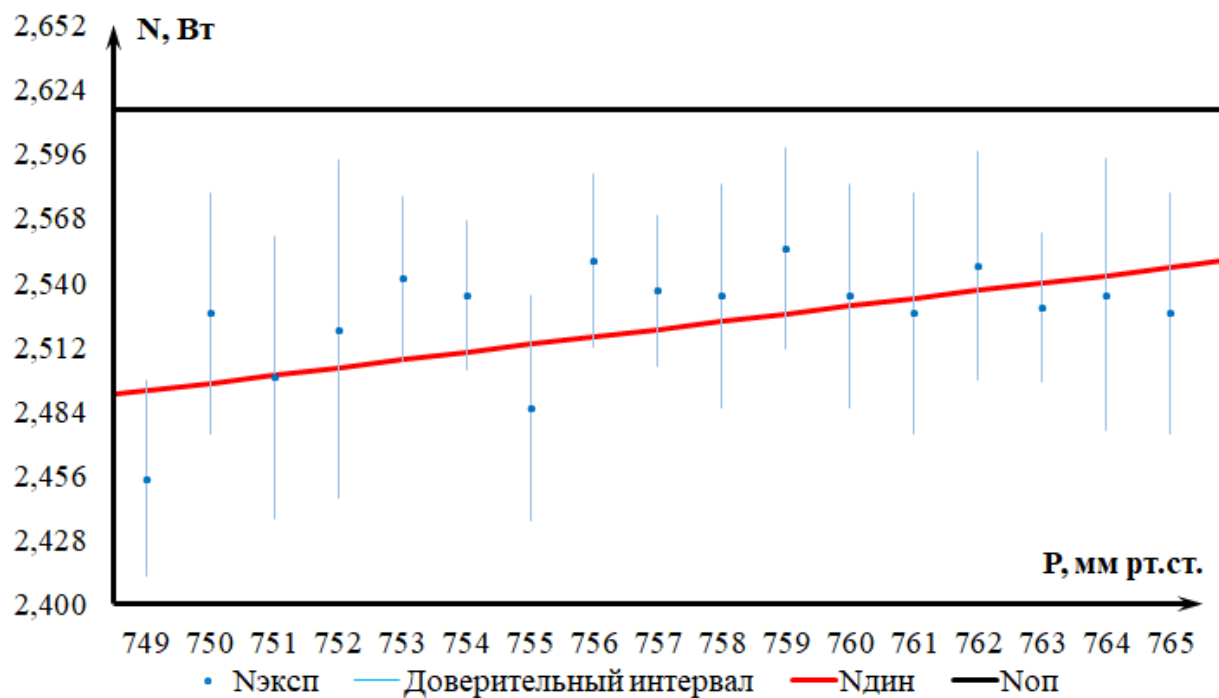


Рисунок 2.13 – Сопоставленные графики зависимости расчетных и экспериментальных значений выработки экспериментальной установки от атмосферного давления

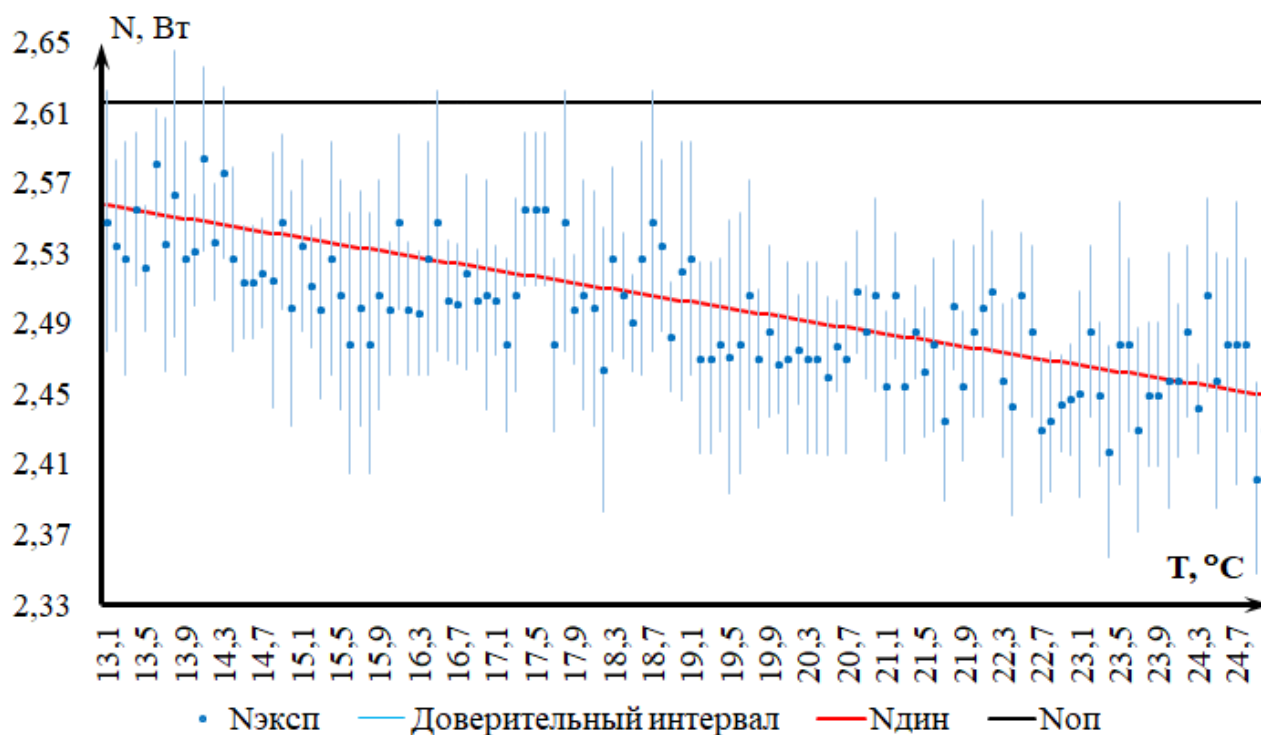


Рисунок 2.14 – Сопоставленные графики зависимости расчетных и экспериментальных значений выработки экспериментальной установки от температуры воздуха

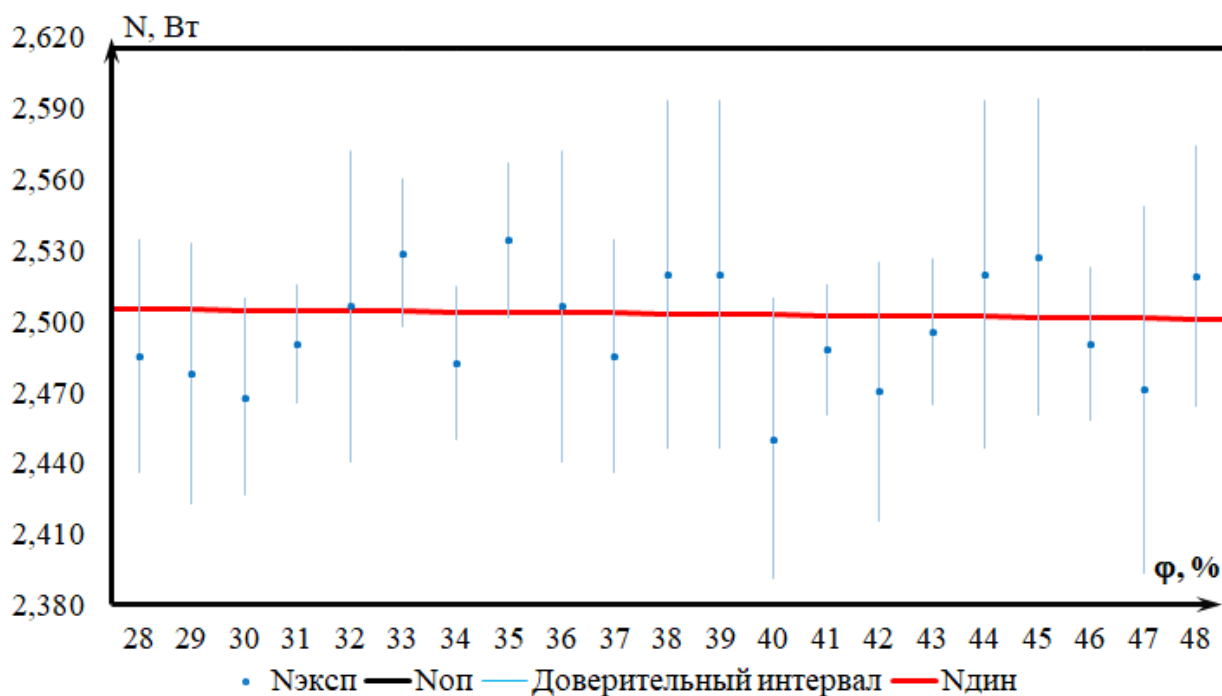


Рисунок 2.15 – Сопоставленные графики зависимости расчетных и экспериментальных значений выработки экспериментальной установки от относительной влажности воздуха

Из рисунков 2.13-2.15 видно, что расчетные значения мощности, генерируемой экспериментальной установкой, полученные в соответствии с разработанной математической моделью оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров, входят в доверительный интервал экспериментальных значений генерируемой мощности. Таким образом, можно заключить, что разработанная математическая модель с вероятностью 95% обеспечивает достоверность результатов оценки ветроэнергетического потенциала.

В то же время результаты расчета мощности, генерируемой экспериментальной установкой, полученные в соответствии с общепринятым подходом, имеют малое количество пересечения доверительного интервала экспериментальных значений генерируемой мощности, что обусловлено усреднением характеристик воздуха. Следовательно, общепринятая математическая модель оценки ветроэнергетического потенциала имеет

ограниченные возможности для применения, так как она не учитывает динамику энергии ветрового потока. Как результат, ее применение целесообразно в случае незначительных отклонений плотности воздуха от среднестатистических значений.

Для количественной оценки точности математических моделей проведен сравнительный анализ результатов расчетов генерируемой мощности.

Абсолютная ошибка расчета мощности определяется выражением [44, 72, 78]

$$\Delta_{расч.i} = N_{расч.i} - N_{эксп.i} . \quad (2.27)$$

где  $i$  – номер опыта;

$N_{расч.i}$  – расчетное значение мощности, генерируемой экспериментальной установкой.

Относительная ошибка расчетов определена следующим образом [44, 72, 78]

$$\delta_{расч.i} = \frac{|N_{расч.i} - N_{эксп.i}|}{N_{эксп.i}} \cdot 100\% . \quad (2.28)$$

Для определения среднего абсолютного отклонения математической модели от экспериментальных данных произведена оценка средней абсолютной ошибки [44, 72, 78]

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta_{расч.i}| . \quad (2.29)$$

Среднеквадратичная ошибка результатов расчетов определяется уравнением [44, 72, 78]

$$S_{Nрасч} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta_{расч.i})^2} . \quad (2.30)$$

Для оценки ошибки расчетов в процентном соотношении определена средняя относительная ошибка следующим образом [44, 72, 78]

$$\overline{\delta_{расч.i}} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_{расч.i}}{n} \cdot 100\% . \quad (2.31)$$

Для проведения сравнительного анализа точности общепринятой и разработанной математических моделей оценки ветровых энергоресурсов расчетные данные, соответствующие разным этапам статистического анализа, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Данные для сравнительного анализа точности математических моделей оценки ветроэнергетических ресурсов

| Критерий                        | N=f(T)          |                  | N=f(P <sub>атм</sub> ) |                  | N=f(φ)          |                  |
|---------------------------------|-----------------|------------------|------------------------|------------------|-----------------|------------------|
|                                 | N <sub>оп</sub> | N <sub>дин</sub> | N <sub>оп</sub>        | N <sub>дин</sub> | N <sub>оп</sub> | N <sub>дин</sub> |
| $\overline{\Delta_{расч}}$ , Вт | 0,12            | 0,02             | 0,09                   | 0,019            | 0,12            | 0,02             |
| S <sub>Nрасч</sub> , %          | 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             |

По итогам проведения сравнительного анализа точности математических моделей выяснено, что математическая модель оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров является более точной по сравнению с общепринятой моделью, так как она обеспечивает меньшие значения погрешностей расчетных значений по сравнению с экспериментальными значениями. Так, например, максимальная разница между средними относительными ошибками расчетов генерируемой мощности наблюдается при сравнении расчетных значений с экспериментальными значениями, полученными при исследовании зависимости генерируемой мощности от температуры ( $\overline{\delta_{расч.Nоп}} - \overline{\delta_{расч.Nдин}} = 4,89 - 0,92 = 3,97\%$ ). При анализе всего объема расчетных и экспериментальных данных для каждого опыта выяснено, что

максимальная разница между относительными ошибками расчетов, полученными в результате применения общепринятой ( $\delta_{\text{расч.Ноп}} = 8,91\%$ ) и разработанной ( $\delta_{\text{расч.Ндин}} = 2\%$ ) математических моделей оценки ветроэнергетического потенциала, составляет  $\delta_{\text{расч.Н}} = 6,91\%$ .

Таким образом, можно заключить, что применение разработанной математической модели оценки ветроэнергетического потенциала 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.

#### **2.4 Дифференциальная оценка влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока**

Для определения значимости атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха как факторов, входящих в разработанную математическую модель оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, проведена дифференциальная оценка их влияния на удельную мощность ветрового потока. С учетом того, что по итогам сравнительного анализа расчетных и экспериментальных значений, описанного в пункте 2.3, разработанная математическая модель с вероятностью 95% соответствует фактическим значениям выработки ветрогенератора, дифференциальная оценка значимости метеорологических факторов проводилась при отсутствии данных натурного эксперимента исключительно на основе расчетных значений модели, что позволило расширить диапазон значений атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха, используемых при расчетах удельной мощности ветрового потока. Так как в рамках исследования не проводилась оценка влияния скорости ветрового потока на удельную мощность ветрового потока, то ее значение принято равным 1 м/с.



Для проведения расчетов использована база данных значений метеорологических параметров г. Барнаула из открытых источников, в том числе ООО «Расписание погоды». Экстремальные значения атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Значения метеорологических параметров г. Барнаула

| Метеорологический параметр         | Минимальное значение | Максимальное значение |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| Атмосферное давление, Па           | 96790                | 104256                |
| Температура, К                     | 236,15               | 310,15                |
| Относительная влажность воздуха, % | 8                    | 94                    |

Для расчета удельной мощности ветрового потока использовано уравнение (2.13). Для оценки значимости факторов математической модели определено процентное отклонение максимума расчетных значений от минимума следующим образом [44, 72, 78]

$$\delta_{\text{Откл}} = \frac{N_{\text{макс.}j} - N_{\text{мин.}j}}{N_{\text{мин.}j}} \cdot 100\%, \quad (2.32)$$

где  $N_{\text{макс.}j}$  – максимальное расчетное значение удельной мощности ветрового потока при исследовании значимости  $j$ -того фактора, Вт;

$N_{\text{мин.}j}$  – минимальное расчетное значение удельной мощности ветрового потока при исследовании значимости  $j$ -того фактора, Вт.

Для оценки значимости факторов математической модели оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на основе уравнения (2.13) составлены следующие функции зависимости удельной мощности ветрового потока от атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха

$$N_{y\partial}(\varphi) = \begin{cases} 0,714 - \varphi_i \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \min, T \rightarrow \min \\ 0,618 - \varphi_i \cdot 14,8 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \min, T = 0^{\circ}C \\ 0,618 - \varphi_i \cdot 14,8 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \min, T \rightarrow 0^{+}C \\ 0,544 - \varphi_i \cdot 133,4 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \min, T \rightarrow \max, \\ 0,769 - \varphi_i \cdot 0,5 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \max, T \rightarrow \min \\ 0,665 - \varphi_i \cdot 14,8 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \max, T = 0^{\circ}C \\ 0,665 - \varphi_i \cdot 14,8 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \max, T \rightarrow 0^{+}C \\ 0,586 - \varphi_i \cdot 133,4 \cdot 10^{-6}, \text{ при } P_{атм} \rightarrow \max, T \rightarrow \max \end{cases}, \quad (2.33)$$

где  $\varphi_i$  – относительная влажность воздуха при  $i$ -том расчете, %.

$$N_{y\partial}(P_{атм}) = \begin{cases} (P_{атм.i} \cdot 7,38 - 4,015) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \min, T \rightarrow \min \\ (P_{атм.i} \cdot 6,38 - 118,16) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \min, T = 0^{\circ}C \\ (P_{атм.i} \cdot 6,38 - 118,24) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \min, T \rightarrow 0^{+}C \\ (P_{атм.i} \cdot 5,619 - 1067) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \min, T \rightarrow \max \\ (P_{атм.i} \cdot 7,38 - 50,186) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \max, T \rightarrow \min \\ (P_{атм.i} \cdot 6,38 - 1478) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \max, T = 0^{\circ}C \\ (P_{атм.i} \cdot 6,38 - 1477) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \max, T \rightarrow 0^{+}C \\ (P_{атм.i} \cdot 5,619 - 13343) \cdot 10^{-6}, \text{ при } \varphi \rightarrow \max, T \rightarrow \max \end{cases}, \quad (2.34)$$

где  $P_{атм.i}$  – атмосферное давление при  $i$ -том расчете, Па.

$$N_{y\partial}(T) = \begin{cases} \frac{1}{T_i} (168,68 - 3,23 \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i + 273,15}\right)} \cdot 10^{-3}), \text{ при } \varphi \rightarrow \min, P_{атм} \rightarrow \min \\ \frac{1}{T_i} (181,69 - 3,23 \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i + 273,15}\right)} \cdot 10^{-3}), \text{ при } \varphi \rightarrow \min, P_{атм} \rightarrow \max \\ \frac{1}{T_i} (168,68 - 37,92 \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i + 273,15}\right)} \cdot 10^{-3}), \text{ при } \varphi \rightarrow \max, P_{атм} \rightarrow \min \\ \frac{1}{T_i} (181,69 - 37,92 \cdot e^{\left(\frac{\alpha \cdot (T_i - 273,15)}{\beta + T_i + 273,15}\right)} \cdot 10^{-3}), \text{ при } \varphi \rightarrow \max, P_{атм} \rightarrow \max \end{cases}, \quad (2.35)$$

где  $T_i$  – температура воздуха при  $i$ -том расчете, К.

Системы уравнений (2.33)-(2.35) содержат функции зависимости удельной мощности ветрового потока от метеорологических параметров при граничных условиях неизменяемых величин. В качестве граничных условий неизменяемой температуры воздуха определены не только экстремумы, но и значения температуры  $T = 0^{\circ}\text{C}$  и  $T \rightarrow 0^{+} \text{ }^{\circ}\text{C}$ , что обусловлено изменением значений коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ . Результаты расчетов приведены в таблицах 2.3-2.5, где  $i_1, i_2, \dots, i_n$  – номер уравнения функции зависимости рассчитываемой величины.

Таблица 2.3 – Результаты расчета удельной мощности ветрового потока для функции  $N_{y0}(\varphi)$

| № урав-<br>нения<br>$\varphi, \%$ | Расчетное значение удельной мощности ветрового потока $N_{y0}(\varphi)$ , Вт |       |       |       |       |       |       |       |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                   | $i_1$                                                                        | $i_2$ | $i_3$ | $i_4$ | $i_5$ | $i_6$ | $i_7$ | $i_8$ |
| 1                                 | 2                                                                            | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     |
| 8                                 | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,543 | 0,769 | 0,665 | 0,665 | 0,585 |
| 16,6                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,542 | 0,769 | 0,665 | 0,665 | 0,584 |
| 25,2                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,541 | 0,769 | 0,665 | 0,665 | 0,582 |
| 33,8                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,539 | 0,769 | 0,665 | 0,665 | 0,581 |
| 42,4                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,538 | 0,769 | 0,665 | 0,665 | 0,580 |
| 51                                | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,537 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,579 |
| 59,6                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,536 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,578 |
| 68,2                              | 0,714                                                                        | 0,617 | 0,617 | 0,535 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,577 |
| 76,8                              | 0,714                                                                        | 0,616 | 0,616 | 0,534 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,576 |
| 85,4                              | 0,714                                                                        | 0,616 | 0,616 | 0,532 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,574 |
| 94                                | 0,714                                                                        | 0,616 | 0,616 | 0,531 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,573 |
| $\delta N, \%$                    | 0,01                                                                         | 0,21  | 0,21  | 2,16  | 0,01  | 0,19  | 0,19  | 2,00  |

Таблица 2.4 – Результаты расчета удельной мощности ветрового потока для функции  $N_{y0}(P_{атм})$

| <div> <div>№ урав-</div> <div>Р<sub>атм</sub>, мм рт.ст</div> <div>нения</div> </div> | <div>Расчетное значение удельной мощности ветрового потока</div> <div><math>N_{yd}(P_{атм}), \text{Вт}</math></div> |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                       | i1                                                                                                                  | i2    | i3    | i4    | i5    | i6    | i7    | i8    |
| 726                                                                                   | 0,714                                                                                                               | 0,617 | 0,617 | 0,543 | 0,714 | 0,616 | 0,616 | 0,531 |
| 732,2                                                                                 | 0,720                                                                                                               | 0,623 | 0,623 | 0,547 | 0,720 | 0,621 | 0,621 | 0,535 |
| 738,4                                                                                 | 0,727                                                                                                               | 0,628 | 0,628 | 0,552 | 0,726 | 0,627 | 0,627 | 0,540 |
| 744,6                                                                                 | 0,733                                                                                                               | 0,633 | 0,633 | 0,557 | 0,733 | 0,632 | 0,632 | 0,544 |
| 750,8                                                                                 | 0,739                                                                                                               | 0,639 | 0,639 | 0,561 | 0,739 | 0,637 | 0,637 | 0,549 |
| 757                                                                                   | 0,745                                                                                                               | 0,644 | 0,644 | 0,566 | 0,745 | 0,642 | 0,642 | 0,554 |
| 763,2                                                                                 | 0,751                                                                                                               | 0,649 | 0,649 | 0,571 | 0,751 | 0,648 | 0,648 | 0,558 |
| 769,4                                                                                 | 0,757                                                                                                               | 0,654 | 0,654 | 0,575 | 0,757 | 0,653 | 0,653 | 0,563 |
| 775,6                                                                                 | 0,763                                                                                                               | 0,660 | 0,660 | 0,580 | 0,763 | 0,658 | 0,658 | 0,568 |
| 782                                                                                   | 0,769                                                                                                               | 0,665 | 0,665 | 0,585 | 0,769 | 0,664 | 0,664 | 0,572 |
| ΔN, %                                                                                 | 7,71                                                                                                                | 7,71  | 7,71  | 7,73  | 7,71  | 7,73  | 7,73  | 7,91  |

Таблица 2.5 – Результаты расчета удельной мощности ветрового потока для функции  $N_{yd}(T)$

| <div> <div>№ урав-</div> <div>Т, °С</div> <div>нения</div> </div> | <div>Расчетное значение удельной мощности ветрового потока</div> <div><math>N_{yd}(T), \text{Вт}</math></div> |       |       |       |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|
|                                                                   | i1                                                                                                            | i2    | i3    | i4    |
| 1                                                                 | 2                                                                                                             | 3     | 4     | 5     |
| -37                                                               | 0,714                                                                                                         | 0,769 | 0,714 | 0,769 |
| -28,8                                                             | 0,690                                                                                                         | 0,744 | 0,690 | 0,743 |
| -20,6                                                             | 0,668                                                                                                         | 0,719 | 0,668 | 0,719 |

Продолжение таблицы 2.5

|                |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| -12,4          | 0,647 | 0,697 | 0,646 | 0,696 |
| -4,2           | 0,627 | 0,675 | 0,626 | 0,675 |
| 0              | 0,617 | 0,665 | 0,616 | 0,664 |
| 0 <sup>+</sup> | 0,617 | 0,665 | 0,616 | 0,664 |
| 4              | 0,608 | 0,655 | 0,607 | 0,654 |
| 12,2           | 0,591 | 0,636 | 0,588 | 0,634 |
| 20,4           | 0,574 | 0,619 | 0,570 | 0,614 |
| 28,6           | 0,558 | 0,601 | 0,551 | 0,594 |
| 37             | 0,543 | 0,585 | 0,531 | 0,573 |
| $\delta N$ , % | 31,59 | 31,58 | 34,43 | 34,2  |

Согласно системам уравнений (2.33)-(2.35) и данным таблиц 2.3-2.5 при дифференциальной оценке влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока наибольшее влияние оказывает изменение температуры воздуха при условии максимума относительной влажности воздуха и минимума атмосферного давления. При этом во время расчета отмечен диапазон изменения процентного отклонения максимума расчетных значений от минимума  $\delta N \in [31,58; 34,43]$  %. Следовательно, при увеличении относительной влажности воздуха и уменьшении атмосферного давления увеличивается зависимость удельной мощности ветрового потока от температуры.

Также выяснено, что среди факторов математической модели оценки ветровых энергоресурсов в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров наименьшую значимость имеет относительная влажность воздуха, что подтверждается незначительным изменением удельной мощности ветрового потока при минимальных значениях температуры ( $\delta N = 0,01\%$ ). При этом с увеличением температуры увеличивается зависимость удельной мощности ветрового потока от относительной влажности воздуха. Наибольшее влияние наблюдается при условии минимума атмосферного давления и максимума температуры ( $\delta N = 2,16\%$ ). Следовательно, при увеличении

температуры и уменьшении атмосферного давления растет вклад относительной влажности воздуха в изменение значения удельной мощности ветрового потока.

Значительный вклад в изменение удельной мощности ветрового потока ( $\delta N > 7\%$ ) вносит изменение атмосферного давления. Однако при изменении относительной влажности воздуха и температуры влияние атмосферного давления изменяется незначительно ( $\delta N \in [7,71; 7,91] \%$ ).

## **Выводы по главе 2**

Разработана математическая модель оценки ветровых энергоресурсов в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, отражающая зависимость мощности ветрового потока от значений атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха. Адекватность разработанной математической модели подтверждена результатами проведенного экспериментального исследования динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на мощность ветрового потока и, как следствие, электрическую мощность, вырабатываемую ветрогенератором. Достоверность результатов теоретических исследований с вероятностью 95% подтверждена попаданием расчетных значений мощности, полученных при помощи математической модели оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, в доверительный интервал значений мощности, полученных экспериментальным путем.

Применение разработанной математической модели позволяет обеспечить более высокую точность расчетов относительно общепринятых математических моделей оценки ветроэнергетического потенциала местности, что достигается благодаря учету динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на мощность ветрового потока. По данным проведенного исследования выяснено, что применение математической модели оценки ветроэнергетического потенциала в условиях динамического влияния

расширенной группы метеорологических параметров способствует повышению точности расчетов удельной мощности ветрового потока и выработки ветрогенератора по сравнению с общепринятой моделью. В среднем отмечено повышение точности на величину до 3,97%, что соответствует диапазону измерений, а для отдельных измерений – до 6,91%.

При оценке значимости факторов разработанной математической модели оценки ветроэнергетического потенциала выяснено, что наибольшее влияние на удельную мощность ветрового потока оказывает температура воздуха, что подтверждается наибольшим процентным отклонением максимума расчетных значений от минимума ( $\delta N \in [31,58; 34,43] \%$ ). Атмосферное давление также оказывает влияние на изменение удельной мощности ветрового потока. Однако при вариации набора значений температуры и относительной влажности воздуха происходит незначительное изменение процентного отклонения максимума расчетных значений удельной мощности ветрового потока от минимума ( $\delta N \in [7,71; 7,91] \%$ ). При оценке значимости относительной влажности воздуха на изменение удельной мощности ветрового потока выяснено, что исследуемый фактор может как оказывать, так и не оказывать влияние на изменение значений расчетной величины, что обусловлено изменением набора значений температуры и атмосферного давления. Наибольшее влияние отмечается при минимальном значении атмосферного давления и максимальном значении температуры воздуха ( $\delta N = 2,16\%$ ). При этом при уменьшении температуры воздуха уменьшается значимость относительной влажности воздуха, что подтверждается снижением значения процентного отклонения максимума расчетного значения удельной мощности ветрового потока от минимума до значения  $\delta N = 0,01\%$ .

Разработанная математическая модель оценки ветровых энергоресурсов может стать основой для описания работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров. Результаты дифференциального исследования зависимости мощности ветрового потока от значений расширенной группы метеорологических параметров могут быть использованы при определении места, обладающего большей мощностью

ветрового потока, что обусловлено характером зависимости мощности ветрового потока от конкретного метеорологического параметра, и, как следствие, стать основанием для определения места размещения ветроэнергетических установок в зависимости от микроклиматических особенностей местности.

Таким образом, можно заключить, что в данной главе диссертационной работы разработана и описана математическая модель оценки ветровых энергоресурсов, учитывающая динамическое влияние атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на удельную мощность ветрового потока.



## **ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА**

### **3.1 Моделирование работы ветрогенератора на основе общепринятого подхода**

В процессе проектирования системы электроснабжения потребителей с использованием энергоустановок, функционирующих на базе энергии ветра, особую роль играет этап моделирования их работы. В условиях перехода к возобновляемым источникам энергии ВЭУ являются перспективным источником электроэнергии для энергосистем, в том числе в агропромышленном комплексе [37, 39, 40, 52, 54]. Однако высокая стоимость электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, и ее зависимость от природно-климатических факторов обуславливают необходимость всестороннего технико-экономического обоснования принимаемых проектных решений [63, 64, 101, 102].

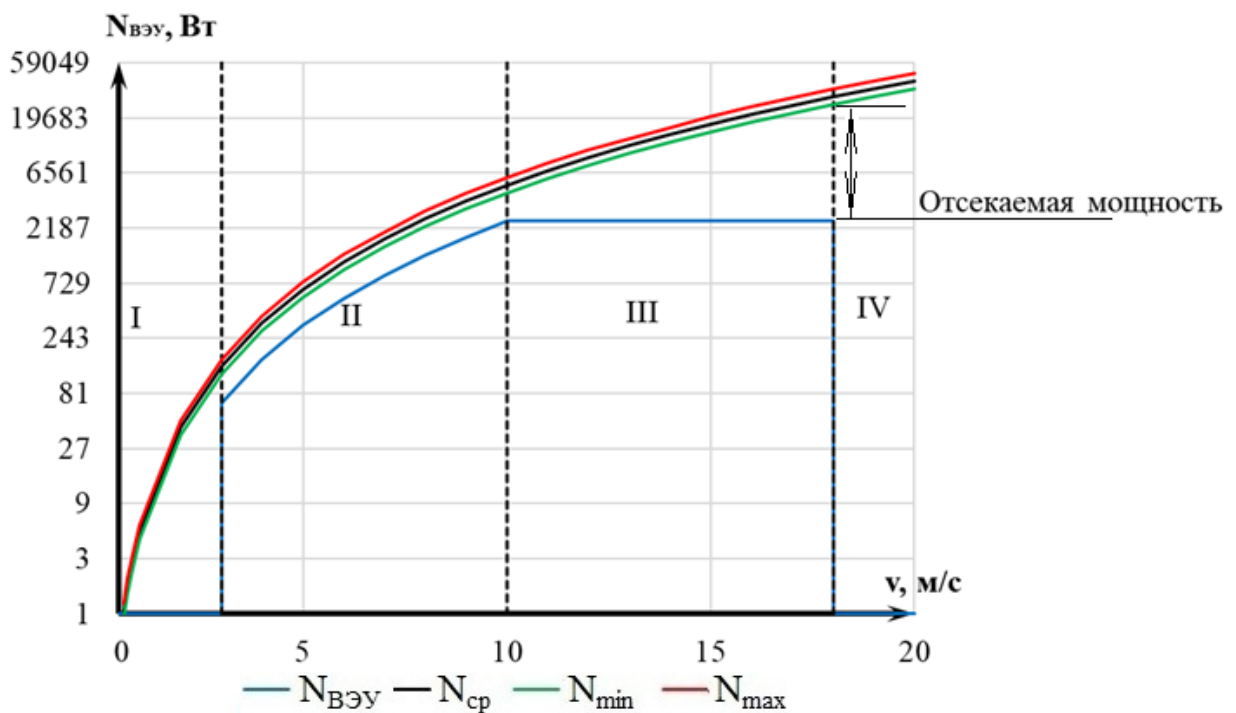
Оценка годовой выработки ветрогенератора на этапе проектирования позволяет осуществлять анализ экономической эффективности внедрения ветроэнергетических установок в качестве основного либо дополнительного источника электроэнергии, в рамках которого определяется стоимость затрат на реализацию, потенциальная доходность и сроки окупаемости проекта электроснабжения. При этом стоит учесть, что важную роль в определении экономической эффективности реализации проектов в области ветроэнергетики играет точность математических моделей работы ветрогенератора, используемых для оценки электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой.

Из общепринятого на сегодняшний день подхода к моделированию работы ветрогенератора известно, что расчет электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, производится в соответствии с системой уравнений (3.1) [32, 33, 41, 50]. При этом графическим представлением зон работы ветрогенератора является энергетическая характеристика ветрогенератора, представляющая собой зависимость мощности,

генерируемой ветроэнергетической установкой, от скорости ветрового потока (рисунок 3.1) [41, 59].

$$\text{при } t_i \in [t_{i-1}; t_i] \quad W_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{при } v(t) < v_0; \\ \int_{t_{i-1}}^{t_i} \left( \frac{\rho_{cp} \cdot v_i^3(t)}{2} \cdot S_{вк} \cdot \eta \cdot \xi \right) dt, & \text{при } v_0 \leq v(t) < v_{ном}; \\ N_{ном.ВЭУ} \cdot \tau, & \text{при } v_{ном} \leq v(t) < v_{max}; \\ 0, & \text{при } v(t) \geq v_{max}. \end{cases} \quad (3.1)$$

где  $\tau$  – время работы ветрогенератора на  $i$ -том промежутке времени, с.



I – зона бездействия генератора; II – зона нарастания мощности генератора;

III – зона работы генератора на номинальной мощности; IV – зона остановки

ВЭУ;  $N_{ВЭУ}$  – энергетическая характеристика ветрогенератора;  $N_{cp}$ ,  $N_{min}$ ,  $N_{max}$  – мощность ветрового потока при среднестатистической, минимальной и максимальной плотностях воздуха для анализируемой местности

соответственно, Вт;

Рисунок 3.1 – Совмещенные графики мощности ветрового потока при различной плотности воздуха и энергетическая характеристика ветрогенератора

В зависимости от характера зависимости вырабатываемой мощности ветрогенератора от скорости ветрового потока выделяют несколько зон, характеризующих режимы работы ВЭУ. К ним относятся два основных режима работы ветроэнергетической установки [41, 53, 59]: режим работы ветрогенератора, сопровождающийся постоянной генерируемой мощностью, соответствующий зоне III на энергетической характеристике ветрогенератора, и режим работы ветрогенератора, сопровождающийся изменением генерируемой мощности, соответствующий зоне II на энергетической характеристике ветрогенератора.

Высокий показатель точности определения зоны энергетической характеристики ветрогенератора способствует снижению ошибки при прогнозировании количества вырабатываемой им электроэнергии в процессе оценки экономической целесообразности реализации проекта электроснабжения на базе энергии ветра. Кроме того, корректное определение зоны работы ветрогенератора способствует принятию стратегии управления, что является одним из необходимых условий эффективной работы ветроэнергетической установки [41, 59].

Известно, что зона I энергетической характеристики представляет собой зону бездействия ВЭУ, когда скорости ветрового потока недостаточно для запуска процесса выработки электроэнергии. Работа ветрогенератора в данной рабочей зоне соответствует следующему диапазону значений скорости ветра [41, 59]

$$v < v_0. \quad (3.2)$$

Предполагается, что достижения стартовой скорости ветра ( $v_0$ ) достаточно для начала процесса генерирования электрической мощности. В таком случае работа ветрогенератора соответствует зоне II его энергетической характеристики. При этом выполняется следующее условие [41, 59]

$$v \in [v_0; v_{ном}). \quad (3.3)$$

При достижении значения номинальной скорости ветра ( $v_{ном}$ ) происходит работа ветрогенератора на номинальной мощности, что соответствует зоне III энергетической характеристики. В таком режиме работы необходимо осуществление отсечки избыточной энергии ветра, что позволяет не превышать пределы электрических и механических расчетных нагрузок генератора. При этом скорость вращения ветроколеса должна оставаться постоянной. Зона III соответствует выполнению следующего условия [41, 59]

$$v \in [v_{ном}; v_{max}). \quad (3.4)$$

Предполагается, что при достижении значения максимальной скорости ВЭУ ( $v_{max}$ ) дальнейшая ее работа может привести к ее поломке. В связи с этим необходимо принятие стратегии управления, позволяющей своевременно производить остановку работы ветроэнергетической установки. В соответствии с общепринятыми подходами к моделированию рабочих процессов ВЭУ зона IV энергетической характеристики ветрогенератора соответствует следующему условию [41, 59]

$$v < v_{max}. \quad (3.5)$$

Согласно уравнению (1.1) мощность ветрового потока зависит от значения плотности воздуха и скорости ветра. На рисунке 3.1 изображены кривые мощности ветрового потока, соответствующие минимальной ( $N_{min}$ ), среднестатистической ( $N_{cp}$ ) и максимальной ( $N_{max}$ ) плотностям воздуха. В то же время в соответствии с уравнением (1.1) графики указанных зависимостей образуют диапазон значений мощности ветрового потока, изменяющихся в зависимости от значений плотности воздуха. С использованием базы данных метеорологических параметров города Белореченска Краснодарского края произведена оценка ветроэнергетического потенциала данного населенного пункта. Выбор данных метеорологических параметров данного населенного пункта обусловлен близостью ветроэнергетических станций, входящих в число

крупнейших с точки зрения установленной мощности ветроэнергетических станций России.

В соответствии с полученными результатами определены значения удельной мощности ветрового потока для диапазона значений скорости ветра от 1 до 20 м/с. Диапазон значений мощности ветрового потока при вариации плотности воздуха от минимального до максимальных значений определен как процентное отклонение максимума значений от минимума [44, 72, 78]

$$\delta N = \left| \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{min}} \right| \cdot 100\% . \quad (3.6)$$

По результатам проведенных расчетов определено, что диапазон значений мощности ветрового потока составляет 34,8%. Отклонения от данного значения обусловлены погрешностью в расчетах вследствие округления значений. Результаты расчетов приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Расчет мощности ветрового потока в городе Белореченске Краснодарского края

| $v$ , м/с | $N_{min}$ | $N_{max}$ | $\delta N$ , % | $v$ , м/с | $N_{min}$ | $N_{max}$ | $\delta N$ , % |
|-----------|-----------|-----------|----------------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| 1         | 2         | 3         | 4              | 1         | 2         | 3         | 4              |
| 1         | 4,41      | 5,94      | 34,7           | 11        | 5870      | 7910      | 34,8           |
| 2         | 35,3      | 47,5      | 34,6           | 12        | 7620      | 10270     | 34,8           |
| 3         | 119,1     | 160,5     | 34,8           | 13        | 9689      | 13057     | 34,8           |
| 4         | 282,2     | 380,4     | 34,8           | 14        | 12101     | 16308     | 34,8           |
| 5         | 551,3     | 742,9     | 34,8           | 15        | 14884     | 20058     | 34,8           |
| 6         | 952,6     | 1284      | 34,8           | 16        | 18063     | 24343     | 34,8           |
| 7         | 1513      | 2039      | 34,8           | 17        | 21667     | 29198     | 34,8           |
| 8         | 2258      | 3043      | 34,8           | 18        | 257190    | 346560    | 34,7           |
| 9         | 3215      | 4332      | 34,7           | 19        | 30248     | 40763     | 34,8           |
| 10        | 4410      | 5943      | 34,8           | 20        | 35280     | 47544     | 34,8           |

Таким образом, при одном и том же значении скорости ветра, в зависимости от плотности воздуха, значения мощности ветрового потока могут значительно различаться. Однако в соответствии с известными на сегодняшний день подходами к моделированию рабочих процессов ВЭУ энергетическая характеристика ветрогенератора строится только на основании данных о скорости ветра и не учитывает изменение механической мощности на валу и генерируемой электрической мощности ветрогенератора в зависимости от значений группы метеорологических параметров. Как следствие, существует вероятность возникновения ошибки при определении зоны энергетической характеристики ветрогенератора, что приводит к неточностям при моделировании работы ВЭУ.

Для оценки ошибки в построении энергетической характеристики при помощи системы уравнений (3.1) произведено моделирование работы ветроэнергетической установки со следующими техническими параметрами:

- ометаемая площадь ветроколеса  $S_{вк} = 12,8 \text{ м}^2$ ;
- номинальная мощность ветрогенератора  $N_{ном.ВЭУ} = 2,5 \text{ кВт}$ ;
- произведение КИЭВ и КПД  $\xi \cdot \eta = 0,32$ ;
- стартовая скорость ВЭУ  $v_0 = 3 \text{ м/с}$ ;
- номинальная скорость ВЭУ  $v_0 = 10 \text{ м/с}$ ;
- максимальная скорость ВЭУ  $v_0 = 18 \text{ м/с}$ .

В рамках проведенного математического моделирования работы ВЭУ с использованием системы уравнений (3.1) построены графики генерируемой мощности при различных значениях плотности воздуха – максимальной, среднестатистической и минимальной. По результатам расчетов выявлено, что энергетическая характеристика ВЭУ достигает номинальной мощности генератора при различных скоростях ветра в зависимости от плотности воздуха. Однако в соответствии с общепринятым подходом к моделированию работы ветроэнергетической установки достижение номинальной мощности ветрогенератора считается возможным при скорости ветра, соответствующей среднестатистическому значению плотности воздуха. Также установлено, что изменение плотности воздуха ведет к смещению точки выхода ветрогенератора на

номинальную мощность, что приводит к возникновению ошибки при определении точки перехода из одной зоны рабочего режима в другой, определяемой следующим выражением [44, 72, 78]

$$\partial v = \left| \frac{v_{номi} - v_{ном}}{v_{ном}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.7)$$

где  $v_{номi}$  — скорость ветра, соответствующая выходу ветрогенератора на номинальную мощность для энергетической характеристики при  $i$ -том расчете, м/с.

На основании уравнения (2.25) определим значение скорости ветра, соответствующей выходу ветрогенератора на номинальную мощность. Для этого необходимо принять значение мощности ветрогенератора равное номинальной мощности ветрогенератора. Таким образом, скорость выхода ветрогенератора на номинальную мощность можно определить при помощи следующего уравнения

$$v_{номi} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N_{ном}}{\rho_i \cdot \xi \cdot \eta}}, \quad (3.8)$$

где  $\rho_i$  — плотность воздуха для  $i$ -того расчета, кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, скорость выхода ветрогенератора на номинальную мощность при минимальной и максимальной плотности воздуха составляет

$$v_{ном\rho_{\max}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N_{ном}}{\rho_{\max} \cdot \xi \cdot \eta \cdot S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2500}{1,4 \cdot 0,32 \cdot 12,8}} = 9,55 \text{ м/с.}$$

$$v_{ном\rho_{\min}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N_{ном}}{\rho_{\min} \cdot \xi \cdot \eta \cdot S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 2500}{1,03 \cdot 0,32 \cdot 12,8}} = 10,58 \text{ м/с.}$$

Следовательно, переход энергетической характеристики из зоны II в зону III осуществляется в диапазоне скорости ветра от 9,55 до 10,58 м/с. Учитывая, что значение номинальной скорости ВЭУ составляет 10 м/с, ошибка определения точки выхода энергетической характеристики на номинальную мощность составляет

$$\partial v = \left| \frac{10,58 - 10}{10} \right| \cdot 100\% = 5,8\%;$$

$$\delta v = \left| \frac{9,55 - 10}{10} \right| \cdot 100\% = 4,5\%.$$

Таким образом, ошибка определения точки выхода ветрогенератора на номинальную мощность для работы моделируемой ветроэнергетической установки в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края достигает значения 5,83%. Результаты моделирования перехода энергетической характеристики из зоны II в зону III отображены на рисунке 3.2.

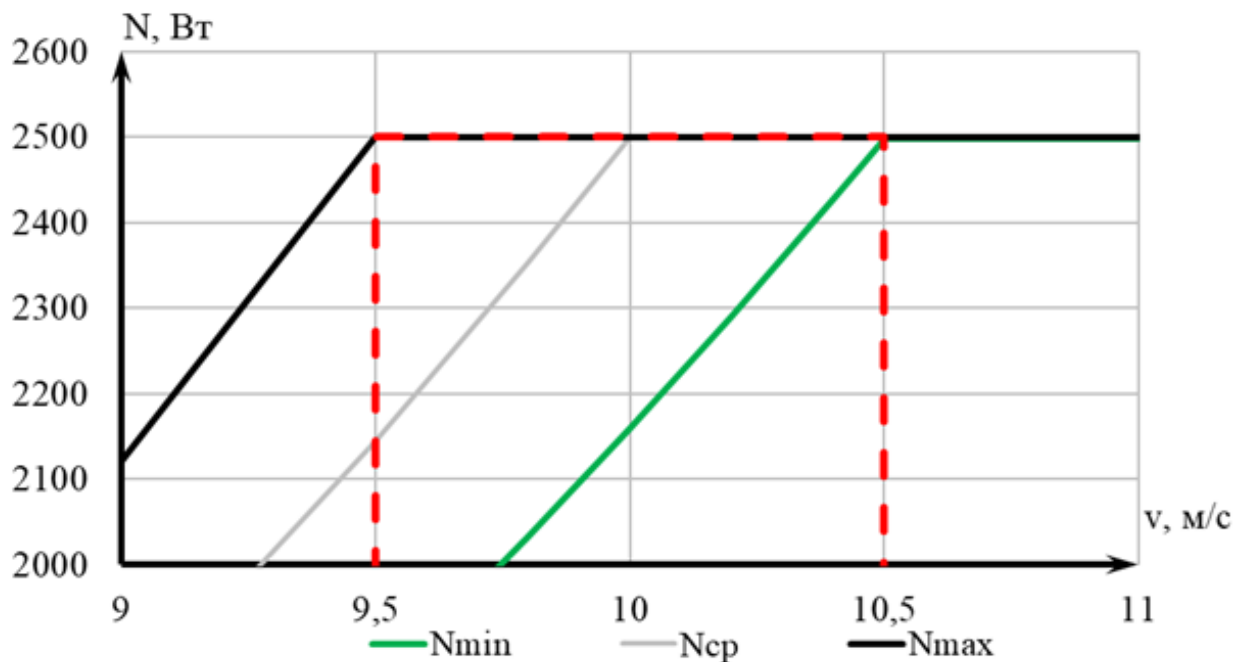


Рисунок 3.2 – Результаты моделирования перехода энергетической характеристики ветрогенератора в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края из зоны II в зону III

При моделировании также возникает ошибка определения точки перехода энергетической характеристики ветрогенератора из зоны III в зону IV. При среднестатистическом значении плотности воздуха и максимальной скорости ВЭУ  $v_{max} = 18$  м/с мощность ветрового потока составляет

$$N_{max\,cp} = \frac{\rho \cdot v^3}{2} \cdot S = \frac{1,216 \cdot 18^3}{2} \cdot 12,8 = 45387 \text{ Вт.}$$



Скорость ветра, при которой мощность ветрового потока достигает значения  $N_{max\rho\rho}$  при максимальной и минимальной плотностях воздуха, составляет

$$v_{\max \rho \max} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N}{\rho_{\max} \cdot S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 45387}{1,4 \cdot 12,8}} = 17,17 \text{ м/с},$$

где  $v_{\max \rho \max}$  – скорость ветра, соответствующая значению мощности ветрового потока  $N_{\max\rho\rho} = 45387$  Вт при плотности воздуха  $\rho_{\max} = 1,4 \text{ кг/м}^3$ ;

$$v_{\max \rho \min} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot N}{\rho_{\min} \cdot S}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 45387}{1,03 \cdot 12,8}} = 19,02 \text{ м/с},$$

где  $v_{\max \rho \min}$  – скорость ветра, соответствующая значению мощности ветрового потока  $N_{\max\rho\rho} = 45387$  Вт при плотности воздуха  $\rho_{\min} = 1,03 \text{ кг/м}^3$ .

По результатам моделирования построены графики зависимости мощности ветрового потока от скорости ветра при различных значениях плотности воздуха и энергетическая характеристика моделируемой ВЭУ, изображенные на рисунке 3.3, согласно которому переход энергетической характеристики ветрогенератора из зоны III в зону IV происходит при достижении скорости ветра  $v_{\max} = 18 \text{ м/с}$ , что соответствует значению мощности ветрового потока при среднестатистической плотности воздуха (точка B1). Однако при максимальной и минимальной возможной плотности воздуха достижение значения мощности ветрового потока (точка A) и (точка C) происходит при скоростях ветра  $v_{\max} = 17,17 \text{ м/с}$  и  $v_{\max} = 19,02 \text{ м/с}$  соответственно.

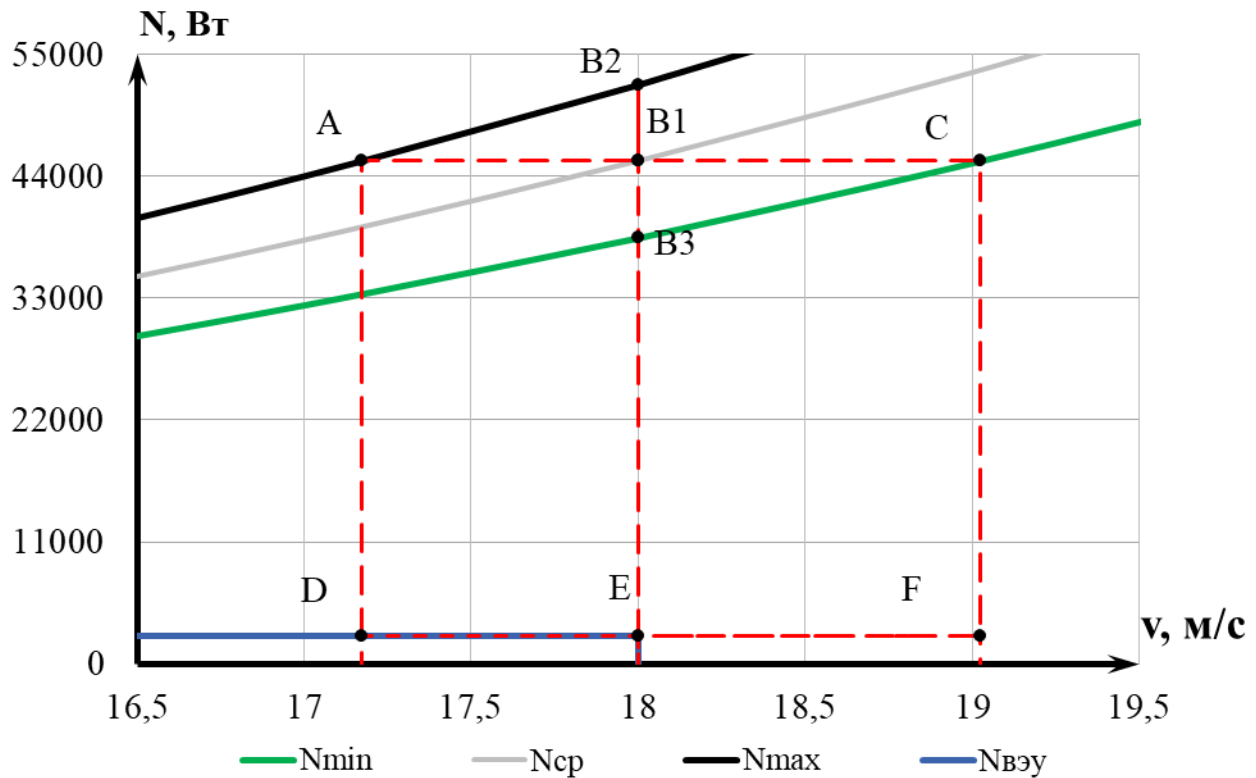


Рисунок 3.3 – Мощность ветрового потока, проходящего через ветроколесо ВЭУ

Таким образом, для сохранения целостности конструкции ВЭУ и ее эффективной работы переход энергетической характеристики из зоны III в зону IV должен осуществляться при достижении мощности ветрового потока определенного значения мощности, что соответствует отрезку D-F на рисунке 3.3. В том случае, когда плотность воздуха отличается от среднестатистической, при достижении максимальной скорости ВЭУ  $v_{max} = 18$  м/с значение мощности ветрового потока может превышать значение  $N_{maxcp} = 45387$  Вт (отрезок B1-B2), либо быть ниже этого значения (отрезок B1-B3).

Учитывая, что значение максимальной скорости ВЭУ составляет 18 м/с, ошибка определения точки перехода энергетической характеристики из зоны III в зону IV составляет

$$\partial v = \left| \frac{17,17 - 18}{18} \right| \cdot 100\% = 4,61\%;$$

$$\partial v = \left| \frac{19,02 - 18}{18} \right| \cdot 100\% = 5,67\%.$$

Таким образом, при расчете значения электроэнергии, генерируемой ВЭУ, возможными становятся ситуации, при которых происходит неточное определение режима работы ветрогенератора в процессе моделирования его работы, что приводит к ошибке в расчетах объемов выработки ВЭУ. На примере работы моделируемой ВЭУ в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края ошибка при определении точки перехода энергетической характеристики из зоны III в зону IV достигает значения 5,69%. Кроме того, остановка работы ветроэнергетической установки при несоответствующей действительности максимальной скорости ветра может привести либо к поломке ВЭУ, связанной с излишней мощностью ветрового потока (отрезок B1-B2), приходящейся на ветроколесо, либо к недовыработке генератора, связанной с низким значением мощности ветрового потока (отрезок B1-B3).

### **3.2 Разработка математической модели работы ветрогенератора**

Моделирование работы ветрогенератора в соответствии с общепринятым подходом может приводить к неточностям определения диапазона его работы, что обусловлено отсутствием учета динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на величину мощности ветрового потока и, как следствие, мощности, генерируемой ветроэнергетической установкой. Для решения данной проблемы предлагается замена критерия определения рабочей зоны на энергетической характеристике ветрогенератора.

Как известно, удельная мощность ветрового потока является энергетической характеристикой воздушного потока, учитывающей его характеристики, в том числе плотность воздуха, которая, в свою очередь, изменяется во времени в зависимости от динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, что следует из (2.11). Таким образом, в качестве критерия определения рабочей зоны на энергетической характеристике ветрогенератора предлагается использование удельной мощности ветрового потока, определяемой следующим выражением

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

При замене критерия определения рабочих зон энергетической характеристики ветрогенератора целесообразно описывать величину мощности, генерируемой ВЭУ, в функции зависимости от удельной мощности ветрового потока. Тогда для определения границ рабочих зон энергетической характеристики ветрогенератора необходимо произвести следующую замену величин [21, 22]:

- $N_{y\partial.0}$  – начальная (стартовая) удельная мощность ветрового потока, применяемая вместо начальной (стартовой) скорости ветра, Вт;
- $N_{y\partial.ном}$  – номинальная удельная мощность ветрового потока, применяемая вместо номинальной скорости ветра, Вт;
- $N_{y\partial.max}$  – максимальная удельная мощность ветрового потока, применяемая вместо максимальной скорости ветра, Вт.

Кроме того, при расчете технических параметров ветроэнергетической установки целесообразна замена параметра «буревая скорость ветра» на параметр «буревая удельная мощность ветрового потока». На основании математической модели, представленной системой уравнений (3.1), математическая модель работы ветрогенератора, определяющая количество электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ, описывается следующим образом

$$\text{при } t_i \in [t_{i-1}; t_i] \quad W_i(t) = \begin{cases} 0, \text{ при } N_{y\partial}(t) < N_{y\partial.0}; \\ \int_0^{t_i} (N_{y\partial}(t) \cdot S \cdot \xi \cdot \eta) dt, \text{ при } N_{y\partial.0} \leq N_{y\partial}(t) < N_{y\partial.ном}; \\ N_{ген.ном} \cdot \tau, \text{ при } N_{y\partial.ном} \leq N_{y\partial}(t) < N_{y\partial.max}; \\ 0, \text{ при } N_{y\partial} \geq N_{y\partial.max}. \end{cases} \quad (3.9)$$

Общий вид энергетической характеристики, полученной при использовании разработанной математической модели работы ветрогенератора, изображен на рисунке 3.4.

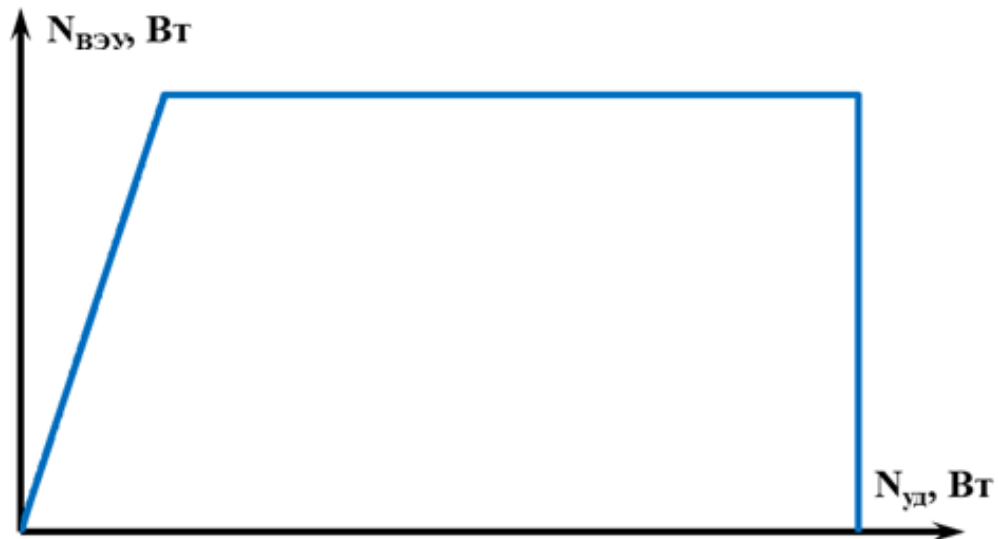


Рисунок 3.4 – Общий вид энергетической характеристики ветрогенератора при использовании разработанной математической модели

Исходя из математической модели работы ветрогенератора, представленной системой уравнений (3.9), граница перехода энергетической характеристики из зоны II в зону III определяется следующим уравнением

$$N_{уд.ном} = \frac{N_{ном.ВЭУ}}{\eta \cdot \xi \cdot S}. \quad (3.10)$$

Согласно уравнению (3.9), значение номинальной удельной мощности ветрового потока, при котором происходит переход в зону работы ветрогенератора на номинальной мощности, зависит от значения величины ометаемой площади ветроколеса, изменение которой влечет за собой перемещение границы перехода энергетической характеристики. При этом, исходя из режимов работы ветрогенератора, должно соблюдаться следующее условие

$$N_{уд.0} < N_{уд.ном}. \quad (3.11)$$

Следовательно, для любой ветроэнергетической установки максимальное возможное значение ометаемой площади ветроколеса  $S_{max}$ , превышение которого нецелесообразно в связи с отсутствием изменения количества вырабатываемой

электроэнергии в заданных климатических условиях, определяется при помощи следующего уравнения

$$S_{max} = \frac{N_{ном.ВЭУ}}{N_{уд.0} \cdot \xi \cdot \eta}. \quad (3.12)$$

При этом максимальное возможное количество электроэнергии, вырабатываемое ветроэнергетической установкой, можно определить следующим образом

$$W_{max}(t) = \sum_{i=1}^k \left( \int_{t-1}^t N_{ном.ВЭУ} dt \right), \quad (3.13)$$

где  $k$  – количество интервалов времени, в которые ВЭУ работает на номинальной мощности.

Оценка ошибки при использовании разработанной математической модели для построения энергетической характеристики ветрогенератора произведена с помощью моделирования работы ВЭУ при следующих условиях:

- ВЭУ расположена в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края;
- ометаемая площадь ветроколеса  $S_{вк} = 12,8 \text{ м}^2$ ;
- номинальная мощность ветрогенератора  $N_{ном.ВЭУ} = 2,5 \text{ кВт}$ ;
- произведение КИЭВ и КПД  $\xi \cdot \eta = 0,32$ ;
- стартовая удельная мощность ветрового потока  $N_{уд.0} = 16,4 \text{ Вт}$ ;
- максимальная удельная мощность ветрового потока  $N_{уд.мах} = 3546 \text{ Вт}$ .

В рамках проведенного математического моделирования работы ветроэнергетической установки ВЭУ с использованием системы уравнений (3.9) построен график зависимости генерируемой мощности ВЭУ от удельной мощности ветрового потока при вариации плотности воздуха от минимальной до максимальной плотности воздуха. Значение номинальной удельной мощности ветрового потока определено следующим образом

$$N_{уд.ном} = \frac{N_{ном.ВЭУ}}{\eta \cdot \xi \cdot S} = \frac{2500}{0,32 \cdot 12,8} = 610,35 \text{ Вт}.$$

По результатам расчетов выявлено, что энергетическая характеристика ветрогенератора достигает номинальной мощности генератора при значении номинальной удельной мощности ветрового потока  $N_{уд.ном} = 610,35$  Вт вне зависимости от значения плотности воздуха. Таким образом, ошибка в определении точки выхода ветрогенератора на номинальную мощность снижается до значения 0%, так как отсутствует вариативность расположения точки перехода энергетической характеристики ветрогенератора из зоны II в зону III. Переход энергетической характеристики из зоны II в зону III изображен на рисунке 3.5. Аналогичная ситуация возникает при определении точки перехода из зоны III в зону IV. Построение энергетической характеристики происходит в координатной системе, отражающей зависимость мощности, генерируемой ВЭУ, от удельной мощности ветрового потока. В такой системе координат отсутствует вариация мощности ветрового потока, так как переход энергетической характеристики из одной зоны в другую происходит при фиксированном значении удельной мощности ветрового потока.

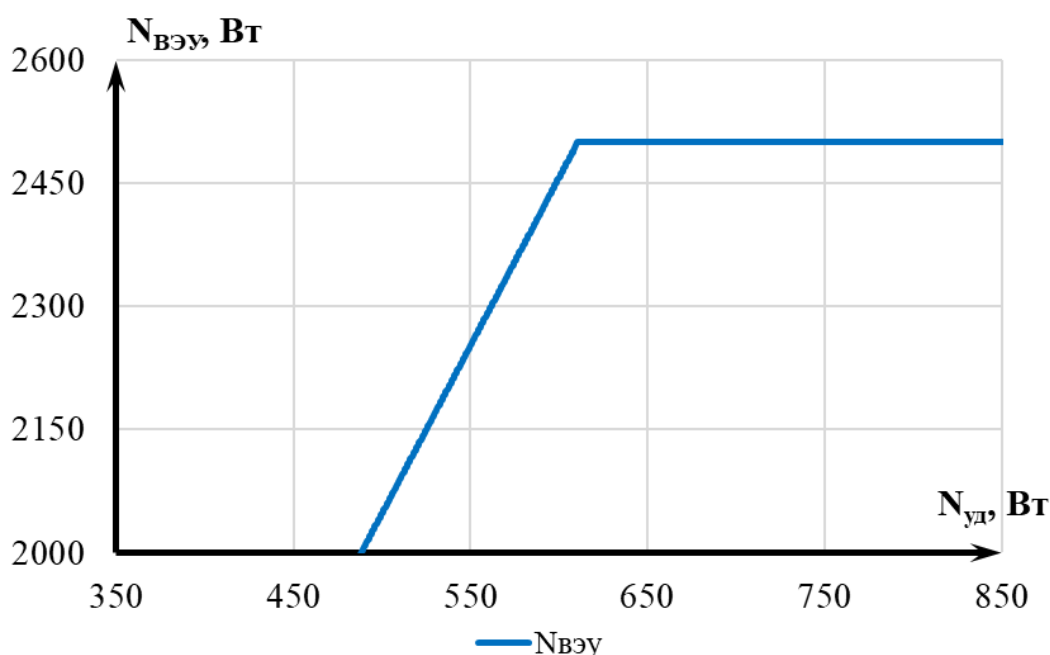


Рисунок 3.5 – Переход энергетической характеристики из зоны II в зону III

### 3.3 Сравнительный анализ подходов к моделированию работы ветрогенератора

Оценка целесообразности использования разработанной математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока производилась при помощи сравнительного анализа результатов расчета количества электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ за год в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края за период с 2018 по 2025 гг. с применением систем уравнений (3.1) и (3.9). Для моделируемой ветроэнергетической установки определены следующие технические параметры:

- ометаемая площадь ветроколеса  $S_{вк} = 12,8 \text{ м}^2$ ;
- номинальная мощность ветрогенератора  $N_{ном.ВЭУ} = 2,5 \text{ кВт}$ ;
- $\xi \cdot \eta = 0,32$ ;
- стартовая скорость ВЭУ  $v_0 = 3 \text{ м/с}$ ;
- номинальная скорость ВЭУ  $v_{ном} = 10 \text{ м/с}$ ;
- максимальная скорость ВЭУ  $v_{макс} = 18 \text{ м/с}$ .

При определении технических параметров ВЭУ принято допущение о том, что значения  $v_0$ ,  $v_{ном}$  и  $v_{мах}$  определены при среднестатистической плотности воздуха в городе Белореченске. В таком случае значения параметров  $N_{уд.0}$ ,  $N_{уд.ном}$  и  $N_{уд.макс}$  определены для среднестатистической плотности воздуха  $\rho_{ст} = 1,216 \text{ кг/м}^3$ . Следовательно, значения искомых технических параметров равны  $N_{уд.0} = 16,416 \text{ Вт}$ ,  $N_{уд.ном} = 610,35 \text{ Вт}$  и  $N_{уд.макс} = 3546 \text{ Вт}$ .

Также при помощи разработанной математической модели работы ветрогенератора, представленной системой уравнений (3.9), в ходе моделирования работы ВЭУ построена энергетическая характеристика, изображенная на рисунке 3.6, позволяющая производить анализ работы ветрогенератора с учетом динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров. В таком случае переходы между зонами



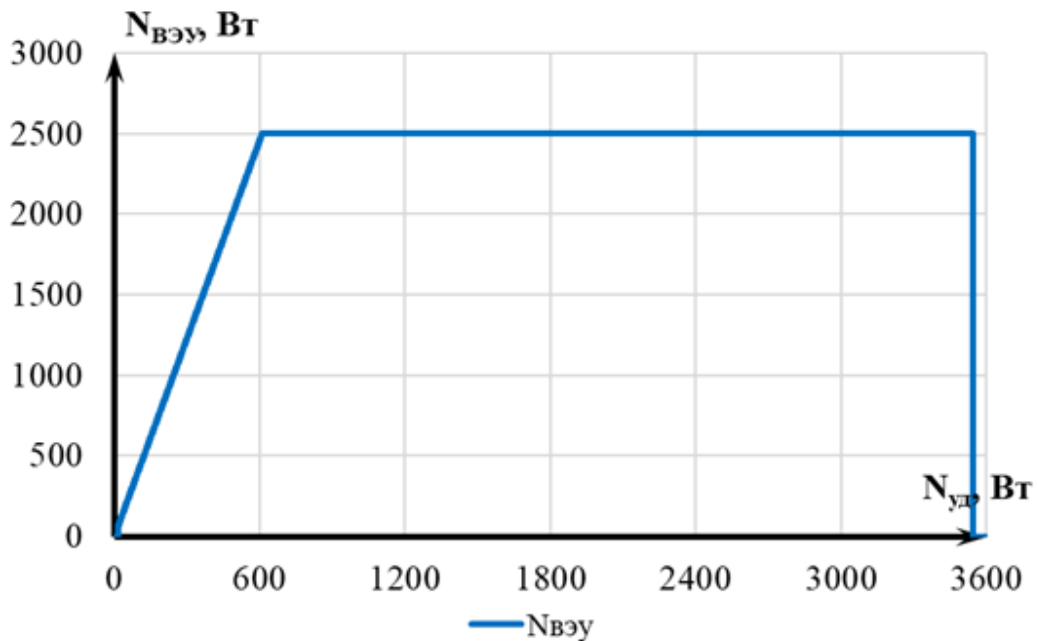


Рисунок 3.6 – Энергетическая характеристика для моделируемой ветроэнергетической установки в климатических условиях города Белореченска Краснодарского края

энергетических характеристик происходят в зависимости от удельной мощности ветрового потока, тем самым, в отличие от общепринятого подхода, учитывается совокупный вклад атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха на мощность, генерируемую ветроэнергетической установкой. В то же время построенная энергетическая характеристика не имеет вариативности, обусловленной различием значений плотности воздуха, что позволяет снизить значение ошибки в определении точки перехода между рабочими зонами ветрогенератора до 0%. Кроме того, в системе уравнений (3.9) в качестве граничных условий используется удельная мощность ветрового потока, определяемая при помощи разработанной в рамках данной диссертационной работы математической модели оценки ветроэнергетического потенциала, прошедшей проверку на достоверность результатов ее применения.

На основании вышесказанного предполагается, что разработанная математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную

мощность ветрового потока с меньшей ошибкой, по сравнению с общепринятой моделью, отражает процесс преобразования механической энергии, с которой ветровой поток приводит во вращение ветроколесо, в электрическую. Величина этой ошибки оценивается следующим выражением [44, 72, 78]

$$\partial W = \left| \frac{W_{оп.i} - W_{дин.i}}{W_{дин.i}} \right| \cdot 100\%, \quad (3.14)$$

где  $W_{оп.i}$  – количество электроэнергии, рассчитанное для  $i$ -того года с использованием общепринятой математической модели работы ветрогенератора, кВт·ч;

$W_{дин.i}$  – количество электроэнергии, рассчитанное для  $i$ -того года с использованием разработанной математической модели работы ветрогенератора, кВт·ч.

Результаты расчета количества вырабатываемой электроэнергии и ошибки расчета вырабатываемой за год электроэнергии приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – 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            |

Согласно результатам расчетов, обозначенных в таблице 3.2, ошибка в определении количества электроэнергии, вырабатываемой ВЭУ за год в период с 2018 по 2025 гг., находится в диапазоне  $\partial W \in [9,9; 18,07] \%$ . Таким образом, использование разработанной математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических

параметров на удельную мощность ветрового потока может приводить к уменьшению ошибки в расчетах электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, на величину до 18,07% по сравнению с результатами применения общепринятой математической модели.

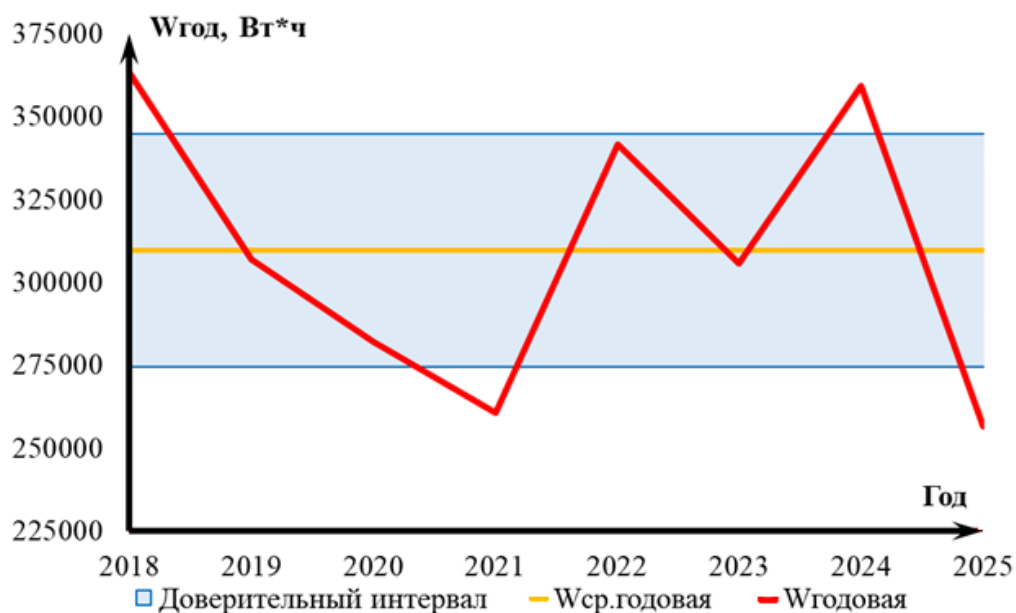


Рисунок 3.7 – График годовой выработки электроэнергии для моделируемой ВЭУ в городе Белореченске в период с 2018 по 2025 гг.

Стоит отметить, что применение математической модели работы ветрогенератора для прогнозирования объема вырабатываемой электроэнергии может приводить к возникновению риска несоответствия прогнозируемого количества генерируемой электроэнергии за расчетный период времени реальному, что связано с изменением климатических условий. Так, например, для результатов проведенного математического моделирования работы ветроэнергетической установки в период с 2018 по 2025 гг. построен 95%-ный доверительный интервал и оценен риск несоответствия результатов расчетов годовой вырабатываемой электроэнергии и фактической выработки ветрогенератора, что изображено на рисунке 3.7. В соответствии с результатами моделирования средняя годовая выработка ВЭУ составляет  $W_{\text{дин.ср}} = 309,5$  кВт·ч, стандартное отклонение –  $\sigma_{W_{\text{дин}}} = 42,12$  кВт·ч. При этом 95%-ный доверительный

интервал находится в диапазоне  $274,28 \leq W_{\text{дин.и}} \leq 344,72$  кВт·ч. Таким образом, при прогнозировании годовой выработки электроэнергии стоит опираться на нижнюю границу доверительного интервала. Если рассматривать годовую выработку электроэнергии как случайную величину со стандартным нормальным распределением, то вероятность нахождения реального значения годовой выработки электроэнергии ниже доверительного интервала определяется следующим образом.

Проведено нормирование годовой выработки электроэнергии как случайной величины в соответствии с выражением [44, 72, 78]

$$z = \frac{W_{\min} - W_{\text{дин.ср.}}}{\sigma_{W_{\text{дин}}}} = \frac{274,28 - 309,5}{42,12} = -0,84, \quad (3.15)$$

где  $W_{\min}$  – нижняя граница доверительного интервала, кВт·ч.

Вероятность определялась по функции Лапласа стандартного нормального распределения. Для значения ( $z=-0,84$ ) вероятность того, что фактическое значение вырабатываемой за год электроэнергии окажется ниже доверительного интервала, составила приблизительно ( $P(Z < -0,84)) \approx 0,20$ , что соответствует значению риска, равному 20%.

Таким образом, можно заключить, что применение разработанной математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на удельную мощность ветрового потока для расчета количества вырабатываемой электроэнергии за рассматриваемый период времени может снижать ошибку в определении электроэнергии, вырабатываемой ветрогенератором, на величину до 18,07% по сравнению с результатами применения общепринятой математической модели. На основании результатов статистической обработки базы данных метеорологических параметров можно определить количество электроэнергии, с вероятностью 95%, соответствующее гарантированному обеспечению заданного уровня генерации электроэнергии.

### Выводы по главе 3

Разработана математическая модель работы ветрогенератора, позволяющая учесть динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров на выработку ветроэнергетической установки, что способствует снижению ошибки при построении энергетических характеристик ветрогенератора.

Описанная в данной главе математическая модель способствует снижению ошибки в определении точки выхода ветрогенератора на номинальную мощность на величину до 5,8%, что соответствует максимальному отклонению возможных значений номинальной скорости ветра от нормируемого значения в диапазоне ВЭУ  $v_{\text{ном}} \in [10; 10,58]$  м/с. В то же время применение разработанной математической модели позволяет снизить ошибку в определении точки перехода энергетической характеристики из зоны III в зону IV, характеризующую остановку ветрогенератора, на величину до 5,67%, что соответствует максимальному отклонению возможных значений максимальной скорости ветра от нормируемого значения в диапазоне ВЭУ  $v_{\text{max}} \in [17,17; 19,02]$  м/с. Указанные результаты обусловлены отсутствием вариативности расположения точек при построении энергетической характеристики ветрогенератора при динамическом влиянии таких случайных величин, как атмосферное давление, температура и относительная влажность воздуха.

Достигнутые результаты способствуют повышению точности определения времени работы ветрогенератора на номинальной мощности в течение рассматриваемого периода. Кроме того, снижение ошибки при обозначении точек энергетической характеристики способствует снижению ошибки при выборе стратегии управления режимами работы ветроэнергетической установки.

По результатам сравнительного анализа подходов к моделированию работы ветрогенератора установлено, что применение разработанной математической модели позволяет снизить погрешность оценки годовой выработки ветроэнергетической установки на величину до 18,07%, по сравнению с расчетами,

выполненными с использованием общепринятого подхода. то подтверждается различием между значениями годовой выработки ветрогенератора, рассчитанными по общепринятому подходу ( $W_{оп} = 429,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ) и с использованием математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров ( $W_{дин} = 363,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ). Использование разработанной модели позволяет повысить надёжность электроснабжения потребителя.

Также выяснено, что использование математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров позволяет определить интервал, в котором с вероятностью 95% находится значение количества электроэнергии, генерируемой ветроэнергетической установкой в течение расчетного периода времени. При этом риск несоответствия годовой выработки расчетным значениям составляет 20%.

Таким образом, можно заключить, что в данной главе диссертационного исследования разработана и описана математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров.

Разработанная математическая модель работы ветрогенератора может быть использована для следующих задач:

- определение оптимальных параметров ВЭУ за счет более точного прогнозирования выработки ветроэнергетической установки;
- повышение эффективности работы ветроэнергетической установки за счет повышения точности определения режимов работы и выбора стратегии управления ВЭУ.

## ГЛАВА 4. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ УТОЧНЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ РАБОТЫ ВЕТРОГЕНЕРАТОРА

### 4.1 Разработка алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

Разработанная в рамках диссертационного исследования математическая модель работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров имеет высокий потенциал использования в различных аспектах деятельности электропотребителей, в том числе при оценке ветроэнергетического потенциала и электрификации производственных и бытовых процессов АПК. Повышение точности оценки мощности и электроэнергии, генерируемых ветроэнергетической установкой, могут обеспечить рациональное использование ресурсов агропромышленного комплекса, в том числе ветроэнергетических. В то же время высокая точность оценки энергетического потенциала ВЭУ позволяет осуществить подбор ее оптимальных технических параметров, в том числе ометаемой площади ветроколеса.

В соответствии с математической моделью работы ветрогенератора, изменение значения ометаемой площади ветроколеса способствует изменению значения генерируемой мощности и, как следствие, электроэнергии. Предположим, что минимальное возможное значение ометаемой площади ветроколеса является бесконечно малой величиной. В то же время, согласно уравнению (3.12), максимальное возможное значение ометаемой площади ветроколеса определяется выражением

$$S_{\max} = \frac{N_{\text{ном.ВЭУ}}}{N_{\text{уд.0}} \cdot \xi \cdot \eta}.$$

Следовательно, для ветроэнергетической установки возможен выбор значения ометаемой площади ветроколеса в соответствии со следующими граничными условиями

$$S_{\text{вк}} \in (0; S_{\text{max}}]. \quad (4.1)$$

Следовательно, зная диапазон ометаемой площади ветроколеса, можно сформулировать задачу по снижению ресурсоемкости предполагаемой ветроэнергетической установки, заключающуюся в уменьшении материалоемкости ВЭУ через нахождение минимального необходимого значения ометаемой площади ветроколеса

$$S_{\text{вк}} \rightarrow \min. \quad (4.2)$$

В то же время необходимо учитывать, что снижение ометаемой площади ветроколеса приводит к снижению мощности, генерируемой ветроэнергетической установкой и, как следствие, электроэнергии. Таким образом, важно учитывать необходимость выполнения условия обеспечения потребителя необходимым количеством электроэнергии [73]

$$W_{\text{потр}} \leq W_{\text{ВЭУ}}, \quad (4.3)$$

где  $W_{\text{потр}}$  – количество электроэнергии, необходимое для обеспечения нужд потребителей, кВт·ч;

$W_{\text{ВЭУ}}$  – количество электроэнергии, вырабатываемое ветроэнергетической установкой, кВт·ч;

С учетом уравнения (1.4), задача по нахождению оптимального значения ометаемой площади ветроколеса при условии обеспечения потребителя необходимым количеством электроэнергии будет иметь следующие ограничения



$$\begin{cases} S_{\text{вк}} \in (0; S_{\text{max}}] \\ W_{\text{номр}} \leq W_{\text{ВЭУ}} . \\ W(t) = \sum_{i=1}^n W_i(t) \end{cases} \quad (4.4)$$

Для решения поставленной задачи предлагается алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. В основе разработанного алгоритма заложен расчет выработки электроэнергии за расчетный период, что позволяет учитывать краткосрочные и долгосрочные особенности изменения метеорологических параметров.

Отличительной особенностью разработанного алгоритма является учет динамического влияния атмосферного давления, температуры и относительной влажности воздуха посредством использования математической работы ветрогенератора в условиях динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров, в результате чего повышается точность оценки электроэнергии, генерируемой ВЭУ. Кроме того, повышение точности оценки выработки ветрогенератора обеспечивается расчетом электроэнергии за промежутки времени, равные периоду измерений значений метеорологических параметров.

В соответствии с ограничениями задачи по нахождению оптимального значения ометаемой площади ветроколеса, совокупное количество электроэнергии, вырабатываемое ветрогенератором, определяется путем суммирования результатов расчетов выработки для каждого измерения значений метеорологических параметров на протяжении всего анализируемого периода времени, ограниченного массивом составляемой базы данных метеорологических параметров для рассматриваемой местности.

С учетом изложенного алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки включает в себя последовательное выполнение следующих шагов.

1. Формирование базы данных метеорологических параметров на территории, рассматриваемой в качестве места потенциального размещения ветроэнергетической установки. На данном этапе происходит определение периода времени расчета, источников и формата сбора данных об измерениях метеорологических параметров, обработка полученной информации с последующим формированием соответствующей базы данных.

2. Расчет среднестатистических значений удельной мощности ветрового потока за время проведения каждого измерения в течение расчетного периода. Суть второго этапа заключается в предварительной подготовке сформированной базы данных для последующих расчетов количества генерируемой электроэнергии с учетом технических параметров потенциальной ветроэнергетической установки. Определение удельной мощности ветрового потока осуществляется в соответствии с разработанной в ходе диссертационного исследования математической моделью оценки ветроэнергетического потенциала местности с учетом динамического влияния расширенной группы метеорологических параметров на ветровые энергоресурсы.

3. Ввод графика потребления электроэнергии. На третьем шаге происходит расчет нужд потребителя в электроэнергии на основе данных об используемом электрооборудовании и его предположительного периода использования.

4. Ввод значений КИЭВ, КПД, номинальной мощности ветрогенератора, шага итераций алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. На четвертом этапе происходит предварительное определение технических параметров ветроэнергетических установок, которые в дальнейшем будут использоваться для расчета количества генерируемой электроэнергии.

5. Поиск оптимального значения ометаемой площади ветроколеса. На пятом этапе методом итерационных вычислений осуществляется поиск оптимального значения ометаемой площади ветроколеса в пределах интервала, заданного выражением (4.1). В качестве начального значения ометаемой площади

ветроколеса рекомендуется использовать значение  $S_{\text{вк}} = 0 \text{ м}^2$ . Шаг итераций ( $St$ ) указывается на этапе 4.

6. Вывод о достаточности генерируемой электроэнергии. На шестом этапе происходит сравнение расчетного значения выработки ВЭУ за весь расчетный период при помощи разработанной в рамках диссертации математической модели работы ветрогенератора, учитывающей динамическое влияние расширенной группы метеорологических параметров. При удовлетворении условия достаточности генерируемого количества электроэнергии для обеспечения собственных нужд потребителя происходит завершение алгоритма с последующей фиксацией значений оптимальной ометаемой площади ветроколеса и выработки ветрогенератора. Итерационное вычисление оптимального значения ометаемой площади ветроколеса продолжается, если не выполняется условие достаточности генерируемой электроэнергии. В случае достижения максимального эффективного значения ометаемой площади ветроколеса  $S_{\text{max}}$  происходит завершение реализации алгоритма с фиксацией факта неспособности ветроэнергетической установки с заданными техническими параметрами обеспечить собственные нужды потребителя в электроэнергии. В таком случае необходимо либо закончить реализацию алгоритма, либо изменить технические параметры, в частности номинальную мощность ветрогенератора. В случае изменения технических параметров ветроэнергетической установки реализация алгоритма возобновляется с шага 4.

Разработанный алгоритм позволяет не только найти оптимальные значения технических параметров ветроэнергетической установки, но и сделать вывод о целесообразности применения ВЭУ с заданными техническими параметрами. Блок-схема разработанного алгоритма изображена на рисунке 4.1.

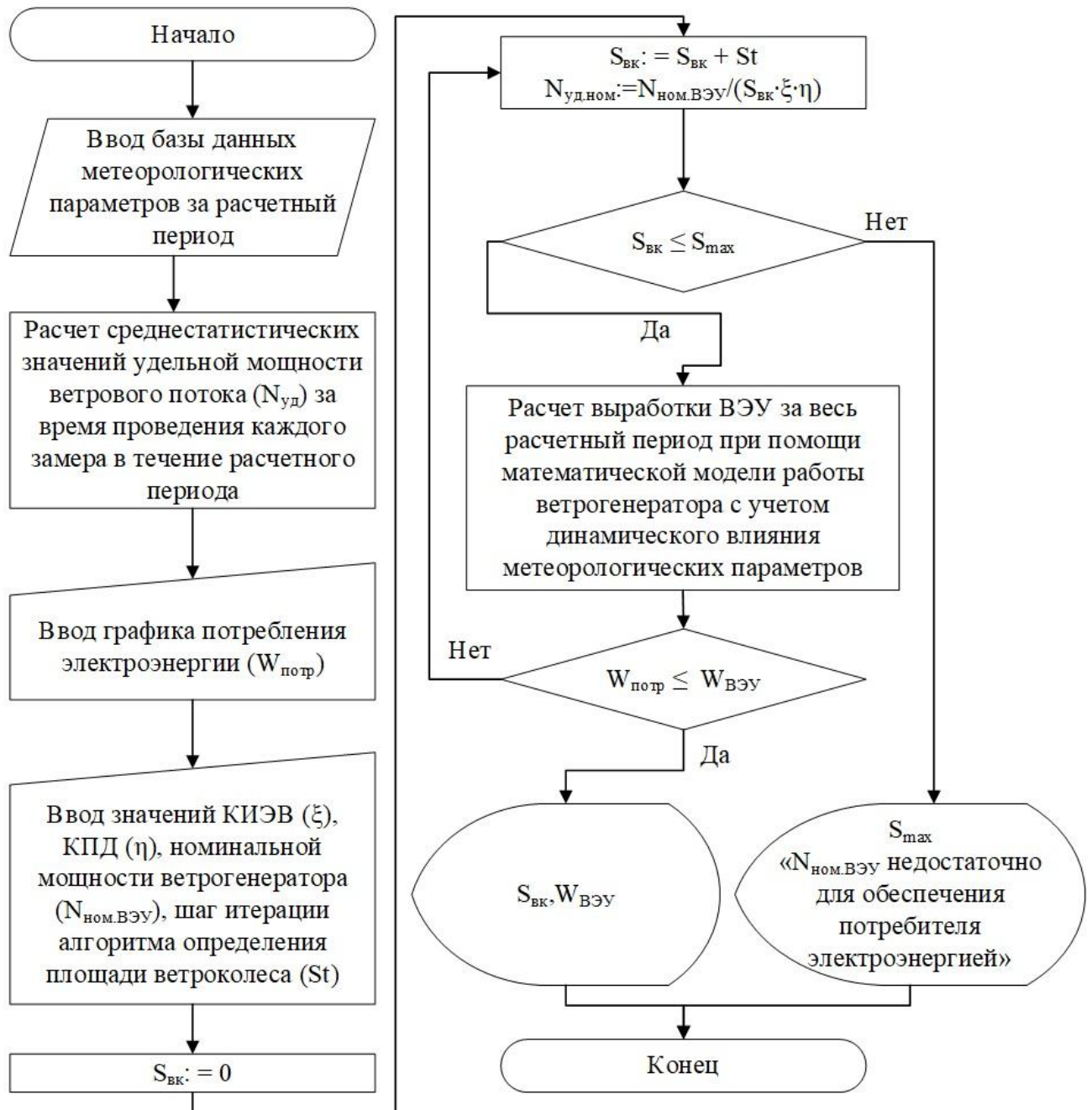


Рисунок 4.1 – Алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ВЭУ

#### 4.2 Программное обеспечение реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

Для практической реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки разработан программный

комплекс расчета и оптимизации ветроэнергетических установок «ОДОВЭР», прошедший процедуру государственной регистрации программы для электронных вычислительных машин (свидетельство о регистрации № 2024615033 от 01.03.2024). К основным задачам «ОДОВЭР» относится определение оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки на основе базы данных метеорологических параметров и технических параметров ветроэнергетической установки. Разработанный программный комплекс также позволяет осуществлять решение ряда задач, способствующих реализации промежуточных операций, связанных с обработкой информации, формированием баз данных, осуществлением промежуточных расчетов и т.д. [67].

Написание программного кода осуществлялось на объектно-ориентированном языке программирования Object Pascal. Особенности разработки программного обеспечения позволяют без затруднений использовать ПО «ОДОВЭР» на персональных компьютерах с различными версиями операционных систем Linux и Microsoft Windows. Внешний вид начального окна разработанного программного комплекса изображен на рисунке 4.2.

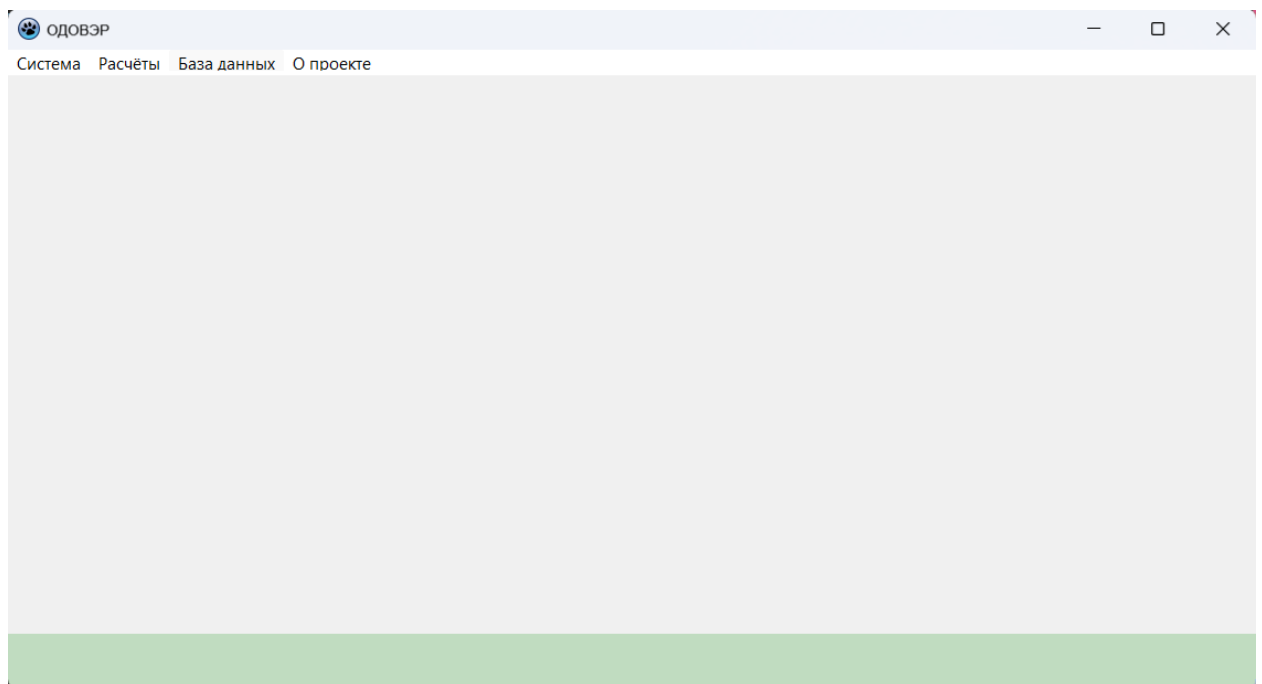


Рисунок 4.2 – Начальное окна программного комплекса «ОДОВЭР»

Горизонтальное меню ПО «ОДОВЭР» состоит из 4 пунктов, два из которых содержат инструменты для выполнения различных задач, решаемых при оценке ветровых энергоресурсов местности и энергетического потенциала ветроэнергетических установок. Пункт «База данных» содержит набор инструментов, используемых в процессе формирования базы данных о метеорологических параметрах в рамках реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. Окно ПО «ОДОВЭР» при вызове ниспадающего меню пункта «База данных» изображено на рисунке 4.3.

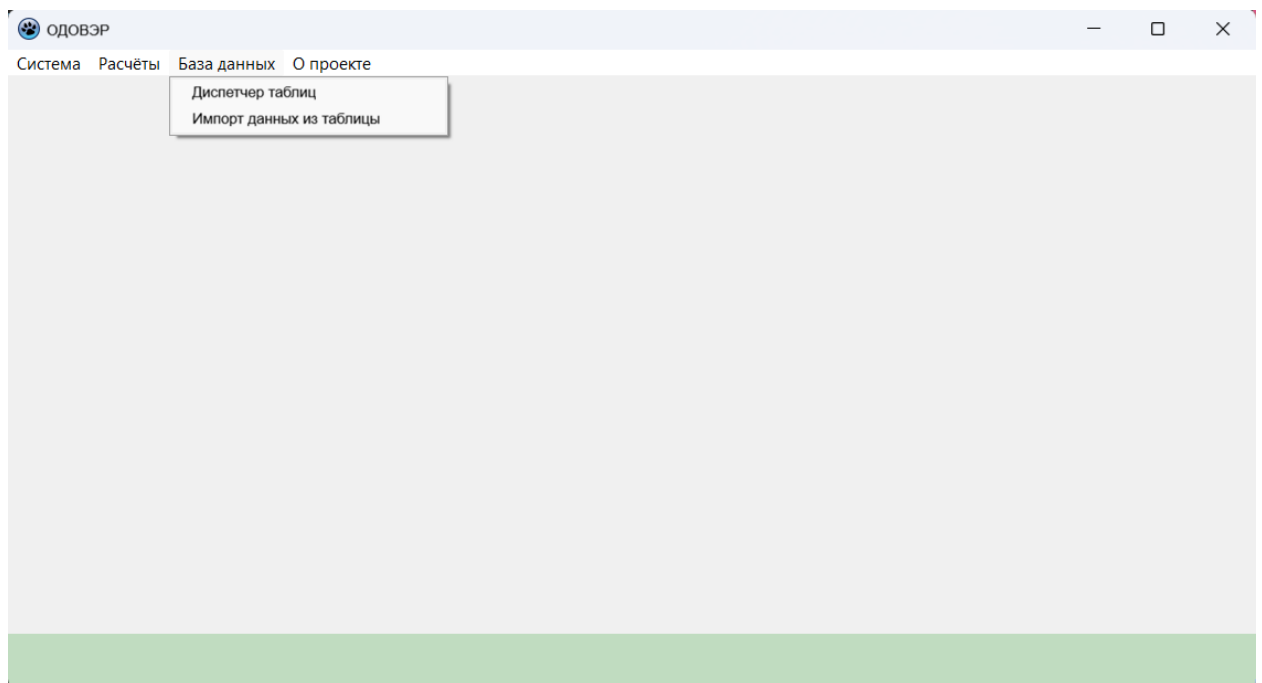
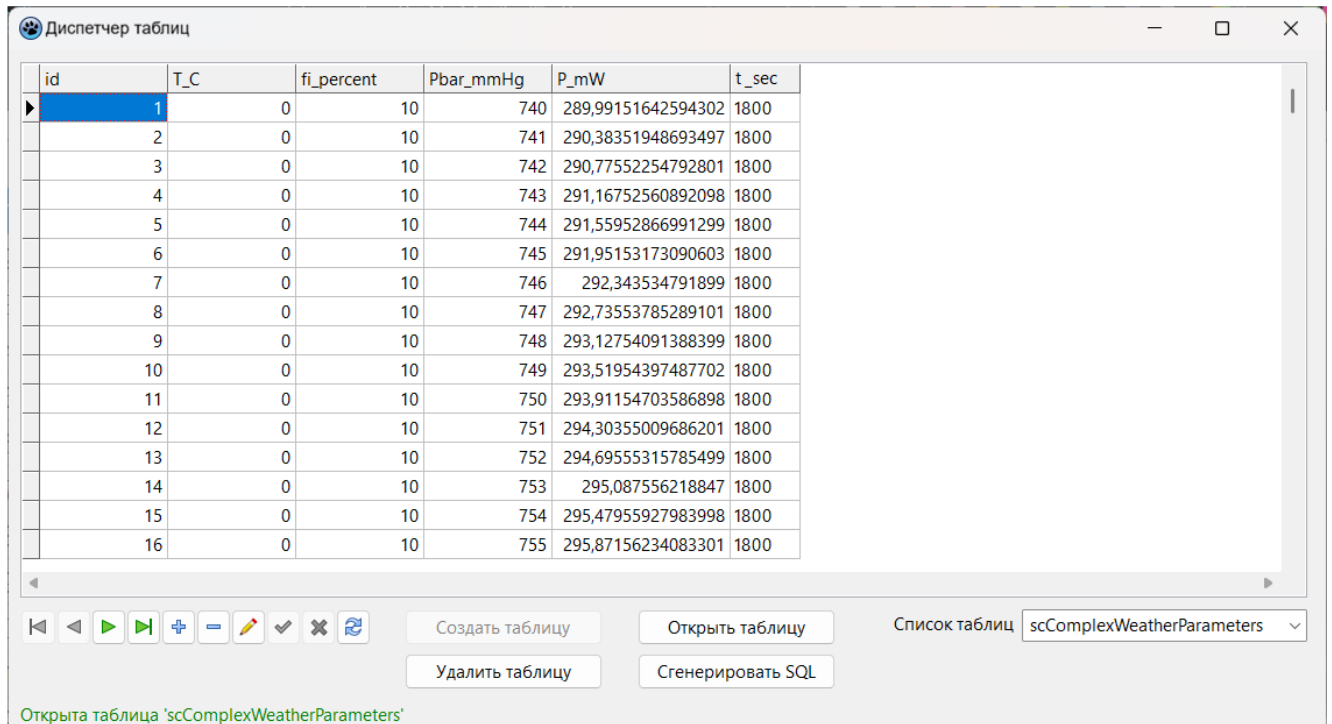


Рисунок 4.3 – Меню пункта «База данных»

Пункт «Диспетчер таблиц» обеспечивает возможность формирования и обработки баз данных метеорологических параметров в ручном режиме, что позволяет осуществлять различные операции с таблицами, такие как навигация, создание и удаление строк, редактирование данных и т.д. В рамках этого модуля реализован набор инструментов, направленных на удобство и эффективность работы с таблицами, что способствует повышению производительности при выполнении операций с данными. Визуальное представление интерфейса

диспетчера таблиц, реализованного в программном комплексе «ОДОВЭР», изображено на рисунке 4.4.



| id | T_C | fi_percent | Pbar_mmHg | P_mW | t_sec              |
|----|-----|------------|-----------|------|--------------------|
| 1  |     | 0          | 10        | 740  | 289,99151642594302 |
| 2  |     | 0          | 10        | 741  | 290,38351948693497 |
| 3  |     | 0          | 10        | 742  | 290,77552254792801 |
| 4  |     | 0          | 10        | 743  | 291,16752560892098 |
| 5  |     | 0          | 10        | 744  | 291,55952866991299 |
| 6  |     | 0          | 10        | 745  | 291,95153173090603 |
| 7  |     | 0          | 10        | 746  | 292,343534791899   |
| 8  |     | 0          | 10        | 747  | 292,73553785289101 |
| 9  |     | 0          | 10        | 748  | 293,12754091388399 |
| 10 |     | 0          | 10        | 749  | 293,51954397487702 |
| 11 |     | 0          | 10        | 750  | 293,91154703586898 |
| 12 |     | 0          | 10        | 751  | 294,30355009686201 |
| 13 |     | 0          | 10        | 752  | 294,69555315785499 |
| 14 |     | 0          | 10        | 753  | 295,087556218847   |
| 15 |     | 0          | 10        | 754  | 295,47955927983998 |
| 16 |     | 0          | 10        | 755  | 295,87156234083301 |

Рисунок 4.4 – Диспетчер таблиц программного комплекса «ОДОВЭР»

Пункт «Импорт данных из таблицы» представляет собой функциональный модуль, предназначенный для автоматизации формирования базы данных путем интеграции данных, представленных в виде таблиц, созданных при помощи табличных процессоров, таких как Microsoft Office Excel, OpenOffice Calc и т.д. Применение импорта готовых таблиц с данными позволяет значительно ускорить процессы наполнения базы данных, что особенно важно при обработке больших объемов информации и при необходимости оперативного решения задач, связанных с определением ветроэнергетического потенциала. Так, при поиске оптимального значения ометаемой площади ветроколеса можно использовать данные в виде таблицы из открытых источников, например, с сайта ООО «Расписание погоды», загружать их в программный комплекс «ОДОВЭР» и формировать на их основе готовые для реализации разработанного алгоритма базы данных. Пример работы с импортом данных из таблицы изображен на рисунке 4.5.

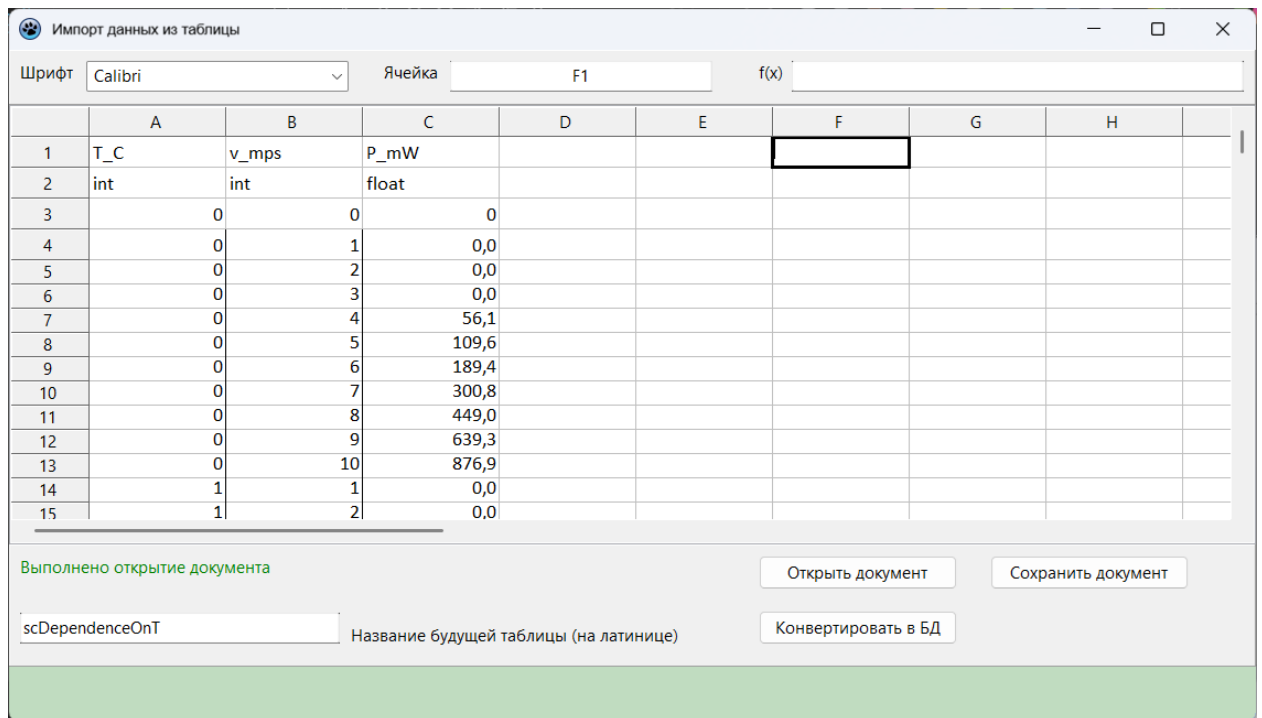


Рисунок 4.5. – Окно импорта данных из таблицы

Полученные базы данных используются программным комплексом «ОДОВЭР» для проведения дальнейших расчетов. В случае необходимости работы с другими базами данных требуется удалить существующую базу и сформировать новую. Инструменты, предназначенные для выполнения расчетов, связанных с определением энергетического потенциала и оптимизацией параметров ветроэнергетических установок, расположены в пункте горизонтального меню «Расчеты». Данный раздел включает в себя инструменты, которые позволяют осуществлять оценку энергетического потенциала местности с дальнейшим построением карт распределения ветровых энергоресурсов и расчет оптимального значения ометаемой площади ветроколеса. Внешний вид окна программного комплекса «ОДОВЭР» с раскрытым ниспадающим меню пункта «Расчеты» изображен на рисунке 4.6. Пункт меню «Карта ВЭР» предназначен для построения карт распределения ветровых энергоресурсов местности. Указанный выше функционал не использовался в данном диссертационном исследовании.



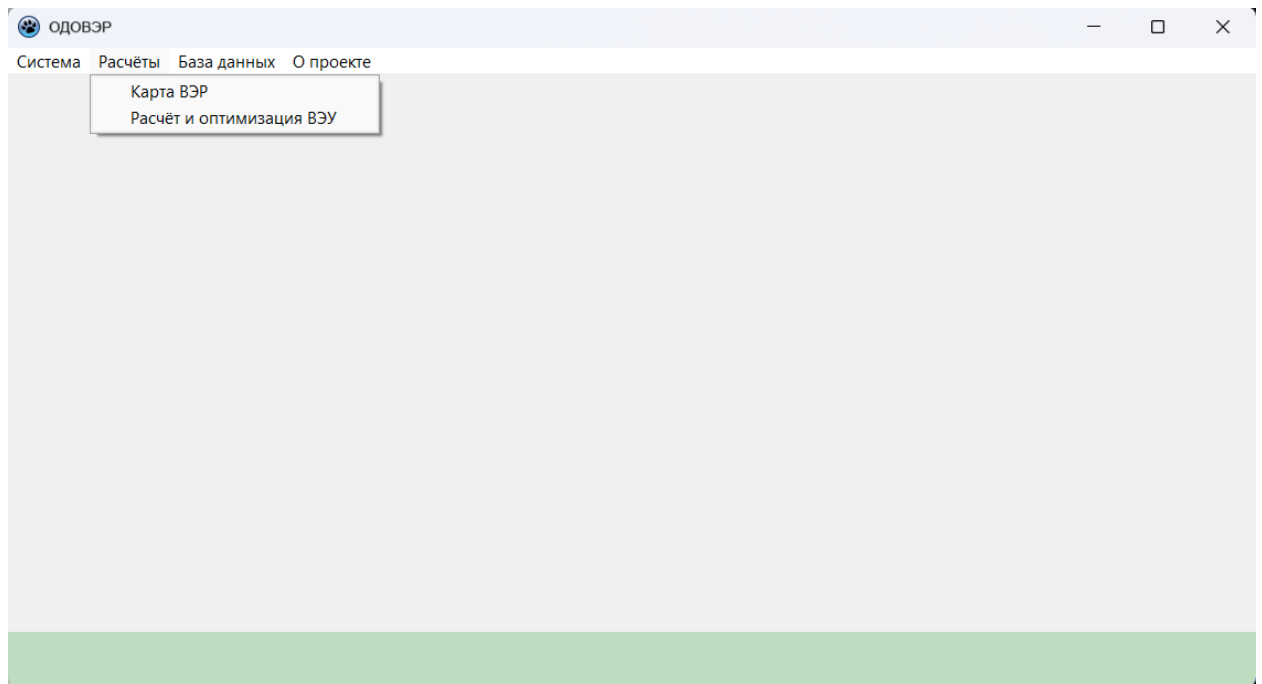


Рисунок 4.6 – Пункт горизонтального меню «Расчеты»

Для определения оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки применяется специализированный инструмент «Расчет и оптимизация ВЭУ». Работа с данным модулем предполагает внесение следующих значений: КПД ветроэнергетической установки, КИЭВ и номинальной мощности ветрогенератора. Для корректной реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ВЭУ также необходимо введение значения электроэнергии, необходимой для обеспечения нужд потребителя. Также для проведения расчета необходимо предварительно сформировать базу данных метеорологических параметров анализируемой местности, что обусловлено необходимостью получения достоверных данных о ветровых потоках. Окно ввода данных и фиксирования искомых величин изображено на рисунке 4.7.

По умолчанию инструмент «Расчет и оптимизация ВЭУ» осуществляет реализацию разработанного алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. Также при необходимости существует возможность оценки выработки ВЭУ при заданном значении ометаемой площади ветроколеса.

Расчёт и оптимизация ВЭУ

N ном ВЭУ  Вт

W потр  кВт·ч

St  м2

N уд 0  Вт

ξ

N уд max  Вт

η

☐ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

S вк  м2

W ВЭУ  кВт·ч

Расчёт Готово

Рисунок 4.7 – Окно пункта «Расчет и оптимизация ВЭУ»

При нажатии кнопки «Расчет» происходит запуск в работу алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. По завершении работы в поле  $S_{вк}$  появится искомое оптимальное значение ометаемой площади ветроколеса, а в поле  $W_{ВЭУ}$  – итоговое количество генерируемой электроэнергии за рассматриваемый период времени. В том случае, когда достигнуто максимальное эффективное значение ометаемой площади ветроколеса, а выработки ветрогенератора не хватает для обеспечения нужд потребителя, в окне программного обеспечения появится сообщение с текстом « $N_{ном.ВЭУ}$  недостаточно для обеспечения потребителя электроэнергией». При этом будут выведены максимальное эффективное значение площади ветроколеса и соответствующее ему значение вырабатываемой электроэнергии. Примеры вывода итогов реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки изображены на рисунках 4.8 и 4.9.

Для проведения оценки выработки ветроэнергетической установки при заданном значении ометаемой площади ветроколеса необходимо активировать соответствующий флажок, расположенный в интерфейсе окна «Расчет и оптимизация ВЭУ» в программном комплексе «ОДОВЭР». Включение данного параметра запускает процесс изменения внутреннего

Расчёт и оптимизация ВЭУ

|           |      |    |          |      |       |
|-----------|------|----|----------|------|-------|
| N ном ВЭУ | 2000 | Вт | W потр   | 2700 | кВт·ч |
| St        | 0,01 | м2 | N уд 0   | 17   | Вт    |
| $\xi$     | 0,4  |    | N уд max | 3671 | Вт    |
| $\eta$    | 0,8  |    |          |      |       |

☐ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

|      |       |    |       |      |       |
|------|-------|----|-------|------|-------|
| S вк | 23,69 | м2 | W ВЭУ | 2674 | кВт·ч |
|------|-------|----|-------|------|-------|

Расчёт Готово

N ном ВЭУ недостаточно для обеспечения потребителя электроэнергией

Рисунок 4.8 – Расчет оптимального значения площади ветроколеса при недостаточном значении номинальной мощности ветрогенератора

Расчёт и оптимизация ВЭУ

|           |      |    |          |      |       |
|-----------|------|----|----------|------|-------|
| N ном ВЭУ | 2500 | Вт | W потр   | 2700 | кВт·ч |
| St        | 0,01 | м2 | N уд 0   | 17   | Вт    |
| $\xi$     | 0,4  |    | N уд max | 3671 | Вт    |
| $\eta$    | 0,8  |    |          |      |       |

☐ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

|      |       |    |       |      |       |
|------|-------|----|-------|------|-------|
| S вк | 18,42 | м2 | W ВЭУ | 2703 | кВт·ч |
|------|-------|----|-------|------|-------|

Расчёт Готово

Рисунок 4.9 – Расчет оптимального значения площади ветроколеса при достаточном значении номинальной мощности ветрогенератора

алгоритма программы, в частности, временно отключая некоторые ее компоненты, отвечающие за итерационное вычисление оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки. Эта процедура обеспечивает возможность расчета выработки электроэнергии при фиксированном значении ометаемой площади ветроколеса, что может пригодиться, например, при оценке

эффективности работы ВЭУ, с заданными техническими параметрами. Расчет выработки ВЭУ изображен на рисунке 4.10.

Расчёт и оптимизация ВЭУ

N ном ВЭУ 1100 Вт W потр кВт·ч

St 0,01 м2 N уд 0 17 Вт

ξ 0,4 N уд max 3671 Вт

η 0,8

☒ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

S вк 12,56 м2 W ВЭУ 2519 кВт·ч

Расчёт Готово

Рисунок 4.10 – Оценка выработки ветроэнергетической установки при помощи инструмента «Расчет и оптимизация ВЭУ»

### 4.3 Практическое применение алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

#### 4.3.1 Методика оценки технического эффекта от внедрения результатов исследований

Для определения технического эффекта от применения результатов диссертационного исследования произведена оценка целесообразности применения алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки, суть которой заключалась в сравнительном анализе результатов определения оптимального значения ометаемой площади ветроколеса в соответствии с общепринятым подходом и разработанным алгоритмом. При проведении сравнительного анализа использованы следующие два критерия.

1. Относительная разница ометаемой площади ветроколеса. Данный критерий направлен на определение технического эффекта от внедрения результатов диссертационного исследования. Суть критерия заключается в оценке уровня снижения материалоемкости ветроколеса ветроэнергетической установки

за счет снижения значения ометаемой площади ветроколеса. Определение относительной разницы ометаемой площади ветроколеса осуществляется при помощи следующего уравнения [44, 72, 78]

$$\partial S_{\text{вк}} = \left| \frac{S_{\text{оп}} - S_{\text{опт}}}{S_{\text{оп}}} \right| \cdot 100\%, \quad (4.5)$$

где  $S_{\text{оп}}$  – значение ометаемой площади ветроколеса, рассчитанное в соответствии с общепринятым подходом,  $\text{м}^2$ ;

$S_{\text{опт}}$  – значение ометаемой площади ветроколеса, определенное при помощи алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки,  $\text{м}^2$ .

В соответствии с общепринятым подходом для определения значения ометаемой площади ветроколеса необходимо выполнить следующую последовательность шагов. На первоначальном этапе производится определение потребляемой среднесуточной электрической мощности. Для этого составляется список электрооборудования, электроснабжение которого планируется осуществлять при помощи ветроэнергетической установки. Для составленного списка электрооборудования происходит определение его установленной мощности и среднего времени работы в сутки. На основании полученных данных определяется среднесуточная потребляемая электрическая мощность следующим образом [11, 35]

$$N_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_{\text{уст.}i} \cdot \tau_{\text{раб.}i}}{24} \right), \quad (4.6)$$

где  $N_{\text{уст.}i}$  – установленная мощность  $i$ -того электроприбора, Вт;

$\tau_{\text{раб.}i}$  – среднее время работы электроприбора в сутки, ч.

На следующем этапе происходит определение технических параметров ветроэнергетической установки. На основании данных о среднесуточной потребляемой электрической мощности происходит выбор номинальной мощности ветрогенератора. Для этого необходимо выполнение условия достаточности

мощности ветрогенератора для обеспечения нужд потребителя, определяемое следующим выражением [11, 35]

$$N_{ном.ВЭУ} \geq N_{сут}. \quad (4.7)$$

Кроме того, происходит определение КИЭВ и КПД ветроэнергетической установки, а также точек перехода энергетической характеристики из одной зоны в другую, характеризующих границы рабочих зон ветрогенератора. В соответствии с общепринятым подходом расчет ометаемой площади ветроколеса осуществляется при помощи значений технических параметров ВЭУ следующим образом [32, 33, 59]

$$S_{оп} = \frac{2 \cdot N_{ном.ВЭУ}}{\rho_{ср} \cdot v_{сгр}^3 \cdot \xi \cdot \eta}. \quad (4.8)$$

Расчетное значение ометаемой площади ветроколеса  $S_{оп}$  сравнивается со значением ометаемой площади ветроколеса, полученным в ходе реализации разработанного алгоритма посредством программного комплекса «ОДОВЭР».

2. Годовой баланс электроэнергии. Одним из важнейших показателей эффективности реализации проекта электроснабжения потребителей является годовой баланс электроэнергии. Данный критерий направлен на определение технического эффекта от внедрения результатов диссертационного исследования на основании вывода о способности активного энергетического комплекса (АЭК) обеспечивать собственные нужды в электроэнергии. В рамках сравнительного анализа предполагается, что АЭК состоит из ветроэнергетической установки, используемой в качестве источника электроэнергии, а также электрооборудования, потребляющего электроэнергию для осуществления технологических процессов, протекающих в рамках деятельности объектов АПК [31].

Использование годового баланса электроэнергии в качестве критерия оценки целесообразности применения результатов диссертационной работы позволяет определить степень соответствия между выработкой и потреблением

электроэнергии за анализируемый период времени, что дает возможность делать выводы о способности активного энергетического комплекса обеспечивать собственные нужды в электроэнергии. Определение годового баланса электроэнергии осуществлено для ВЭУ с различными значениями ометаемой площади ветроколеса следующим образом [31]

$$W_{\text{г.б.}i} = W_{\text{ВЭУгод.}i} - W_{\text{потр.год}}, \quad (4.9)$$

где  $W_{\text{ВЭУгод.}i}$  – годовая выработка предполагаемой ВЭУ с заданными параметрами на анализируемой территории для  $i$ -того моделирования работы ветрогенератора, кВт·ч;

$W_{\text{потр.год}}$  – годовое потребление электроэнергии, кВт·ч.

Оценка уровня обеспечения годового баланса электроэнергии осуществлялась путем расчета отношения годового баланса электроэнергии к годовому потреблению электроэнергии [44, 72, 78]

$$\delta W = \frac{W_{\text{г.б.}i}}{W_{\text{потр.}i}} \cdot 100\%, \quad (4.10)$$

где  $W_{\text{г.б.}i}$  – годовой баланс электроэнергии для  $i$ -того моделирования работы ветрогенератора, кВт·ч.

#### **4.3.2 Оптимизация ометаемой площади ветроколеса для крестьянского фермерского хозяйства**

Оценка технического эффекта от внедрения результатов диссертационной работы осуществлялась в рамках проведения работ по оптимизации ометаемой площади ветроколеса ветроэнергетической установки, предназначенной для обеспечения электроэнергией зерноток на территории села Каип Ключевского района, оснащенного зерноочистительной машиной РВС-40. Согласно анализу энергопотребления данной установки, проведенному в пункте 1.2 данной диссертационной работы, его установленная мощность составляет 14,3 кВт, из которых: привод решетного стана – 1,1 кВт, привод вентиляторов – 11 кВт, привод

шнеков – 2,2 кВт. Также выяснено, что ориентировочное значение коэффициента использования установленной мощности электрооборудования составляет 80%. По результатам анализа деятельности зернотока по сезонам получены данные, отраженные в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Периоды электропотребления зернотока

| Период             | Продолжительность, сут. | Средняя мощность, кВт | Потребляемая электроэнергия, кВт·ч |
|--------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Зимний             | 90                      | 0,7                   | 1209,6                             |
| Подготовительный   | 61                      | 1,5                   | 1756,8                             |
| Посевная кампания  | 61                      | 2,9                   | 3396,48                            |
| Летний межсезонный | 31                      | 5,7                   | 3392,64                            |
| Уборочная кампания | 92                      | 14,3                  | 25259,52                           |
| Послеуборочный     | 30                      | 5,7                   | 3283,2                             |

На основании данных о периодах электропотребления зернотока произведен расчет среднесуточной потребляемой мощности при помощи уравнения (4.6)

$$N_{\text{сум}} = \sum_{i=1}^n \left( \frac{N_{\text{уст.}i} \cdot \tau_{\text{раб.}i}}{365} \right) = 4,372 \text{ кВт}.$$

Далее на основании данных, полученных в ходе расчета среднесуточного потребления, выбрана номинальная мощность ветрогенератора, равная 5,5 кВт, что соответствует условию достаточности мощности ветрогенератора для обеспечения нужд потребителя, определяемому следующим выражением

$$N_{\text{ном.ВЭУ}} = 5,5 \text{ кВт} \geq N_{\text{сут}} = 4,372 \text{ кВт}.$$

Для проведения дальнейших расчетов в соответствии с общепринятым подходом к моделированию работы ветрогенератора предварительно определены технические параметры потенциальной ветроэнергетической установки:

$$- \xi \cdot \eta = 0,38;$$



- стартовая скорость ВЭУ  $v_0 = 3$  м/с;
- номинальная скорость ВЭУ  $v_{\text{ном}} = 12$  м/с;
- максимальная скорость ВЭУ  $v_{\text{max}} = 18$  м/с.

В соответствии с уравнением (4.8) определена ометаемая площадь ветроколеса

$$S_{\text{оп}} = \frac{2 \cdot N_{\text{ном.ВЭУ}}}{\rho_{\text{ср}} \cdot v_{\text{ср}}^3 \cdot \xi \cdot \eta} = \frac{2 \cdot 5500}{1,257 \cdot 104,5 \cdot 0,38} = 220 \text{ м}^2.$$

Для определения количества генерируемой электроэнергии при помощи математической модели работы ветрогенератора, разработанной в рамках диссертационной работы, необходимо произвести замену значений стартовой и максимальной скорости ветроэнергетической установки на стартовое и максимальное значение удельной мощности ветрового потока. Предполагается, что определение параметров стартовой и максимальной удельной мощности ветрового потока происходило при одних и тех же климатических условиях, что означает равные значения плотности воздуха и удельной мощности ветрового потока для каждого опыта. Тогда на основании значений стартовой и максимальной скорости ветра можно определить соответствующие им значения стартовой и максимальной удельной мощности ветрового потока, используя среднестатистическую плотность воздуха на территории анализируемой местности.

Данные для расчетов, связанных с применением значений метеорологических параметров, полученных из открытых источников, в частности сайта ООО «Расписание погоды». При помощи программного комплекса «ОДОВЭР» сформирована база данных метеорологических параметров, при анализе которой выяснено, что значение среднестатистической плотности для села Каип Ключевского района Алтайского края составляет  $\rho_{\text{ср}} = 1,257$  кг/м<sup>3</sup>. На основании результатов вычислений с использованием уравнения (1.1) получены следующие значения границ режимов работы ветрогенератора:

- стартовая удельная мощность ветрового потока  $N_{\text{уд.0}} = 17$  Вт;
- максимальная удельная мощность ветрового потока  $N_{\text{уд.max}} = 3665$  Вт.

Используя значения среднесуточной потребляемой мощности, определим годовое потребление электроэнергии следующим образом

$$W_{\text{потр.год}} = N_{\text{сут}} \cdot 365 \cdot 24 = 4,372 \cdot 8760 \approx 38298 \text{ кВт} \cdot \text{ч}. \quad (4.11)$$

На основании полученных данных при помощи программного комплекса «ОДОВЭР» определено оптимальное значение ометаемой площади ветроколеса. 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. Результаты реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров рассматриваемой ветроэнергетической установки изображены на рисунке 4.11.

Расчёт и оптимизация ВЭУ

|           |      |    |          |       |       |
|-----------|------|----|----------|-------|-------|
| N ном ВЭУ | 5500 | Вт | W потр   | 38298 | кВт·ч |
| St        | 1    | м2 | N уд 0   | 17    | Вт    |
| ξ         | 0,45 |    | N уд max | 3665  | Вт    |
| η         | 0,85 |    |          |       |       |

☐ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

|      |     |    |       |       |       |
|------|-----|----|-------|-------|-------|
| S вк | 831 | м2 | W ВЭУ | 23390 | кВт·ч |
|------|-----|----|-------|-------|-------|

Расчёт    Готово

**N ном ВЭУ недостаточно для обеспечения потребителя электроэнергией**

Рисунок 4.11 – Расчет оптимальной ометаемой площади ветроколеса при номинальной мощности ВЭУ 5,5 кВт

При помощи программного комплекса «ОДОВЭР» выполнено моделирование работы ветрогенератора при значении ометаемой площади ветроколеса  $S_{\text{оп}} = 220 \text{ м}^2$ , определенном в соответствии с общепринятым подходом. По результатам расчетов определено, что количества электроэнергии, которое ветроэнергетическая установка выработает в течение года в климатических условиях села Каип Ключевского района Алтайского края, недостаточно для

обеспечения электропотребления установки РВС-40. Результаты расчетов электроэнергии, генерируемой ветроэнергетической установкой с ометаемой площадью ветроколеса  $S_{оп} = 220 \text{ м}^2$  и номинальной мощностью ветрогенератора  $N_{ном} = 5,5 \text{ кВт}$ , изображены на рисунке 4.12.

| Параметр  | Значение | Единица |
|-----------|----------|---------|
| N ном ВЭУ | 5500     | Вт      |
| W потр    |          | кВт·ч   |
| St        | 1        | м²      |
| N уд 0    | 17       | Вт      |
| ξ         | 0,45     |         |
| N уд max  | 3665     | Вт      |
| η         | 0,85     |         |
| S вк      | 220      | м²      |
| W ВЭУ     | 17778    | кВт·ч   |

Рисунок 4.12 – Расчет выработки ветрогенератора при номинальной мощности ВЭУ 5,5 кВт

Таким образом, номинальной мощности ветрогенератора  $N_{ном.ВЭУ} = 5,5 \text{ кВт}$  недостаточно для энергообеспечения установки РВС-40 на территории села Каип Ключевского района Алтайского края, что говорит о возможном возникновении неточности при определении значений технических параметров ветроэнергетических установок, что в последствии может привести к их неэффективности.

Следовательно, для энергообеспечения рассматриваемого оборудования при помощи ветроэнергетической установки с заданными значениями КИЭВ, КПД, стартовой и максимальной удельной мощности ветрового потока необходимо произвести увеличение номинальной мощности ветрогенератора. 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.

По результатам расчета для гарантированного обеспечения электроустановки РВС-40 электроэнергией в климатических условиях села Каип Ключевского района Алтайского края минимальная номинальная мощность ветрогенератора составляет 11 кВт. При этом ометаемая площадь ветроколеса в соответствии с общепринятым подходом равна

$$S_{\text{оп}} = \frac{2 \cdot N_{\text{ном.ВЭУ}}}{\rho_{\text{ср}} \cdot v_{\text{сгр}}^3 \cdot \xi \cdot \eta} = \frac{2 \cdot 45000}{1,257 \cdot 104,5 \cdot 0,38} = 441 \text{ м}^2.$$

При помощи программного комплекса «ОДОВЭР» определено, что для гарантированного обеспечения электроустановки необходимым количеством электроэнергии достаточно значения ометаемой площади ветроколеса  $S_{\text{опт}} = 534 \text{ м}^2$ , что отражено на рисунке 4.13.

Рисунок 4.13 – Расчет оптимальной ометаемой площади ветроколеса при номинальной мощности ВЭУ 11 кВт

При этом процентное отклонение значения, рассчитанного в соответствии с общепринятым подходом, от значения, найденного при реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки, составило

$$\partial S = \left| \frac{441 - 534}{441} \right| \cdot 100\% = 21\%.$$

Согласно результатам моделирования работы ВЭУ с номинальной мощностью ветрогенератора  $N_{\text{ном.ВЭУ}} = 11 \text{ кВт}$  и ометаемой площадью ветроколеса  $S_{\text{оп}} = 441 \text{ м}^2$  составляет  $W_{\text{год.оп}} = 35\,557 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ , что изображено на рисунке 4.14.

Расчёт и оптимизация ВЭУ

N ном ВЭУ  Вт

W потр  кВт·ч

St  м²

N уд 0  Вт

ξ

N уд max  Вт

η

☒ Расчёт значения генерируемой электроэнергии при фиксированной ометаемой площади ветроколеса

S вк  м²

W ВЭУ  кВт·ч

Рисунок 4.14 – Расчет выработки ветрогенератора при номинальной мощности ВЭУ 11 кВт

Таким образом, при проведении расчетов ометаемой площади ветроколеса в соответствии с общепринятым подходом для значения номинальной мощности ветрогенератора  $N_{\text{ном.ВЭУ}} = 11 \text{ кВт}$  относительная разница между количеством электроэнергии, генерируемым ВЭУ в течение года, и количеством электроэнергии, потребляемым в течение года электроустановкой РВС-40, составляет

$$\partial W = \left| \frac{35557 - 38298}{38298} \right| \cdot 100\% = 7,7\%.$$

Результаты расчетов, проводимых в рамках поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для гарантированного обеспечения электроустановки РВС-40 в климатических условиях села Каип Ключевского района Алтайского края, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки

| № п/п | $N_{\text{ном.ВЭУ}}$<br>Вт | $S_{\text{опт}}, \text{м}^2$ | $S_{\text{оп}}, \text{м}^2$ | $\delta S, \%$ | $W_{\text{год.опт}},$<br>кВт·ч | $W_{\text{год.оп}},$<br>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                         |

Сравнительный анализ результатов моделирования работы ВЭУ с различными значениями технических параметров показал, что определение номинальной мощности ветрогенератора относительно среднесуточной потребляемой мощности электрооборудования может приводить к неспособности АЭК обеспечить собственные нужды в электроэнергии, так как при увеличении ометаемой площади ветроколеса до максимальных эффективных значений годовой баланс электроэнергии остается отрицательным, что подтверждено результатами работы программного комплекса «ОДОВЭР». При этом определение значения ометаемой площади ветроколеса в соответствии с общепринятым подходом не позволяет вычислить оптимальное значение данной величины, что подтверждается результатами моделирования работы анализируемой ВЭУ при значении номинальной мощности ветрогенератора  $N_{\text{ном.ВЭУ}} = 5,5 \text{ кВт}$ . Значение ометаемой площади ветроколеса при реализации разработанного алгоритма увеличено на величину  $\delta S = 278\%$  с  $S_{\text{оп}} = 220 \text{ м}^2$  до максимального возможного эффективного значения ометаемой площади ветроколеса  $S_{\text{опт}} = 831 \text{ м}^2$ .

При заданных значениях неизменяемых технических параметров ВЭУ минимальное значение номинальной мощности ветрогенератора, при котором

возможно обеспечение установки РВС-40 электроэнергией, составляет  $N_{\text{ном.ВЭУ}} = 11$  кВт. При этом значение ометаемой площади ветроколеса, рассчитанное в соответствии с общепринятым подходом, составляет  $S_{\text{оп}} = 441 \text{ м}^2$ , при котором количество генерируемой в течение года электроэнергии равно  $W_{\text{ВЭУгод}} = 35557$  кВт·ч, что на 7,7% меньше необходимого количества электроэнергии. Значение ометаемой площади ветроколеса, найденное при реализации разработанного алгоритма, составляет  $S_{\text{опт}} = 534 \text{ м}^2$ , что на 21% больше, чем значение, определенное в соответствии с общепринятым подходом, но количество генерируемой за год электроэнергии равно  $W_{\text{ВЭУгод}} = 38298$  кВт·ч. Таким образом, при увеличении значения ометаемой площади ветроколеса путем реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки данная ВЭУ может обеспечить исследуемое оборудование необходимым количеством электроэнергии при номинальной мощности ветрогенератора  $N_{\text{ном.ВЭУ}} = 11$  кВт, что невозможно при расчете значения ометаемой площади ветроколеса в соответствии с общепринятым подходом.

При проведении дальнейших расчетов выяснено, что при увеличении номинальной мощности ветрогенератора ветроэнергетические установки, параметры которых определены в соответствии с общепринятым подходом и при помощи алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ВЭУ, способны обеспечить годовое электропотребление установки РВС-40. При этом увеличение номинальной мощности ветрогенератора приводит к уменьшению значения ометаемой площади ветроколеса при применении разработанного алгоритма и его увеличению в соответствии с общепринятым подходом. Согласно таблице 4.2 для энергообеспечения установки РВС-40 в климатических условиях села Каип процентное отклонение значения, рассчитанного в соответствии с общепринятым подходом, от значения, найденного при реализации алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки, достигает значения  $\delta S = 74\%$ .

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  $\delta S = 74\%$ .

#### **Выводы по главе 4**

Предложен алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для определения минимальной ометаемой площади ветроколеса, при которой ветроэнергетическая установка способна обеспечить собственные нужды потребителя в электроэнергии, разработан и протестирован программный комплекс для автоматизированного формирования баз данных метеорологических параметров, используемых при оценке ветровых энергоресурсов местности, и расчета минимального необходимого значения ометаемой площади ветроколеса для гарантированного обеспечения собственных нужд потребителей в электроэнергии, в том числе в агропромышленном комплексе, который реализует действие представленного алгоритма.

Данный алгоритм способствует выполнению расчета значения электроэнергии, вырабатываемой ветроэнергетической установкой при изменении значения ометаемой площади ветроколеса, что 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  $S_{\text{оп}} = 881 \text{ м}^2$  до  $S_{\text{опт}} = 231 \text{ м}^2$ .

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в данной главе настоящей диссертационной работы разработан и описан алгоритм поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для



рационального использования ветровых энергоресурсов и повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК.

## 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 способствовать 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 ( $W_{оп} = 429,2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ) и математической модели работы ветрогенератора в условиях динамического воздействия расширенной группы метеорологических параметров ( $W_{дин} = 363,5 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ ).

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  $S_{\text{оп}} = 881$  до  $S_{\text{опт}} = 231 \text{ м}^2$ .

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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аверкин, А. Г. I-d-диаграмма влажного воздуха и ее применение при проектировании технических устройств : учебное пособие / А. Г. Аверкин. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-8114-2248-7.
2. Азарян, А. А. Электрооборудование возобновляемой энергетики : учебное пособие / А. А. Азарян, В. И. Таразанов. – Краснодар : Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина, 2024. – 100 с. – ISBN 978-5-907402-33-1. – EDN PWDFLU.
3. Алексеенко, В. А. Научно-технические аспекты разработки и функционирования автономных вертикально-осевых роторных ветроэнергетических установок для сельскохозяйственных потребителей : специальность 05.14.08 "Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Алексеенко Виталий Алексеевич, 2022. – 377 с. – EDN KZUITP.
4. Аלקатаа, А. М. М. Оптимизация системы электроснабжения на базе энергоустановок с возобновляемыми источниками энергии : специальность 05.14.08 "Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.М.М. Аלקатаа, 2019. – 197 с. – EDN YWYNQQ.
5. Альтернативная энергетика: перспективы развития рынка ВИЭ в России [Электронный ресурс]. Деловой профиль, 2021. URL: <https://delprof.ru/press-center/open-analytics/alternativnaya-energetika-perspektivy-razvitiya-rynka-vie-v-rossii>.
6. Аникеев, С. В. Оценка потенциала автономных энергетических комплексов на базе совместного использования энергии солнца и ветра в Волгоградской области / С. В. Аникеев, С. И. Богданов, И. О. Коннов // Вестник Ижевской государственной сельскохозяйственной академии. – 2025. – № 1(81). – С. 136-148. – DOI 10.48012/1817-5457\_2025\_1\_136-148. – EDN RDMOFC.

7. Аникеев, С. В. Оценка потенциала ветровой энергии в районах Волгоградской области для развития ветроэнергетики малой мощности / С. В. Аникеев, И. О. Коннов, С. И. Богданов // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. – 2024. – № 6(78). – С. 412-422. – DOI 10.32786/2071-9485-2024-06-45. – EDN MOLPBF.

8. Антонов, Н. В. Развитие зеленой энергетики в России и за рубежом достижения и перспективы / Н. В. Антонов, М. Ю. Евдокимов, В. А. Шилин. – (Цифры и факты). – Текст : непосредственный // Энергосбережение. – 2020. – № 7. – С. 62-68.

9. Безруких П.П. Ветроэнергетика : справочно-методическое издание / П. П. Безруких, П. П. Безруких (мл.), С. В. Грибков ; под общ. ред. П. П. Безруких. – Москва : Теплоэнергетика, 2014. – 299 с. – ISBN 978-5-98385-014-9.

10. Бердин, В. Х. Развитие ВИЭ в России: потенциал и практические шаги / В. Х. Бердин, В. Ю. Поташников, А. О. Кокорин, Г. М. Юлкин // Экономическая политика. – 2020. – Т. 15, № 2. – С. 106-135. – DOI 10.18288/1994-5124-2020-2-106-135. – EDN TVDSQN.

11. Берней, В. И. Повышение качества электроэнергии в сетях и у потребителей в сельском хозяйстве : учебное пособие / В. И. Берней – Тверь : Тверская ГСХА, 2022. – 51 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/238673> (дата обращения: 14.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

12. Бурцев, С.И. Влажный воздух. Состав и свойства : учебное пособие / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. – Санкт-Петербург : СПбГАХПТ, 1998. – 146 с. ISBN 5-89565-005-8.

13. Бутузов, В. А. Российская возобновляемая энергетика. Достижения и перспективы / В.А. Бутузов // Энергосбережение. – 2022. – № 4. – С. 52-57.

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. – EDN LZWOBG.

15. 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-летию 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. – EDN PMJKIU.

16. 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. – EDN WIPXYL.

17. 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. – EDN RBPOBP.

18. 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.

19. 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. – EDN LNRILLO.

20. 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. – EDN QJMZCO.

21. 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. – EDN HUBYYG.

22. 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. – EDN QSYLIG.

23. 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. – EDN YAHJSG.

24. 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. – EDN QEXGCU.

25. 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. – EDN GEKOEС.

26. 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. – EDN KTILSR.

27. 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. – EDN TAUCRF.

28. Винников, А. В, Денисенко, Е.А., Хицкова, А.О. К расчету экономического потенциала ветровой энергетики и выбора ветроэлектрических установок / А.В. Винников, Е.А. Денисенко, А.О. Хицкова // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2016. – № 115. – С. 1311-1323.

29. Гадолин, А. В. О законе изменяемости ветра. Приложение к LXII- тому Записок. Импер. Академии наук № 4 / А. В. Гадолин. – Санкт-Петербург: Импер. Акад. наук, 1890. – 146 с.

30. Глущенко, А. Г. Физика : учебник / А. Г. Глущенко, Е. П. Глущенко. – Самара : ПГУТИ, 2022. – 684 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/411380> (дата обращения: 19.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

31. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах

электроснабжения общего назначения : дата введения 2013.07.22. – Москва : Изд-во стандартов. – 19 с.

32. ГОСТ Р 51237-98. Нетрадиционная энергетика. Ветроэнергетика. Термины и определения : дата введения 1999.07.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2023. – 12 с.

33. ГОСТ Р 54418.1-2012. Возобновляемая энергетика. Ветроэнергетика. Установки ветроэнергетические. Часть 1. Технические требования : дата введения 2014.01.01. – Москва : Изд-во стандартов, 2021. – 88 с.

34. Грибков, С. В. Исследование и разработка ветроустановок малой мощности для автономных систем электроснабжения : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Грибков Сергей Владимирович, 2024. – 335 с. – EDN ZJTIQI.

35. Гусаров, В. А. Разработка генерирующего комплекса сельской микросети с применением возобновляемых источников энергии : специальность 05.14.08 "Энергоустановки на основе возобновляемых видов энергии" : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Гусаров Валентин Александрович, 2019. – 387 с. – EDN RWZQAK.

36. Елистратов, В. В. Возобновляемая энергетика / В. В. Елистратов. – 3-е издание, дополненное. – Санкт-Петербург : Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования "Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого", 2016. – 424 с. – ISBN 978-5-7422-5419-5. – DOI 10.18720/SPBPU/2/s16-145. – EDN XBICXH.

37. ЕЭС 2022 : Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.sos-ops.ru/functioning/ups/ups2022/> (Дата обращения 27.06.2024).

38. Жуковская, А. В. Проблемы качества электрической энергии в городских сетях / А. В. Жуковская // Россия молодая : Сборник материалов XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием, Кемерово, 19-21 апреля 2022 года / Редколлегия: К.С. Костиков (отв. ред.) [и др.].

– Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 2022. – С. 21407.1-21407.5. – EDN DPHLRC.

39. Журавлев, Г. Г. Оценка ветроэнергетического потенциала Кемеровской области / Г. Г. Журавлев, Г. О. Задде // Вестник Томского государственного университета. – 2013. – № 376. – С. 175-181. – EDN RLYNQN.

40. Зиновьева, Е. В. Анализ перспективы внедрения объектов ветроэнергетики в энергокомплекс Ивановской области / Е. В. Зиновьева, Е.В. Барочкин // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2025. – № 5. – С. 20-27. – DOI 10.17588/2072-2672.2025.5.020-027. – EDN DCPNLL.

41. Зубова, Н. В. Повышение режимной управляемости ветроэнергетических установок с изменяемой геометрией лопастей регуляторами на нечеткой логике : специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зубова Наталья Владиславовна. – Новосибирск, 2014. – 190 с. – EDN SVBUFT.

42. Компания "Глобус Агро" : сайт. Барнаул. URL: [https://agromelmash.ru/katalog/1529-reshetno-vozdushnyiy-separator-rvs-40/?utm\\_medium=cpc&utm\\_source=elama-yandex&utm\\_campaign=agromelmash\\_t&utm\\_content=cid%7C96682632%7Cgid%7C5570715416%7Caid%7C16977368502%7Cadp%7Cno%7Cdvc%7Cdesktop%7Cpid%7C205570715416%7Crid%7C205570715416%7Cdid%7C205570715416%7Cpos%7Cpremium2%7Cadn%7Csearch%7Crid%7C0%7C&utm\\_term=---autotargeting&etext=2202.8AOBnPQFh-QoLRfzfGiqWrbTgogr1qgx0RGynuF4ly1jdHBic3dib2VudHR1bmVs.5bda35100eec9a8ff0b47a8ce90d890d91d43565&yclid=15146030502431162367](https://agromelmash.ru/katalog/1529-reshetno-vozdushnyiy-separator-rvs-40/?utm_medium=cpc&utm_source=elama-yandex&utm_campaign=agromelmash_t&utm_content=cid%7C96682632%7Cgid%7C5570715416%7Caid%7C16977368502%7Cadp%7Cno%7Cdvc%7Cdesktop%7Cpid%7C205570715416%7Crid%7C205570715416%7Cdid%7C205570715416%7Cpos%7Cpremium2%7Cadn%7Csearch%7Crid%7C0%7C&utm_term=---autotargeting&etext=2202.8AOBnPQFh-QoLRfzfGiqWrbTgogr1qgx0RGynuF4ly1jdHBic3dib2VudHR1bmVs.5bda35100eec9a8ff0b47a8ce90d890d91d43565&yclid=15146030502431162367) (Дата обращения: 19.06.2026 г.).

43. Костюченко, Л. П. Проектирование систем сельского электроснабжения : учебное пособие / Л. П. Костюченко. – 3-е изд., испр. и доп. – Красноярск : КрасГАУ, 2016. – 264 с. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная

система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/130092> (дата обращения: 16.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

44. Красовская, М. А. Статистическая обработка и исследование результатов компьютерных экспериментов : учебное пособие / М. А. Красовская, Е. А. Давыдкина, А. В. Корнеевкова. – Москва : МАИ, 2025. – 78 с. – ISBN 978-5-4316-1232-9. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/506737> (дата обращения: 16.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

45. Купин, Д. А. Обоснование эффективности гибридной системы электроснабжения населенного пункта Курья на основе ветроэнергетических установок / Д. А. Купин, В. Б. Белый // Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития : материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 75-летию Дальневосточного государственного аграрного университета. В 3 т., Благовещенск, 16-17 апреля 2025 года. – Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2025. – С. 324-329. – DOI 10.22450/978-5-9642-0480-0-324-329. – EDN TWJEIL.

46. Лаврик, А. Ю. Повышение энергоэффективности автономных электротехнических комплексов путем обоснования состава и режимов работы с учетом предиктивных алгоритмов управления нагрузкой : специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Лаврик Александр Юрьевич, 2021. – 145 с. – EDN EFDXPQ.

47. Левченко, Э.П. Ветрогенераторы. Преимущества и недостатки / Э.П. Левченко, И. В. Смирнова, А. Т. Павленко, М. Э. Левченко // Экологический вестник Донбасса. – 2024. – № 2(12). – С. 16-23. – EDN VTBOCG.

48. Лукутин, Б. В. Системы электроснабжения с ветровыми и солнечными электростанциями : Учебное пособие / Б. В. Лукутин, И. О. Муравлев, И.А. Плотников. – Томск : Томский политехнический университет, 2015. – 120 с. – EDN XQBEWD.

49. Лукьянова, К. С. Определение удельной мощности ветрового потока на экспериментальном участке в Г. Орск / К. С. Лукьянова, М. Ф. Фазлиахметова, Д.А. Гюнтер // Современные инновации в науке и технике : Сборник научных трудов 4-ой Международной научно-практической конференции: В 4-х томах, Курск, 17 апреля 2014 года / Ответственный редактор Горохов А.А.. Том 2. – Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2014. – С. 398-402. – EDN SZKBGJ.

50. Манусов, В. З. Оценка мощности ветроэнергетических установок на основе нечеткой модели ветрового потока и его вероятностных характеристик / В.З. Манусов, Н. Хасанзода // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2019. – № 1(42). – С. 73-82. – DOI 10.17212/1727-2769-2019-1-73-82. – EDN FNBIKX.

51. Матренин, П. В. Устойчивое краткосрочное прогнозирование скорости ветра с помощью адаптивных компактных нейронных сетей / П. В. Матренин, В. З. Манусов, Е. А. Игумнова // Проблемы региональной энергетики. – 2020. – № 3(47). – С. 69-80. – DOI 10.5281/zenodo.4018960. – EDN ZZLPLP.

52. Мировой рынок ветроэнергетики: обзор за 2021 г. и прогноз на 2022-2026 гг. [Электронный ресурс]. Verny Capital, 2022. URL: [https://vernycapital.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Wind-Power-Market\\_RUS.pdf](https://vernycapital.com/wp-content/uploads/2022/10/Global-Wind-Power-Market_RUS.pdf)

53. Назаров, М. Х. Оптимизация и планирование режимов автономной энергетической системы на основе возобновляемых и альтернативных источников энергии (на примере системы Памира) : специальность 05.14.02 "Электрические станции и электроэнергетические системы" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Назаров М.Х., 2022. – 195 с. – EDN PCIOHQ.

54. Нестерова, Н. В. Возобновляемые источники энергии / Н. В. Нестерова, А. Н. Мануйленко // Новые технологии и технические средства для эффективного развития АПК : Материалы национальной научно-практической конференции Воронежского государственного аграрного университета им. императора Петра I, Воронеж, 26 февраля 2019 года / Под общей редакцией О.М. Костикова,

А.В. Божко. Том Часть I. – Воронеж: Воронежский государственный аграрный университет им. Императора Петра I, 2019. – С. 215-223. – EDN QAJMKN

55. Никифоров, М.М. Перспективы развития мировой ветроэнергетики / М.М. Никифоров // Управление устойчивым развитием топливно-энергетического комплекса - 2023 : материалы IV всероссийской научно-практической конференции, Ухта, 23 ноября 2023 года – 24 2024 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 71-76.

56. Об утверждении Доктрины энергетической безопасности Российской Федерации : указ Президента Российской Федерации от 13 мая 2019 г. № 216 // Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Текст : электронный.

57. Об утверждении Стратегии развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 8 сентября 2022 года № 2567-р // Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Текст : электронный.

58. Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2050 года : распоряжение Правительства Российской Федерации от 12 апреля 2025 г. N 908-р // Доступ из справочно-правовой системы «КонсультантПлюс». – Текст : электронный.

59. Оганесян, Э. В. Математическая модель для определения параметров работы ветроэнергетической установки / Э. В. Оганесян, Э. А. Бекиров, М. М. Асанов // Строительство и техногенная безопасность. – 2016. – № 3(55). – С. 82-86. – EDN WWJXZX.

60. Попучиева, М. А. Экономические и энергетические показатели ветроэнергетических установок / М. А. Попучиева, А. В. Квитко // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : Сборник статей по материалам 74-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2018 год, Краснодар, 26 апреля 2019 года / Ответственный за выпуск А.Г. Кощев. –

Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубиллина, 2019. – С. 1004-1006. – EDN VQKEZV.

61. Правила устройства электроустановок: все действующие разделы и главы шестого и седьмого изданий . – Москва : ЭНАС, 2019. – 672 с. – ISBN 978-5-4248-0162-4. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/173340> (дата обращения: 16.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

62. Рахимов, О. С. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях / О.С. Рахимов, Д. Н. Мирзоев, Е. И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2021. – Т. 23, № 3. – С. 209-222. – DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222. – EDN NWISVC.

63. Российский статистический ежегодник (2024) : Федеральная служба государственной статистики [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://youthlib.mirea.ru/ru/resource/6570> (Дата обращения 15.03.2025).

64. Российское энергетическое агентство Минэнерго России. Возобновляемая энергетика в России и мире / РЭО Минэнерго России – М.: Российское энергетическое агентство, 2022. – 105 с.

65. 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». – EDN KQSMHI.

66. 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». – EDN XBOWYT.

67. 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». – EDN DTJOCL.

68. Семяшкина, А. В. Цифровое моделирование комбинированной системы ветро-дизельной генерации для электроснабжения объектов ТЭК на примере месторождения Остров Колгуев / А. В. Семяшкина, А. Г. Куделин // Управление устойчивым развитием топливно-энергетического комплекса - 2023 : материалы IV всероссийской научно-практической конференции, Ухта, 23 ноября 2023 года – 24 ноября 2024 года. – Ухта: Ухтинский государственный технический университет, 2023. – С. 84-90.

69. Степанов, В. С. Ветроэнергетика : учебное пособие / В. С. Степанов, Н.В. Старикова. – Иркутск : ИРНИТУ, 2018. – 142 с.

70. Тимофеев, А. В. Автономное энергоснабжение с применением ветроэнергетических установок в районах крайнего севера / А. В. Тимофеев // Актуальные вопросы устойчивого развития регионов, отраслей, предприятий : материалы Международной научно-практической конференции. В 2-х т., Тюмень, 13 декабря 2024 года. – Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2025. – С. 256-258. – EDN UZQAMK.

71. Федянин, В.Я. Основы использования нетрадиционных и возобновляемых источников энергии : учебное пособие / В. Я. Федянин, С.О. Хомутов, В. М. Иванов [и др.] ; Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический



университет им. И. И. Ползунова». – Барнаул : ООО "МЦ ЭОР", 2018. – 146 с. – ISBN 978-5-6040354-2-9. – EDN URCRFK.

72. Фокичева, Е.А. Планирование эксперимента и обработка результатов исследований : учебное пособие / Е.А. Фокичева, М.И. Алексеев. - Вологда : ВоГУ, 2014. - 72 с.

73. Фролов, Ю. М. Основы электроснабжения : учебное пособие / Ю.М. Фролов, В. П. Шелякин. – Санкт-Петербург : Лань, 2022. – 480 с. – ISBN 978-5-8114-1385-0. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/211058> (дата обращения: 14.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

74. Хижинков, О. В. Перспективы развития технологий ВИЭ в Алтайском крае / О. В. Хижинков // Интеллектуальная энергетика – 2022 : Сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции, Барнаул, 22 сентября 2022 года – Барнаул: Межрегиональный центр электронных образовательных ресурсов, 2022. – С. 58-65. – DOI 10.57112/22022-08.

75. Хузияхметов, Б.А. Моделирование автономной ветроэлектростанции малой мощности / Б. А. Хузияхметов, Б. А. Соловьев, М. Д. Иванов, Р. Т. Хазиева // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2025. – Т. 21, № 1. – С. 51-60. – DOI 10.17122/1999-5458-2025-21-1-51-60. – EDN GEBBQO.

76. Шакиров, В. А. Выбор площадки размещения ветроэлектростанции с использованием компьютерного моделирования рельефа местности и ветрового потока / В. А. Шакиров, А. Ю. Артемьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2017. – Т. 21, № 11(130). – С. 133-143. – DOI 10.21285/1814-3520-2017-11-133-143

77. Шакиров, В. А. Многокритериальный анализ перспективного размещения ветроэнергетических установок на севере Республики Саха (Якутия) / В. А. Шакиров // Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М.К. Аммосова. – 2013. – Т. 10, № 1. – С. 26-33.

78. Щурин, К.В. Планирование и организация эксперимента : учебное пособие для вузов / К.В. Щурин, Е.К. Волкова. – 2-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2025. – 336 с.

79. Электроэнергетические системы России : Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2024/> (Дата обращения 27.06.2024).

80. Электроэнергетические системы России : Системный оператор Единой энергетической системы [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <https://www.so-ups.ru/functioning/ups/ups2025/> (Дата обращения 13.05.2025).

81. Юдаев, И. В. Возобновляемые источники энергии / И. В. Юдаев, Ю.В. Даус, В. В. Гамага. – 4-е изд., стер. – Санкт-Петербург : Лань, 2024. – 328 с. – ISBN 978-5-507-48778-3. – Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. – URL: <https://e.lanbook.com/book/362954> (дата обращения: 14.11.2025). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

82. Юсупов К. И., Тожибоев С.Т. Обзор методов прогнозирования в ветроэнергетике / К.И. Юсупова, С.Т. Тожибоев // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2022. – № 12(252). – С. 70-73.

83. Abbas, G.A. Parametric Approach to Compare the Wind Potential of Sanghar and Gwadar Wind Sites / G. Abbas, B. Ali, K. Chandni, M. Koondhar, S. Chandio, S. Mirsaeidi // IEEE Access. – 2022. – V.10. – P. 110889-110904. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3215261.

84. Aktas, A.A. Model Proposal for Locating Wind Turbines / A. Aktas, M. Kabak // Procedia Computer Science. – 2016. – V.102. – P. 426-433. – DOI:10.1016/j.procs.2016.09.422.

85. Basu, J.B. Risk Mitigation & Profit Improvement of a Wind-Fuel Cell Hybrid System With TCSC Placement / J.B. Basu, S. Dawn, P.K. Saha, M.R. Chakraborty et al. // IEEE Access. – 2023. – V.11. – P. 39431-39447. – DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3267163.

86. Berrin, K. Exploitable wind power potential in Turkey with technological advancement and resulting environmental-economic aspects / K. Berrin // Energy

Exploration & Exploitation. – 2023. – V.41. – P.014459872211158. – DOI:10.1177/01445987221115814.

87. Deveci, M. Hybrid q-Rung Orthopair Fuzzy Sets Based CoCoSo Model for Floating Offshore Wind Farm Site Selection in Norway / M. Deveci, D. Pamucar, U. Cali, E. Kantar, K. Kölle, J. Tande // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2022. – V.8. – P.1261-1280. – DOI:10.17775/CSEEJPES.2021.07700.

88. Edwards, G. Challenges for probabilistic generation adequacy assessment in Sub-Saharan Africa / G. Edwards, C. Dent, N. Wade // IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2017. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/PESGM.2017.8274574.

89. Enomoto, M. Protection Method for Continuous Operation of Wind Power Plants in a Mechanical Circuit Breaker-Based Multi-Terminal HVDC System / M. Enomoto, K. Wakatsuki, K. Sano // IEEE Open Access Journal of Power and Energy. – 2026. – V.13. – P.15-26. – DOI:10.1109/OAJPE.2025.3649154.

90. Gao, X. Monthly Wind Power Forecasting: Integrated Model Based on Grey Model and Machine Learning / X. Gao // Sustainability. – 2022. – V.14. – P. 15403. – DOI: 10.3390/su142215403.

91. He, J.Y. Assessment of future wind resources under climate change using a multi-model and multi-method ensemble approach / J.Y. He, Q.S. Li, P.W. Chan, X.D. Zhao // Applied Energy. – 2023. – V.329. – P. 120290. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.120290.

92. Höfer, T. Wind farm siting using a spatial Analytic Hierarchy Process approach: A case study of the Städteregion Aachen / T. Höfer, Y. Sunak, S. Hafiz, R. Madlener // Applied Energy. – 2016. – V.163. – P. 222-243. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.138.

93. Kim, G. A probabilistic approach to potential estimation of renewable energy resources based on augmented spatial interpolation / G. Kim, J. Hur // Energy. – 2023. – V.263. – P. 125582. – DOI: 10.1016/j.energy.2022.125582.

94. Li, J. Assessment of combined wind and wave energy in the tropical cyclone affected region: An application in China seas / J. Li, S. Pan, Y. Chen, Y. Yao, C. Xu // Energy. – 2022. – V.260. – P. 125020. – DOI: 10.1016/j.energy.2022.125020.

95. Ma, Y. Transient Characteristics and Quantitative Analysis of Electromotive Force for DFIG-based Wind Turbines during Grid Faults / Y. Ma, D. Zhu, X. Zou, Y. Kang, J. M. Guerrero // Chinese Journal of Electrical Engineering. – 2022. – V.8. – P. 3-12. – DOI:10.23919/CJEE.2022.000010.

96. Moltames, R. Multi-Criteria Decision Methods for Selecting a Wind Farm Site Using a Geographic Information System (GIS) / R. Moltames, M. Naghavi, M. Silakhori, Y. Noorollahi, H. Yousefi, M. Hajiaghaei-Keshteli, B. Azizimehr // Sustainability. – 2022. – V.14. – P. 14742. – DOI:10.3390/su142214742.

97. Noorollahi, Y. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection using GIS / Y. Noorollahi, H. Yousefi, M. Mohammadi // Sustainable Energy Technologies and Assessments. – 2016. – V.13. – P. 38-50. – DOI: 10.1016/j.seta.2015.11.007.

98. Onea, F. A spatial analysis of the offshore wind energy potential related to the Mediterranean islands / F. Onea, E. Rusu // Energy Reports. – 2022. – V.8. – P. 99-105. – DOI: 10.1016/j.egyr.2022.10.249.

99. Pandey, R.K. Renewable energy sources operational performance evaluation with hybrid model / R. K. Pandey, H. Kumar // 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. – 2017. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/PESGM.2017.8274455.

100. Park, B. Probabilistic Zonal Reserve Requirements for Improved Energy Management and Deliverability With Wind Power Uncertainty / B. Park, Z. Zhou, A. Botterud, P. Thimmapuram // IEEE Transactions on Power Systems. – 2020. – V.35. – P. 4324-4334. – DOI: 10.1109/TPWRS.2020.2992763.

101. Renewable capacity statistics 2023 [Электронный ресурс]. IRENA, 2023. URL: <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>.

102. Renewable power generation costs in 2024 [Электронный ресурс]. IRENA, 2025. URL: <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024>.

103. Singh, K.A. Wind Energy Resource Assessment for Cook Islands With Accurate Estimation of Weibull Parameters Using Frequentist and Bayesian Methods /

K. A. Singh, M. G. M. Khan, M. R. Ahmed // IEEE Access. – 2022. – V.10. – P. 25953. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3156933.

104. Singh, R.R. Intelligent IoT Wind Emulation System Based on Real-Time Data Fetching Approach / R. R. Singh, S. Banerjee, R. Manikandan, K. Kotecha, V. Indragandhi, S. Vairavasundaram // IEEE Access. – 2022. – V.10. – P. 78253-78267. – DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3193774.

105. Szurek, M. GIS-based method for wind farm location multi-criteria analysis / M. Szurek, J. Blachowski. A.I. Nowacka // Prace Naukowe Instytutu Gornictwa Politechniki Wroclawskiej . – 2014. – V.21. – P. 65-81. – DOI: 10.5277/ms142106.

106. Vasilev, V.Y. 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.

107. Wickert, M. Building Virtual Power Plants With Dataspaces for Faster Integration of Distributed Energy Resources / M. Wickert, D. Klapp, O. Hohlfeld // IEEE Access. - 2026. - V.14. - P.14540-14557. - DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3655594.

108. Xiaomei, M. Assessment method of offshore wind resource based on a multi-dimensional indexes system / M. Xiaomei, L. Yongqian, J. Yan, S. Han et al. // CSEE Journal of Power and Energy Systems. – 2021. – DOI: 10.17775/CSEEJPES.2021.09260.

109. Zhou, Y. Coordinated Frequency Control through Safe Reinforcement Learning / Y. Zhou, L. Zhou, D. Shi, X. Zhao // 2022 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM). – 2022. – P. 1-5. – DOI: 10.1109/PESGM48719.2022.9916894.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

## Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2024615033**

**Программный комплекс обработки данных для  
многофакторной оценки ветровых энергоресурсов  
«ОДОВЭР»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет  
им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) (RU)*

Авторы: *Васильев Валерий Юрьевич (RU), Компанеец Борис  
Сергеевич (RU), Нефедов Сергей Федорович (RU)*

Заявка № **2024613439**  
Дата поступления **20 февраля 2024 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **01 марта 2024 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности  
  
Ю.С. Зубов



Рисунок А.1 – Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ  
№ 2024615033 «Программный комплекс обработки данных для  
многофакторной оценки ветровых энергоресурсов «ОДОВЭР»



## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

## Свидетельства о государственной регистрации баз данных

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации базы данных

**№ 2025622041**

**«Энергетический потенциал экспериментальной  
установки ЭК-0\_01 в условиях изменяющегося  
атмосферного давления»**

Правообладатель: *федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Алтайский государственный технический университет им.  
И.И. Ползунова» (RU)*

Авторы: *Васильев Валерий Юрьевич (RU), Компанеев Борис  
Сергеевич (RU), Нефедов Сергей Федорович (RU), Антонова  
Елизавета Максимовна (RU)*

Заявка № **2025621426**  
Дата поступления **15 апреля 2025 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре баз данных **12 мая 2025 г.**



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



Ю.С. Зубов

Рисунок Б.1 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025622041 «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0\_01 в условиях изменяющегося атмосферного давления»





Рисунок Б.2 – Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2025621910 «Энергетический потенциал экспериментальной установки ЭК-0\_01 в условиях изменяющейся относительной влажности воздуха»



## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Акты внедрения результатов диссертационной работы

КФХ Макаренко Алексей Иванович

Алтайский край, Ключевский район, с. Каип

**АКТ ВНЕДРЕНИЯ  
РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Данный акт составлен о том, что с 4 по 15 августа 2025 г. на территории крестьянского (фермерского) хозяйства Макаренко Алексей Иванович проведена работа по оптимизации технических параметров ветроэнергетической установки, в том числе площади ветроколеса. Исследование проводилось при непосредственном участии старшего преподавателя ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ) Васильева В.Ю. под руководством заведующего кафедрой «Электрификация производства и быта» АлтГТУ Компанейца Б.С.

В рамках исследования проведен сбор и обработка данных измерений метеорологических параметров за последние 10 лет. Определен расчетный период времени, в рамках которого подразумевается обеспечение объектов КФХ электроэнергией путем генерации с использованием энергоустановки на базе энергии ветра. Полученные результаты обработаны посредством разработанного в АлтГТУ программного комплекса «ОДОВЭР» и использованы для компьютерного моделирования энергетического потенциала ветроэнергетической установки с заданными параметрами.

При помощи алгоритма оптимизации технических параметров ветроэнергетических установок, реализованном в программном комплексе «ОДОВЭР» выявлены оптимальные параметры ВЭУ. Основываясь на полученных результатах, а также на данных о потребляемой электроэнергии, рекомендовано использование ветроэнергетической установки с номинальной мощностью ветрогенератора 2,2 кВт и площадью ветроколеса не менее 65,09 м<sup>2</sup>, либо номинальной мощностью ветрогенератора 3 кВт и площадью ветроколеса не менее 44,39 м<sup>2</sup>, что может способствовать обеспечению собственных потребностей в электроэнергии.

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Директор<br/>КФХ Макаренко Алексей Иванович</p> <p>Заведующий кафедрой «Электрификация<br/>производства и быта» ФГБОУ ВО<br/>«Алтайский государственный технический<br/>университет им. И.И. Ползунова», к. т. н.</p> <p>Старший преподаватель ФГБОУ ВО<br/>«Алтайский государственный технический<br/>университет им. И.И. Ползунова»</p> | <div style="text-align: center;">  </div> <p>А.И. Макаренко</p> <p>Б.С. Компанеец</p> <p>В.Ю. Васильев</p> |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Рисунок В.1 – Акт о внедрении результатов научного исследования на КФХ Макаренко А.И.

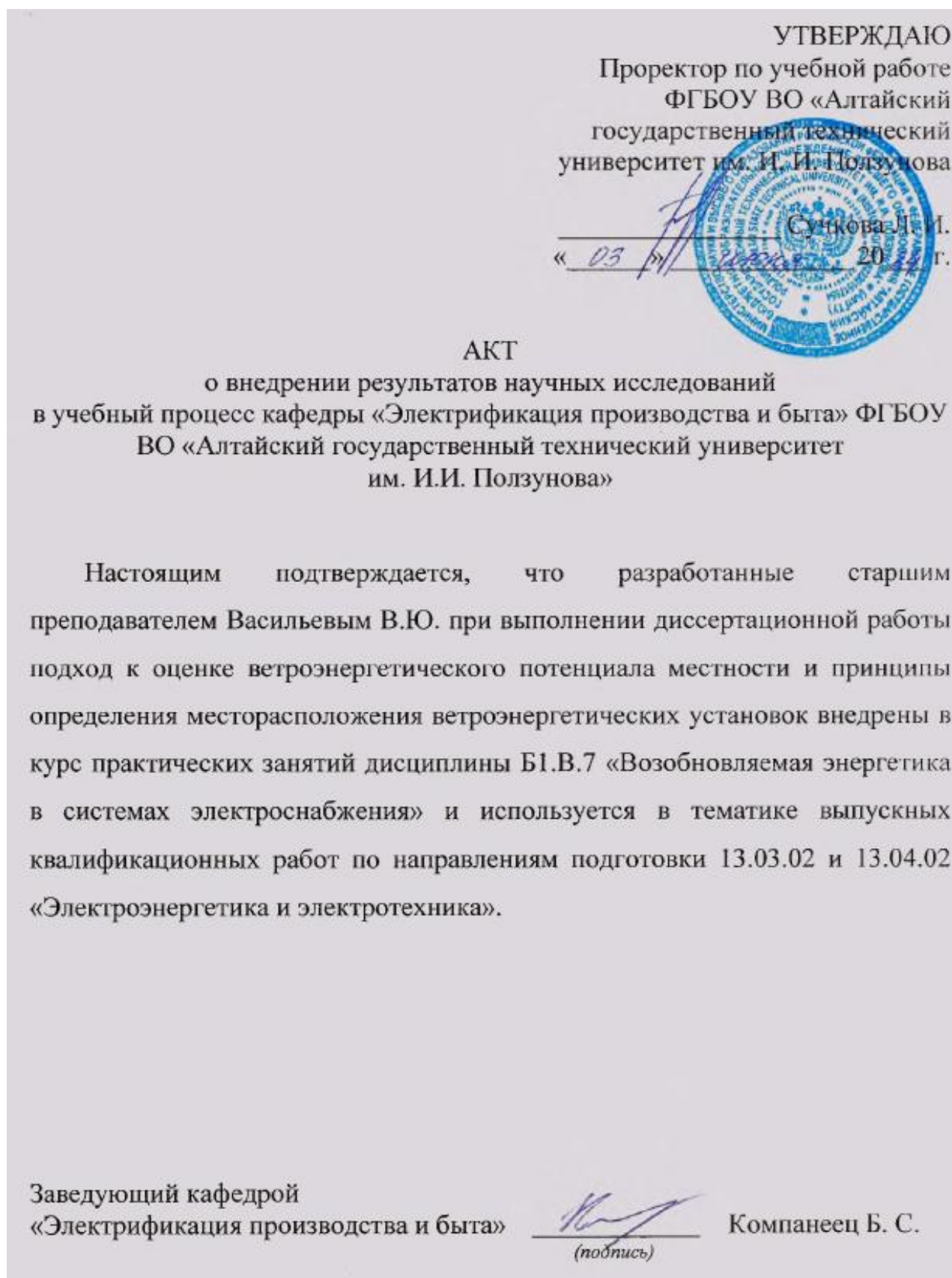


Рисунок В.2 – Акт о внедрении результатов научных исследований в учебный процесс кафедры «Электрификация производства и быта» от 03.06.2024 года



КФХ Компанеец С.Б.  
Алтайский край, Косихинский район,  
с. Глушинка

### АКТ ВНЕДРЕНИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Данный акт составлен о том, что в период с 25 по 29 мая 2026 г. на территории крестьянского (фермерского) хозяйства Компанеец Сергей Борисович проведена работа по определению оптимальных технических параметров ветроэнергетической установки, в том числе ометаемой площади ветроколеса и номинальной мощности ветрогенератора. Исследование проводилось при непосредственном участии заведующего лабораторией, старшего преподавателя кафедры «Электрификация производства и быта» (ЭПБ) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлпГТУ) Васильева В.Ю. под руководством заведующего кафедрой ЭПБ АлпГТУ Компанейца Б.С.

В рамках исследования проведены сборы и обработка данных измерений метеорологических параметров за период с 24 мая 2016 г. по 24 мая 2026 г. Определен график нагрузки электрооборудования, электроснабжение которого планируется осуществлять при помощи энергоустановок на базе энергии ветра. Полученные результаты обработаны посредством разработанного в АлпГТУ программного комплекса «ОДОВЭР» и использованы для компьютерного моделирования энергетического потенциала ветроэнергетической установки (ВЭУ) с заданными параметрами.

При помощи алгоритма поиска оптимальных значений технических параметров ветроэнергетической установки для рационального использования ветровых энергоресурсов и повышения эффективности энергообеспечения потребителей АПК, реализованном в программном комплексе «ОДОВЭР», выявлены оптимальные параметры ветроэнергетической установки. Основываясь на полученных результатах, а также на данных о потребляемой электроэнергии, для КФХ Компанеец Сергей Борисович были даны следующие рекомендации по выбору количества ВЭУ и значений их технических параметров:

| Количество ВЭУ | Номинальная мощность ветрогенератора, Вт | Ометаемая площадь ветроколеса, м <sup>2</sup> |
|----------------|------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1              | 45 000                                   | 4474                                          |
| 1              | 55 000                                   | 2744                                          |
| 1              | 63 000                                   | 2333                                          |
| 2              | 22 000                                   | 2421                                          |
| 2              | 30 000                                   | 1244                                          |
| 2              | 37 000                                   | 1016                                          |
| 2              | 45 000                                   | 902                                           |
| 3              | 15 000                                   | 1491                                          |
| 3              | 18 500                                   | 906                                           |
| 3              | 22 000                                   | 730                                           |

Глава КФХ Компанеец С.Б.



С.Б. Компанеец

Заведующий кафедрой «Электрификация производства и быта» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», к.т.н., доцент.

Б.С. Компанеец

Заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры «Электрификация производства и быта» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

В.Ю. Васильев

Рисунок В.3 – Акт о внедрении результатов научного исследования на КФХ Компанеец С.Б.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

### Данные экспериментального исследования зависимости энергетического потенциала от расширенной группы метеорологических параметров

Таблица Г.1 – Результаты экспериментального исследования зависимости мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, от температуры воздуха

| №  | T, °C | P <sub>атм</sub> ,<br>мм рт.ст. | φ,<br>% | v,<br>м/с | N <sub>эксп</sub> ,<br>Вт | №  | T, °C | P <sub>атм</sub> ,<br>мм рт.ст. | φ,<br>% | v,<br>м/с | N <sub>эксп</sub> ,<br>Вт |
|----|-------|---------------------------------|---------|-----------|---------------------------|----|-------|---------------------------------|---------|-----------|---------------------------|
| 1  | 2     | 3                               | 4       | 5         | 6                         | 1  | 2     | 3                               | 4       | 5         | 6                         |
| 1  | 13,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,548                     | 61 | 19,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,527                     |
| 2  | 13,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,534                     | 62 | 19,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 3  | 13,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,527                     | 63 | 19,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 4  | 13,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,555                     | 64 | 19,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,478                     |
| 5  | 13,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,521                     | 65 | 19,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,471                     |
| 6  | 13,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,581                     | 66 | 19,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,478                     |
| 7  | 13,7  | 752                             | 38      | 9         | 2,535                     | 67 | 19,7  | 752                             | 38      | 9         | 2,506                     |
| 8  | 13,8  | 752                             | 38      | 9         | 2,564                     | 68 | 19,8  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 9  | 13,9  | 752                             | 38      | 9         | 2,527                     | 69 | 19,9  | 752                             | 38      | 9         | 2,485                     |
| 10 | 14    | 752                             | 38      | 9         | 2,532                     | 70 | 20    | 752                             | 38      | 9         | 2,467                     |
| 11 | 14,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,584                     | 71 | 20,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 12 | 14,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,536                     | 72 | 20,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,475                     |
| 13 | 14,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,576                     | 73 | 20,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 14 | 14,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,527                     | 74 | 20,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 15 | 14,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,513                     | 75 | 20,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,460                     |
| 16 | 14,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,513                     | 76 | 20,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,478                     |
| 17 | 14,7  | 752                             | 38      | 9         | 2,519                     | 77 | 20,7  | 752                             | 38      | 9         | 2,470                     |
| 18 | 14,8  | 752                             | 38      | 9         | 2,514                     | 78 | 20,8  | 752                             | 38      | 9         | 2,508                     |
| 19 | 14,9  | 752                             | 38      | 9         | 2,548                     | 79 | 20,9  | 752                             | 38      | 9         | 2,485                     |
| 20 | 15    | 752                             | 38      | 9         | 2,499                     | 80 | 21    | 752                             | 38      | 9         | 2,506                     |
| 21 | 15,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,534                     | 81 | 21,1  | 752                             | 38      | 9         | 2,455                     |
| 22 | 15,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,511                     | 82 | 21,2  | 752                             | 38      | 9         | 2,506                     |
| 23 | 15,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,498                     | 83 | 21,3  | 752                             | 38      | 9         | 2,455                     |
| 24 | 15,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,527                     | 84 | 21,4  | 752                             | 38      | 9         | 2,485                     |
| 25 | 15,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,506                     | 85 | 21,5  | 752                             | 38      | 9         | 2,462                     |
| 26 | 15,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,478                     | 86 | 21,6  | 752                             | 38      | 9         | 2,478                     |

Продолжение таблицы Г.1

| 1  | 2    | 3   | 4  | 5 | 6     | 1   | 2    | 3   | 4  | 5 | 6     |
|----|------|-----|----|---|-------|-----|------|-----|----|---|-------|
| 27 | 15,7 | 752 | 38 | 9 | 2,499 | 87  | 21,7 | 752 | 38 | 9 | 2,435 |
| 28 | 15,8 | 752 | 38 | 9 | 2,478 | 88  | 21,8 | 752 | 38 | 9 | 2,500 |
| 29 | 15,9 | 752 | 38 | 9 | 2,506 | 89  | 21,9 | 752 | 38 | 9 | 2,455 |
| 30 | 16   | 752 | 38 | 9 | 2,498 | 90  | 22   | 752 | 38 | 9 | 2,485 |
| 31 | 16,1 | 752 | 38 | 9 | 2,548 | 91  | 22,1 | 752 | 38 | 9 | 2,499 |
| 32 | 16,2 | 752 | 38 | 9 | 2,498 | 92  | 22,2 | 752 | 38 | 9 | 2,508 |
| 33 | 16,3 | 752 | 38 | 9 | 2,496 | 93  | 22,3 | 752 | 38 | 9 | 2,457 |
| 34 | 16,4 | 752 | 38 | 9 | 2,527 | 94  | 22,4 | 752 | 38 | 9 | 2,442 |
| 35 | 16,5 | 752 | 38 | 9 | 2,548 | 95  | 22,5 | 752 | 38 | 9 | 2,506 |
| 36 | 16,6 | 752 | 38 | 9 | 2,503 | 96  | 22,6 | 752 | 38 | 9 | 2,485 |
| 37 | 16,7 | 752 | 38 | 9 | 2,501 | 97  | 22,7 | 752 | 38 | 9 | 2,429 |
| 38 | 16,8 | 752 | 38 | 9 | 2,519 | 98  | 22,8 | 752 | 38 | 9 | 2,434 |
| 39 | 16,9 | 752 | 38 | 9 | 2,503 | 99  | 22,9 | 752 | 38 | 9 | 2,444 |
| 40 | 17   | 752 | 38 | 9 | 2,506 | 100 | 23   | 752 | 38 | 9 | 2,447 |
| 41 | 17,1 | 752 | 38 | 9 | 2,503 | 101 | 23,1 | 752 | 38 | 9 | 2,450 |
| 42 | 17,2 | 752 | 38 | 9 | 2,478 | 102 | 23,2 | 752 | 38 | 9 | 2,485 |
| 43 | 17,3 | 752 | 38 | 9 | 2,506 | 103 | 23,3 | 752 | 38 | 9 | 2,450 |
| 44 | 17,4 | 752 | 38 | 9 | 2,555 | 104 | 23,4 | 752 | 38 | 9 | 2,417 |
| 45 | 17,5 | 752 | 38 | 9 | 2,555 | 105 | 23,5 | 752 | 38 | 9 | 2,479 |
| 46 | 17,6 | 752 | 38 | 9 | 2,555 | 106 | 23,6 | 752 | 38 | 9 | 2,478 |
| 47 | 17,7 | 752 | 38 | 9 | 2,478 | 107 | 23,7 | 752 | 38 | 9 | 2,430 |
| 48 | 17,8 | 752 | 38 | 9 | 2,548 | 108 | 23,8 | 752 | 38 | 9 | 2,450 |
| 49 | 17,9 | 752 | 38 | 9 | 2,498 | 109 | 23,9 | 752 | 38 | 9 | 2,450 |
| 50 | 18   | 752 | 38 | 9 | 2,506 | 110 | 24   | 752 | 38 | 9 | 2,458 |
| 51 | 18,1 | 752 | 38 | 9 | 2,499 | 111 | 24,1 | 752 | 38 | 9 | 2,457 |
| 52 | 18,2 | 752 | 38 | 9 | 2,463 | 112 | 24,2 | 752 | 38 | 9 | 2,485 |
| 53 | 18,3 | 752 | 38 | 9 | 2,527 | 113 | 24,3 | 752 | 38 | 9 | 2,442 |
| 54 | 18,4 | 752 | 38 | 9 | 2,506 | 114 | 24,4 | 752 | 38 | 9 | 2,506 |
| 55 | 18,5 | 752 | 38 | 9 | 2,490 | 115 | 24,5 | 752 | 38 | 9 | 2,458 |
| 56 | 18,6 | 752 | 38 | 9 | 2,527 | 116 | 24,6 | 752 | 38 | 9 | 2,478 |
| 57 | 18,7 | 752 | 38 | 9 | 2,548 | 117 | 24,7 | 752 | 38 | 9 | 2,479 |
| 58 | 18,8 | 752 | 38 | 9 | 2,534 | 118 | 24,8 | 752 | 38 | 9 | 2,478 |
| 59 | 18,9 | 752 | 38 | 9 | 2,483 | 119 | 24,9 | 752 | 38 | 9 | 2,402 |
| 60 | 19   | 752 | 38 | 9 | 2,520 | 120 | 25   | 752 | 38 | 9 | 2,429 |

Таблица Г.2 – Результаты экспериментального исследования зависимости мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, от относительной влажности воздуха

| №  | φ,<br>% | T, °C | P <sub>атм</sub> ,<br>мм рт.ст. | v, м/с | N <sub>эксп</sub> ,<br>Вт | №  | φ,<br>% | T, °C | P <sub>атм</sub> ,<br>мм рт.ст. | v, м/с | N <sub>эксп</sub> ,<br>Вт |
|----|---------|-------|---------------------------------|--------|---------------------------|----|---------|-------|---------------------------------|--------|---------------------------|
| 1  | 2       | 3     | 4                               | 5      | 6                         | 1  | 2       | 3     | 4                               | 5      | 6                         |
| 1  | 28      | 19    | 752                             | 9      | 2,485                     | 12 | 39      | 19    | 752                             | 9      | 2,520                     |
| 2  | 29      | 19    | 752                             | 9      | 2,478                     | 13 | 40      | 19    | 752                             | 9      | 2,450                     |
| 3  | 30      | 19    | 752                             | 9      | 2,468                     | 14 | 41      | 19    | 752                             | 9      | 2,488                     |
| 4  | 31      | 19    | 752                             | 9      | 2,490                     | 15 | 42      | 19    | 752                             | 9      | 2,470                     |
| 5  | 32      | 19    | 752                             | 9      | 2,506                     | 16 | 43      | 19    | 752                             | 9      | 2,496                     |
| 6  | 33      | 19    | 752                             | 9      | 2,529                     | 17 | 44      | 19    | 752                             | 9      | 2,520                     |
| 7  | 34      | 19    | 752                             | 9      | 2,483                     | 18 | 45      | 19    | 752                             | 9      | 2,527                     |
| 8  | 35      | 19    | 752                             | 9      | 2,534                     | 19 | 46      | 19    | 752                             | 9      | 2,491                     |
| 9  | 36      | 19    | 752                             | 9      | 2,506                     | 20 | 47      | 19    | 752                             | 9      | 2,471                     |
| 10 | 37      | 19    | 752                             | 9      | 2,485                     | 21 | 48      | 19    | 752                             | 9      | 2,519                     |
| 11 | 38      | 19    | 752                             | 9      | 2,520                     |    |         |       |                                 |        |                           |

Таблица Г.3 – Результаты экспериментального исследования зависимости мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, от атмосферного давления

[illegible]

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Результаты расчетов мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой,  
в зависимости от изменений расширенной группы метеорологических параметров

Таблица Д.1 – Результаты расчетов мощности, вырабатываемой  
экспериментальной установкой, при изменении температуры воздуха

| №  | T, °C | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт | №  | T, °C | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт |
|----|-------|----------------------|-----------------------|----|-------|----------------------|-----------------------|
| 1  | 2     | 3                    | 4                     | 1  | 2     | 3                    | 4                     |
| 1  | 13,1  | 2,616                | 2,557                 | 61 | 19,1  | 2,616                | 2,502                 |
| 2  | 13,2  | 2,616                | 2,556                 | 62 | 19,2  | 2,616                | 2,501                 |
| 3  | 13,3  | 2,616                | 2,555                 | 63 | 19,3  | 2,616                | 2,500                 |
| 4  | 13,4  | 2,616                | 2,554                 | 64 | 19,4  | 2,616                | 2,499                 |
| 5  | 13,5  | 2,616                | 2,554                 | 65 | 19,5  | 2,616                | 2,499                 |
| 6  | 13,6  | 2,616                | 2,553                 | 66 | 19,6  | 2,616                | 2,498                 |
| 7  | 13,7  | 2,616                | 2,552                 | 67 | 19,7  | 2,616                | 2,497                 |
| 8  | 13,8  | 2,616                | 2,551                 | 68 | 19,8  | 2,616                | 2,496                 |
| 9  | 13,9  | 2,616                | 2,550                 | 69 | 19,9  | 2,616                | 2,495                 |
| 10 | 14    | 2,616                | 2,549                 | 70 | 20    | 2,616                | 2,494                 |
| 11 | 14,1  | 2,616                | 2,548                 | 71 | 20,1  | 2,616                | 2,493                 |
| 12 | 14,2  | 2,616                | 2,547                 | 72 | 20,2  | 2,616                | 2,492                 |
| 13 | 14,3  | 2,616                | 2,546                 | 73 | 20,3  | 2,616                | 2,491                 |
| 14 | 14,4  | 2,616                | 2,545                 | 74 | 20,4  | 2,616                | 2,490                 |
| 15 | 14,5  | 2,616                | 2,544                 | 75 | 20,5  | 2,616                | 2,490                 |
| 16 | 14,6  | 2,616                | 2,543                 | 76 | 20,6  | 2,616                | 2,489                 |
| 17 | 14,7  | 2,616                | 2,542                 | 77 | 20,7  | 2,616                | 2,488                 |
| 18 | 14,8  | 2,616                | 2,541                 | 78 | 20,8  | 2,616                | 2,487                 |
| 19 | 14,9  | 2,616                | 2,541                 | 79 | 20,9  | 2,616                | 2,486                 |
| 20 | 15    | 2,616                | 2,540                 | 80 | 21    | 2,616                | 2,485                 |
| 21 | 15,1  | 2,616                | 2,539                 | 81 | 21,1  | 2,616                | 2,484                 |
| 22 | 15,2  | 2,616                | 2,538                 | 82 | 21,2  | 2,616                | 2,483                 |
| 23 | 15,3  | 2,616                | 2,537                 | 83 | 21,3  | 2,616                | 2,482                 |
| 24 | 15,4  | 2,616                | 2,536                 | 84 | 21,4  | 2,616                | 2,481                 |
| 25 | 15,5  | 2,616                | 2,535                 | 85 | 21,5  | 2,616                | 2,481                 |
| 26 | 15,6  | 2,616                | 2,534                 | 86 | 21,6  | 2,616                | 2,480                 |

Продолжение таблицы Д.1

| 1  | 2    | 3     | 4     | 1   | 2    | 3     | 4     |
|----|------|-------|-------|-----|------|-------|-------|
| 27 | 15,7 | 2,616 | 2,533 | 87  | 21,7 | 2,616 | 2,479 |
| 28 | 15,8 | 2,616 | 2,532 | 88  | 21,8 | 2,616 | 2,478 |
| 29 | 15,9 | 2,616 | 2,531 | 89  | 21,9 | 2,616 | 2,477 |
| 30 | 16   | 2,616 | 2,530 | 90  | 22   | 2,616 | 2,476 |
| 31 | 16,1 | 2,616 | 2,530 | 91  | 22,1 | 2,616 | 2,475 |
| 32 | 16,2 | 2,616 | 2,529 | 92  | 22,2 | 2,616 | 2,474 |
| 33 | 16,3 | 2,616 | 2,528 | 93  | 22,3 | 2,616 | 2,473 |
| 34 | 16,4 | 2,616 | 2,527 | 94  | 22,4 | 2,616 | 2,472 |
| 35 | 16,5 | 2,616 | 2,526 | 95  | 22,5 | 2,616 | 2,472 |
| 36 | 16,6 | 2,616 | 2,525 | 96  | 22,6 | 2,616 | 2,471 |
| 37 | 16,7 | 2,616 | 2,524 | 97  | 22,7 | 2,616 | 2,470 |
| 38 | 16,8 | 2,616 | 2,523 | 98  | 22,8 | 2,616 | 2,469 |
| 39 | 16,9 | 2,616 | 2,522 | 99  | 22,9 | 2,616 | 2,468 |
| 40 | 17   | 2,616 | 2,521 | 100 | 23   | 2,616 | 2,467 |
| 41 | 17,1 | 2,616 | 2,520 | 101 | 23,1 | 2,616 | 2,466 |
| 42 | 17,2 | 2,616 | 2,519 | 102 | 23,2 | 2,616 | 2,465 |
| 43 | 17,3 | 2,616 | 2,519 | 103 | 23,3 | 2,616 | 2,464 |
| 44 | 17,4 | 2,616 | 2,518 | 104 | 23,4 | 2,616 | 2,464 |
| 45 | 17,5 | 2,616 | 2,517 | 105 | 23,5 | 2,616 | 2,463 |
| 46 | 17,6 | 2,616 | 2,516 | 106 | 23,6 | 2,616 | 2,462 |
| 47 | 17,7 | 2,616 | 2,515 | 107 | 23,7 | 2,616 | 2,461 |
| 48 | 17,8 | 2,616 | 2,514 | 108 | 23,8 | 2,616 | 2,460 |
| 49 | 17,9 | 2,616 | 2,513 | 109 | 23,9 | 2,616 | 2,459 |
| 50 | 18   | 2,616 | 2,512 | 110 | 24   | 2,616 | 2,458 |
| 51 | 18,1 | 2,616 | 2,511 | 111 | 24,1 | 2,616 | 2,457 |
| 52 | 18,2 | 2,616 | 2,510 | 112 | 24,2 | 2,616 | 2,456 |
| 53 | 18,3 | 2,616 | 2,509 | 113 | 24,3 | 2,616 | 2,456 |
| 54 | 18,4 | 2,616 | 2,509 | 114 | 24,4 | 2,616 | 2,455 |
| 55 | 18,5 | 2,616 | 2,508 | 115 | 24,5 | 2,616 | 2,454 |
| 56 | 18,6 | 2,616 | 2,507 | 116 | 24,6 | 2,616 | 2,453 |
| 57 | 18,7 | 2,616 | 2,506 | 117 | 24,7 | 2,616 | 2,452 |
| 58 | 18,8 | 2,616 | 2,505 | 118 | 24,8 | 2,616 | 2,451 |
| 59 | 18,9 | 2,616 | 2,504 | 119 | 24,9 | 2,616 | 2,450 |
| 60 | 19   | 2,616 | 2,503 | 120 | 25   | 2,616 | 2,449 |



Таблица Д.2 – Результаты расчетов мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, при изменении относительной влажности воздуха

| №  | φ, % | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт | №  | φ, % | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт |
|----|------|----------------------|-----------------------|----|------|----------------------|-----------------------|
| 1  | 2    | 3                    | 4                     | 1  | 2    | 3                    | 4                     |
| 1  | 28   | 2,616                | 2,505                 | 12 | 39   | 2,616                | 2,503                 |
| 2  | 29   | 2,616                | 2,505                 | 13 | 40   | 2,616                | 2,503                 |
| 3  | 30   | 2,616                | 2,505                 | 14 | 41   | 2,616                | 2,502                 |
| 4  | 31   | 2,616                | 2,505                 | 15 | 42   | 2,616                | 2,502                 |
| 5  | 32   | 2,616                | 2,504                 | 16 | 43   | 2,616                | 2,502                 |
| 6  | 33   | 2,616                | 2,504                 | 17 | 44   | 2,616                | 2,502                 |
| 7  | 34   | 2,616                | 2,504                 | 18 | 45   | 2,616                | 2,502                 |
| 8  | 35   | 2,616                | 2,504                 | 19 | 46   | 2,616                | 2,501                 |
| 9  | 36   | 2,616                | 2,504                 | 20 | 47   | 2,616                | 2,501                 |
| 10 | 37   | 2,616                | 2,503                 | 21 | 48   | 2,616                | 2,501                 |
| 11 | 38   | 2,616                | 2,503                 |    |      |                      |                       |

Таблица Д.3 – Результаты расчетов мощности, вырабатываемой экспериментальной установкой, при изменении атмосферного давления

| № | P <sub>атм</sub> , мм рт.ст. | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт | №  | P <sub>атм</sub> , мм рт.ст. | N <sub>оп</sub> , Вт | N <sub>дин</sub> , Вт |
|---|------------------------------|----------------------|-----------------------|----|------------------------------|----------------------|-----------------------|
| 1 | 2                            | 3                    | 4                     | 1  | 2                            | 3                    | 4                     |
| 1 | 749                          | 2,616                | 2,493                 | 10 | 758                          | 2,616                | 2,523                 |
| 2 | 750                          | 2,616                | 2,496                 | 11 | 759                          | 2,616                | 2,526                 |
| 3 | 751                          | 2,616                | 2,500                 | 12 | 760                          | 2,616                | 2,530                 |
| 4 | 752                          | 2,616                | 2,503                 | 13 | 761                          | 2,616                | 2,533                 |
| 5 | 753                          | 2,616                | 2,506                 | 14 | 762                          | 2,616                | 2,536                 |
| 6 | 754                          | 2,616                | 2,510                 | 15 | 763                          | 2,616                | 2,540                 |
| 7 | 755                          | 2,616                | 2,513                 | 16 | 764                          | 2,616                | 2,543                 |
| 8 | 756                          | 2,616                | 2,516                 | 17 | 765                          | 2,616                | 2,547                 |
| 9 | 757                          | 2,616                | 2,520                 |    |                              |                      |                       |