

На правах рукописи



КОРНИЛОВА Мария Игоревна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ОБЛАСТИ ВЕТРОПАРКОВ**

**Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)**

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

Ульяновск – 2024

Работа выполнена на кафедре «Тепловая и топливная энергетика» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ульяновский государственный технический университет».

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор
Ковальногов Владислав Николаевич

Официальные оппоненты: **Кондратов Дмитрий Вячеславович**,
доктор физико-математических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю. А.»,
заведующий кафедрой «Информационная
безопасность автоматизированных систем»;

Цынаева Анна Александровна,
кандидат технических наук, доцент,
федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Самарский государственный
технический университет», доцент кафедры
«Теплогазоснабжение и вентиляция»

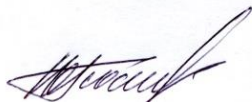
Ведущая организация – федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
образования «Национальный исследовательский
Томский государственный университет»

Защита диссертации состоится «21» ноября 2024 г., в ____ часов, на заседании диссертационного совета 24.2.357.03 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Пензенский государственный университет» по адресу: 440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Пензенский государственный университет» и на сайте: https://dissov.pnzgu.ru/ecspertiza/Tekhnicheskie_nauki/kornilova

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Косников Юрий Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Эффективный сценарий устойчивого развития энергетики напрямую связан с наращиванием производства энергии из возобновляемых источников, в том числе ветра при преобразовании кинетической энергии воздушных масс в атмосфере. Современные тенденции научных исследований в ветроэнергетической отрасли связаны с изучением взаимодействия комплексов ветротурбин в виде ветропарков с атмосферным пограничным слоем (АПС), влияния аэродинамических следов на производство энергии и механические нагрузки элементов ветротурбин.

Для оценки потенциала повышения эффективности отдельных ветротурбин и ветропарков в целом существует необходимость точно моделировать эволюцию взаимодействующего с ветропарком АПС. Недостаточное знание структуры пограничного слоя атмосферы в зоне ветропарков, вопросов турбулентного переноса является в настоящее время одним из препятствий для достижения заявленной цели.

Известный математический аппарат позволяет корректно описывать узкий круг задач. Существующие модели имеют ряд ограничений: предположение об осесимметричном аэродинамическом следе ветротурбин, двухмерная постановка задачи, предположение об изотропности турбулентного течения, кроме этого, известные модели требуют тщательной настройки параметров на основе данных полевых измерений. Применение известных подходов оправдано при выполнении ориентировочных расчетов, например, на этапах проектных работ, однако для высокоточного численного исследования АПС области ветропарков возможны ошибки в расчетах параметров следов ветротурбин, главным образом дефицита скорости и интенсивности турбулентности.

В текущих условиях требуются разработка, программная реализация и применение верифицированной методики, основанной на численном решении трехмерных уравнений аэродинамики, позволяющей исследовать АПС области ветропарка с необходимой достоверностью и полнотой.

Цель работы – увеличение точности и достоверности математического моделирования турбулентности АПС области ветропарка для повышения эффективности его работы.

Для достижения этой цели решаются следующие **задачи**:

1. Выполнить модификацию метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии воздушного потока с сетью ветротурбин, состоящую в применении уточненных значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации для повышения точности прогнозирования производительности ветропарков.

2. Разработать методику численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка, реализованную комплексом алгоритмов для сокращения вычислительных затрат на процесс расчета аэроди-

намики ветропарка и обеспечения требуемой точности и достоверности прогнозирования производительности ветропарка.

3. Разработать алгоритмы численного исследования аэродинамики турбулентных следов комплекса ветротурбин, обеспечивающие взаимодействие модулей программного комплекса.

4. На основе предложенных алгоритмов разработать программный комплекс, провести посредством вычислительного эксперимента исследования обменных процессов АПС области ветропарка и выявить закономерности влияния ветропарков на состояние АПС, а также разработать технические решения для повышения эффективности работы ветропарков различных конфигураций с учетом внешних воздействий.

Объектом исследования являются АПС в зоне одиночной ветротурбины и ветропарка, аэродинамические следы ветротурбин и их взаимодействие.

Предметом исследования являются обменные процессы в АПС при воздействии сети ветротурбин и подстилающей поверхности; методы математического моделирования, описывающие эти процессы.

Методы исследования базируются на основе методов математического моделирования аэродинамических процессов, численных методов решения дифференциальных уравнений, теории подобия и анализа размерностей, теории турбулентности, тепломассообмена и газодинамики пограничного слоя с воздействиями, методов интеллектуального анализа данных и компьютерного моделирования.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Выполнена модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии АПС с сетью ветротурбин, отличающаяся уточнением значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать производительность ветропарков при учете внешних воздействий.

2. Разработана методика численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка, реализованная в виде комплекса алгоритмов и отличающаяся заданием локальных характеристик для описания течения в пограничном слое вблизи твердых стенок (у лопастей и башен ветротурбин, у подстилающей поверхности), предопределенной конфигурацией ветропарка при применении актуаторных моделей и автоматическим заданием густоты сетки в областях ближних аэродинамических следов ветротурбин и в областях вращения ветроколес ветротурбин, что позволяет сократить вычислительные затраты на процесс расчета турбулентного течения АПС области ветропарка, повысить точность и достоверность прогнозирования производительности ветропарка.

3. Разработаны алгоритмы численного моделирования АПС области ветропарка. Отличительной особенностью алгоритмов является моделирование турбулентного переноса и процедуры численного исследования основных

характеристик АПС. Разработанные алгоритмы являются основой взаимодействия программных модулей, позволяют упростить работу с интерфейсом прикладных программ гидродинамического моделирования.

4. С применением разработанного комплекса программ выявлены закономерности влияния ветропарков на состояние АПС в виде профилей дефицита скорости и интенсивности турбулентности при различных конфигурациях ветропарка для учета взаимного влияния аэродинамических следов ветротурбин, что позволяет разработать практические рекомендации по повышению эффективности работы ветропарков при производстве энергии в текущих условиях АПС.

Теоретическая и практическая значимость работы. Модифицированный метод математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии АПС с сетью ветротурбин позволяет учесть влияние внешних воздействий (конфигурация ветротурбин, ветровое воздействие, атмосферная турбулентность, шероховатость подстилающей поверхности), что дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать производительность ветропарков. Разработанные для реализации модифицированного метода методика и алгоритм для численного решения задачи позволяют за счет задания локальных характеристик течения в пограничном слое вблизи твердых стенок, predetermined конфигурации ветропарка при применении актуаторных моделей и автоматического задания густоты сетки в областях ближних аэродинамических следов ветротурбин и областях вращения ветроколес уменьшить требуемые затраты вычислительных ресурсов.

Практическая значимость работы заключается в создании комплекса программ для исследования АПС при его взаимодействии с ветропарком. С применением созданного комплекса программ разработаны и обоснованы технические решения, направленные на повышение эффективности работы ветротурбин в актуальных условиях (патент РФ на полезную модель № 197478, патент РФ на изобретение № 2810860).

Достоверность полученных результатов подтверждена согласованностью полученных результатов с результатами экспериментальных исследований, а также данными, полученными другими авторами, тестированием программного комплекса, результатами анализа сеточной сходимости и обоснованным определением значений сеточных параметров, анализом погрешности вычислений.

Соответствие паспорту научной специальности. Исследование соответствует паспорту специальности 1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ – по следующим пунктам: п. 1 – разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; п. 2 – разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий; п. 3 – реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычисли-

тельного эксперимента; п. 8 – комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Модифицированный метод математического моделирования турбулентного переноса в АПС при взаимодействии воздушного потока с сетью ветротурбин с уточнениями значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации для повышения точности и достоверности прогнозирования производительности ветропарков.

2. Методика численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка, реализованная в виде комплекса алгоритмов с применением уточненной конфигурации ветропарка на основе актуаторных моделей, заданием локальных характеристик для описания течения в пограничном слое вблизи твердых стенок (у лопастей и башен ветротурбин, у подстилающей нижней поверхности) и автоматическим заданием густоты сетки в областях ближних аэродинамических следов ветротурбин и областях вращения ветроколес ветротурбин для сокращения вычислительных затрат на процесс расчета турбулентного течения АПС области ветропарка и обеспечения требуемой точности и достоверности прогнозирования производительности ветропарка.

3. Алгоритмы численного исследования аэродинамики АПС области ветропарка, являющиеся основой взаимодействия программных модулей и позволяющие упростить работу с интерфейсом прикладных программ гидродинамического моделирования.

4. Построенный на основе предложенных алгоритмов программный комплекс для проведения исследований тепловых и турбулентных процессов АПС в окрестности ветротурбин и отработки технических решений для обеспечения эффективной работы ветропарков с учетом внешних воздействий.

5. Результаты комплексных исследований турбулентных процессов в виде закономерностей влияния ветропарков на состояние АПС, таких как профилей дефицита скорости и роста интенсивности турбулентности для учета взаимного влияния аэродинамических следов ветротурбин, что с применением разработанного комплекса программ позволяет повысить эффективность работы ветропарков при производстве энергии.

Реализация результатов работы. Ряд результатов достигнут в рамках реализации проектов, поддержанных Российским научным фондом (номер проекта 22-19-00030), а также грантами Президента РФ для поддержки ведущих научных школ (номер проекта НШ-28.2022.4) и Фонда содействия инновациям (договор № 18041ГУ/2022, договор № 2736ГССС15-L/92982). Разработанный комплекс программ для исследования тепловых и турбулентных процессов АПС в окрестности ветропарка успешно используется в Лаборатории междисциплинарных проблем энергетики Ульяновского государственного технического университета и ООО «Альтрен» (имеются акты о внедрении).

Апробация работы. Основные результаты исследования представлены на XV, XVII Минских международных форумах по тепло- и массообмену (Белоруссия, Минск, 2022, 2024 гг.), на международной научной конференции «Теоретические и прикладные задачи конвективного тепломассопереноса» (Томск, 2022, 2023 гг.), на второй и третьей Всероссийских научно-технических конференциях с международным участием «Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики» (Ульяновск, 2022, 2023 гг.), на международных конференциях по численному анализу и прикладной математике ICNAAM (Греция, 2021–2023 гг.), на международной конференции по численным методам в научных исследованиях ICCMSE (Греция, 2023 г.), на Международной конференции «Тенденции и инновации в менеджменте, инженерии, естественных и гуманитарных науках» ICTIMESH (ОАЭ, 2022, 2023 гг.), на Международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии» (XXII Бенардосовские чтения) (Иваново, 2023 г.), на 10-м Международном симпозиуме по турбулентности, тепломассопереносу (Италия, 2023 г.), на IV, V Байкальских международных научных конференциях-сессиях «Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли» (Иркутск, 2022–2024 гг.), в рамках 24-й Школы-семинара молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А. И. Леонтьева «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Казань, 2023 г.), на Всероссийских конференциях с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (Новосибирск, 2023, 2024 гг.), на Международной конференции по экспериментальной теплопередаче, механике жидкости и термодинамике (Греция, 2024 г.), на Всероссийской научной конференции с международным участием «Возобновляемые источники энергии» (Москва, 2018 г.), на международных молодежных научных конференциях «Гражданская авиация: XXI век» (Ульяновск, 2018, 2020, 2023, 2024 гг.), на X Международной научно-практической конференции молодых ученых «Прикладная математика и информатика: современные исследования в области естественных и технических наук» (Тольятти, 2024 г.), на ежегодных научно-технических конференциях Ульяновского государственного технического университета и научно-технических семинарах кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ (Ульяновск, 2018–2024 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 36 работ, в том числе 10 статей в ведущих рецензируемых изданиях (из них пять в зарубежных журналах, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus, и пять статей в ведущих российских журналах из Перечня ВАК при Минобрнауки России), патент на полезную модель, патент на изобретение и два свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора. Все работы по теме диссертации осуществлены автором лично или при его основном участии: постановка задачи, выбор и разработка метода решения, разработка программного комплекса, проведение расчетов, обработка и обобщение полученных результатов, подготовка публикаций, формирование выводов и заключения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы (183 источника) и трех приложений, включает 187 страниц, 77 рисунков, три таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность темы диссертации, приведен обзор литературы по теме исследования, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту, описаны содержание и структура диссертации.

В первой главе проведен анализ научно-технической литературы и патентной информации по исследованиям аэродинамики АПС области ветропарка. Рассматриваются процессы, протекающие в пограничном слое атмосферы в зоне ветропарков, а также особенности аэродинамических следов ветротурбин, вопросы потерь энергии ветра, турбулентности. Подробно анализируются результаты, полученные в аэродинамических трубах при проведении физического моделирования ветропарков. Рассмотрены модели расчета турбулентного переноса, использующие RANS- и LES-методы, а также их известные модификации для описания АПС в области ветропарка. Рассмотрены различные способы параметризации ветротурбин, в том числе с применением актуаторных моделей.

По результатам анализа научно-технической и патентной информации по теме диссертации сформулированы следующие выводы:

1. Исследованию АПС области ветропарка посвящено множество работ. F. Porte-Agel, D. Mehta, M. J. Churchfield, S. T. Frandsen, П. П. Безруких, В. Л. Окулов, С. В. Стрижак, В. С. Кривцов внесли значительный вклад в развитие данной темы. В их работах подробно рассмотрены методы математического моделирования для описания процессов, протекающих в атмосферном пограничном слое при воздействии ветропарков. В основном работы направлены на исследование турбулентных следов за ветротурбинами для решения задач поиска оптимального расположения ветротурбин. Для ветропарков свойственна высокая турбулентность, обусловленная сложным взаимодействием потока с сетью ветротурбин и подстилающей поверхностью. Комплексное исследование турбулентных течений в АПС области ветропарка позволяет исследовать динамику ветротурбин, вопросы влияния устойчивости атмосферы и шероховатости поверхности на аэродинамику ветропарков.

2. Полномасштабные исследования АПС области ветропарка затруднительны ввиду необходимости использования дорогостоящих средств управления и диагностики, поэтому уместно применять методы математического моделирования и численного анализа в специализированных программных пакетах (например, Star-CCM+, Ansys Fluent, OpenFoam и др.). Однако математическое моделирование турбулентного режима течения в окрестности ветропарка сопряжено с трудностями и противоречиями. По причинам экономики вычислительных ресурсов многие авторы применяют актуаторный

подход для параметризации объемных сил ветротурбин, однако его применение оправдано в задачах, где не требуется подробный анализ взаимодействия лопастей с воздушным потоком. При моделировании ближнего следа, анализе отрывных течений, а также в задачах прогноза выходной мощности ветротурбин актуаторный подход приводит к большим погрешностям.

3. Для поиска возможностей повышения эффективности ветропарков при производстве энергии необходимо выявить закономерности взаимовлияния ветропарка и АПС в части учета внешних воздействующих факторов (атмосферной турбулентности, шероховатости подстилающей поверхности и ветровой нагрузки) на развитие аэродинамических турбулентных следов ветротурбин, что позволит применить выявленные закономерности в новых технических решениях.

По результатам анализа научно-технической информации сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования.

Во второй главе представлена модификация метода математического моделирования турбулентного переноса в АПС области ветропарка, обеспечивающая возможность прогнозирования в вычислительном эксперименте количественных характеристик, главным образом интенсивности турбулентности и дефицита скорости воздушного потока.

Система уравнений, отражающая процессы в АПС в окрестности ветротурбин, представляется в виде:

– дифференциальное уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3 ; x_i – координаты x, y, z , м; u_i – компоненты осредненной скорости ветра u, v, w , м/с; τ – время, с;

– дифференциальное уравнение движения:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial \tau} + u_i \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} + u_j \frac{\partial (\rho u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + f_i, \quad (2)$$

где p – давление, Па; μ – динамическая вязкость среды, $\text{Па} \cdot \text{с}$; μ_t – коэффициент турбулентного переноса количества движения, $\text{Па} \cdot \text{с}$; f_i – дополнительный член, описывающий влияние ветротурбин на АПС в рамках актуаторного представления ветротурбин, $\text{кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}^2)$;

– дифференциальное уравнение энергии:

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda + c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (3)$$

где h – энтальпия, кДж/кг ; λ – коэффициент теплопроводности, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot \text{К})$; c_p – удельная изобарная теплоемкость, $\text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$; Pr_t – турбулентное число Прандтля; T – температура воздуха, К;

– уравнение состояния:

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (4)$$

где R – газовая постоянная, кДж/(кг·К).

По результатам предварительных тестовых расчетов для разрешения турбулентности решено использовать $k - \varepsilon$ модель.

Турбулентная вязкость задается следующим образом:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (5)$$

где C_μ – безразмерная константа; k – кинетическая энергия турбулентности, $\text{м}^2 / \text{с}^2$; ε – вязкая диссипация энергии турбулентности, $\text{м}^2 / \text{с}^3$.

Уравнение для кинетической энергии имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left((\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} + G_b - \rho \varepsilon + f_{ik}, \quad (6)$$

где E_{ij} – компонента скорости деформации, $1 / \text{с}^2$; G_b – генерация турбулентности, обусловленная температурной стратификацией, $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^3)$; f_{ik} – источниковый член, описывающий влияние ветротурбин на генерацию кинетической энергии, $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^3)$.

Величина диссипации рассчитывается из следующего транспортного уравнения:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (2C_{\varepsilon 1} \mu_t E_{ij} E_{ij} + C_{\varepsilon 3} G_b) - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + f_{i\varepsilon}, \quad (7)$$

где $f_{i\varepsilon}$ – источниковый член, описывающий влияние ветротурбин на диссипацию турбулентной кинетической энергии в потоке, $\text{кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^4)$.

Константы, используемые в стандартной $k - \varepsilon$ -модели турбулентности, имеют значения: $C_\mu = 0,09$; $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$.

Константа $C_{\varepsilon 3}$ зависит от Архимедовой силы, определяется по следующему выражению:

$$C_{\varepsilon 3} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|, \quad (8)$$

где u, v – компоненты вектора скорости ветрового потока (перпендикулярный и параллельный вектору силы тяжести соответственно), м/с.

Выполнена модификация метода математического моделирования за счет уточнений значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации источниковыми членами f_{ik} и $f_{i\varepsilon}$ соответственно.

Источниковый член f_{ik} в уравнении (6) предложено вычислять следующим образом:

$$f_{ik} = a\rho\zeta(C_d e_D + C_L e_L) \left[\alpha_k \left(\frac{4}{3} k \bar{u}_i + \left(\frac{2}{3} k \right)^{3/2} \right) - \alpha'_k \bar{u}_i k \zeta \right], \quad (9)$$

где α_k – коэффициент, отражающий величину кинетической энергии потока, которая преобразовалась в турбулентную кинетическую энергию из-за действия ветротурбин; α'_k – коэффициент, отражающий долю диссипации турбулентной кинетической энергии из-за каскадного переноса энергии в аэродинамическом следе ветротурбин; ζ – коэффициент заполнения ветропарка, определяется расположением и количеством ветротурбин; a – плотность ветротурбин на территории ветропарка, $\text{м}^2 / \text{м}^3$; ζ – коэффициент сглаживания для перераспределения действия силы в пространстве; C_L – коэффициент подъемной силы лопасти; C_D – коэффициент сопротивления лопасти; e_D, e_L – единичные векторы вдоль соответствующих сил.

Источниковый член $f_{i\varepsilon}$ в уравнении (7) предложено вычислять следующим образом:

$$f_{i\varepsilon} = \beta_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} f_{ik} = \beta_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} a\rho\zeta(C_d e_D + C_L e_L) \left[\alpha_k \left(\frac{4}{3} k \bar{u}_i + \left(\frac{2}{3} k \right)^{3/2} \right) - \alpha'_k \bar{u}_i k \zeta \right], \quad (10)$$

где β_ε – эмпирический коэффициент.

Выражения для определения источниковых членов f_{ik} и $f_{i\varepsilon}$ были получены на основе анализа дифференциальных уравнений Рейнольдса, теории анализа размерностей и идентификации влияющих факторов.

Значения коэффициентов α_k , α'_k , β_ε определялись с использованием алгоритмов машинного обучения и серии вычислительных экспериментов для наилучшего приближения к результатам измерений и обеспечения сходимости расчета. Константы, используемые в предложенной модификации метода, имеют следующие значения: $\alpha_k = 1,1$; $\alpha'_k = 0,5$; $\beta_\varepsilon = 1,2$.

Действие сил молекулярной вязкости μ значительно в пристеночных областях – на подстилающей нижней поверхности, у башен и на лопастях ветротурбин. В этих областях наблюдаются наибольшие градиенты профилей скорости и турбулентных характеристик k и ε . Для описания пристеночной области требовалось значительное количество узлов при численном решении. По этой причине предложено использовать уточненный метод пристеночных функций. Исходя из особенности задачи, при задании граничных условий для расчета на поверхностях значения числа Кармана Re уточняли, что позволило учесть вращение ветроколеса и влияние шероховатости на течение воздушного потока в пограничном слое.

В итоге предложена модификация метода математического моделирования турбулентного переноса в АПС в окрестности ветротурбин с уточнением значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, позволяющая учитывать воздействие ветротурбин на обменные процессы в АПС, а также с уточнением значений пристеночных функций на поверхностях, что дает возможность с повышенной точностью прогнозировать аэродинамику потока и достоверно оценивать производительность ветропарков. Модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии воздушного потока с сетью ветротурбин позволила повысить точность на 7 % (по сравнению с классическим методом моделирования на основе $k - \varepsilon$ модели турбулентности).

Структурная схема этапов предложенного модифицированного метода математического моделирования турбулентного переноса в АПС в окрестности ветротурбин представлена на рисунке 1 (модификации метода отмечены синим цветом).

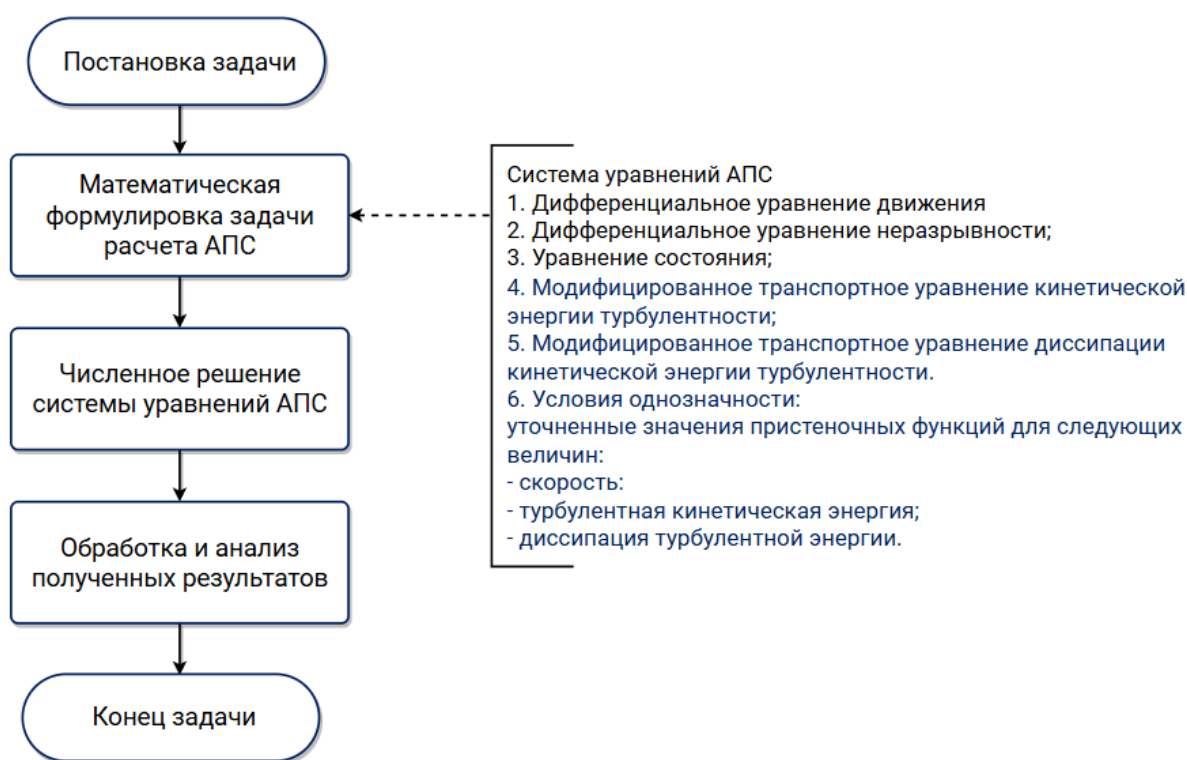


Рисунок 1 – Этапы модифицированного метода математического моделирования турбулентного переноса в АПС области ветропарка

В третьей главе представлены методика численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности и алгоритмы моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка.

Для моделирования аэродинамики ветропарков требуется обеспечить решение системы дифференциальных уравнений турбулентного течения, учитывая влияние ветротурбин.

Методика включает следующие этапы: построение вычислительной расчетной сетки, для аппроксимации задачи с использованием метода конечных объемов вводится неструктурированная сетка с многогранными ячейками; аппроксимация уравнений переноса турбулентности, полученная система уравнений позволяет определить μ_t , k , ε , f_{ik} , f_{ie} ; решение системы алгебраических уравнений с использованием процедуры SIMPLE. Методика отличается применением предопределенной конфигурации ветропарка, уточненных локальных характеристик пристеночных функций и автоматическим заданием густоты расчетной сетки. Методика реализована в виде комплекса алгоритмов.

Определение конфигурации ветропарка выполняется при проведении серии расчетов с использованием актуаторного представления ветротурбин, что существенно сокращает вычислительные затраты, так как нет необходимости рассчитывать пограничный слой на поверхности лопастей. Полученное решение – определение конфигурации ветропарка с наименьшим количеством зон провалов скорости и пиков турбулентности, зон интерференции аэродинамических следов. Полученное решение применяется при задании условий однозначности итогового расчета АПС области ветропарка с САД-моделями ветротурбин, импортированных из системы трехмерного проектирования. Разработанный алгоритм для определения конфигурации ветропарка с использованием актуаторного представления ветротурбин представлен на рисунке 2.

Уточнение локальных характеристик пристеночных функций в областях лопастей ветротурбин, а также в области приземной поверхности выполнено для следующих величин: скорость, кинетическая энергия турбулентности, диссипация энергии турбулентности путем адаптации значений Кармана α к задаче расчета АПС области ветропарка. Уточнение локальных характеристик пристеночных функций выполняется на этапе задания условий однозначности.

Автоматическое задание густоты расчетной сетки выполнено для обеспечения сеточной сходимости численных расчетов. Выбор сетки обусловлен результатами анализа метрик качества сетки (метрика правильности грани, метрика качества сетки, углы асимметрии ячейки и границы). Наилучшие результаты демонстрировала сетка с многогранными ячейками. Для генерации сетки задается базовый размер расчетной ячейки. Задание разрешения сетки выполняется в следующих областях: область вращения, область ближнего следа, область у подстилающей поверхности путем последовательного измельчения сетки относительно базового размера до достижения требуемой условиями задачи точности. На рисунке 3 представлен разработанный алгоритм автоматического задания густоты расчетной сетки.

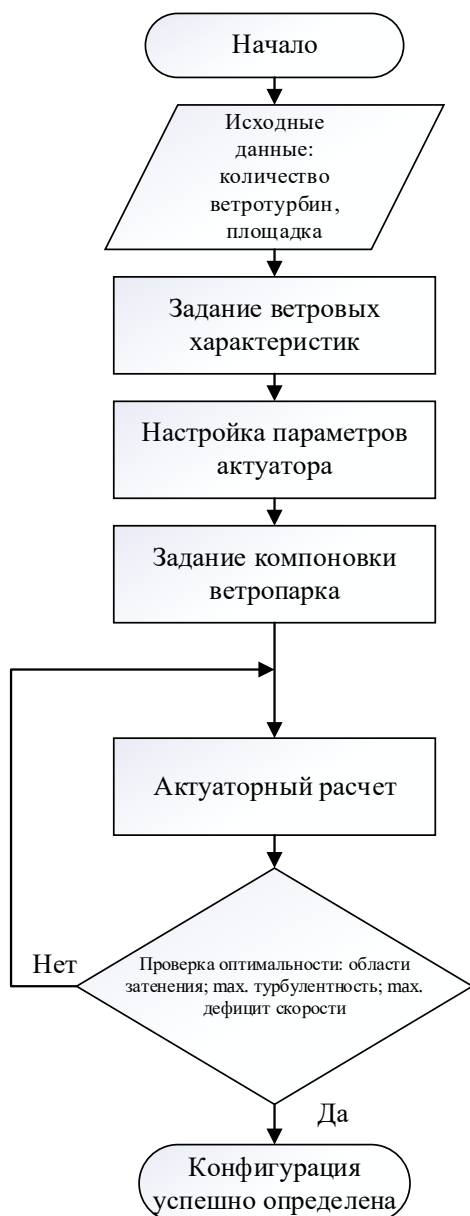


Рисунок 2 – Алгоритм задания условий ветропарка



Рисунок 3 – Алгоритм построения расчетной сетки

В итоге предложена методика для численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка, реализованная в виде комплекса алгоритмов с применением уточненной конфигурации ветропарка, заданием локальных характеристик пристеночной функции для описания течения в пограничном слое вблизи твердых стенок (у лопастей и башен ветротурбин, у подстилающей нижней поверхности) и автоматическим заданием густоты сетки в областях ближних аэродинамических следов ветротурбин и областях вращения ветроколес ветротурбин, что позволило сократить вычислительные затраты на процесс расчета турбулентного течения в АПС области ветропарка до 60 % и обеспечить требуемую точность и достоверность прогнозирования производительности ветропарка.

В четвертой главе представлен разработанный комплекс программ для исследования обменных процессов в АПС, включающий методику моделирования турбулентного переноса, алгоритм и процедуры численного исследования характеристик АПС и позволяющий моделировать АПС области ветропарка (свидетельство № 2022665200). Основу комплекса составляет интегрированный в CFD-систему Simsenter Star-CCM+ пакет программ для автоматизированной подготовки данных цифрового двойника ветропарка. Программа содержит цифровые двойники ветротурбин в виде актуаторных моделей, модели и алгоритмы преобразования исходных данных и обеспечивает настройку цифрового двойника ветропарка для текущих условий АПС.

Выполнено моделирование нейтрального АПС в окрестности одиночной ветротурбины. На рисунке 4 показано вертикальное продольное сечение расчетной области в виде скалярной сцены с цветовой индикацией полей скорости.

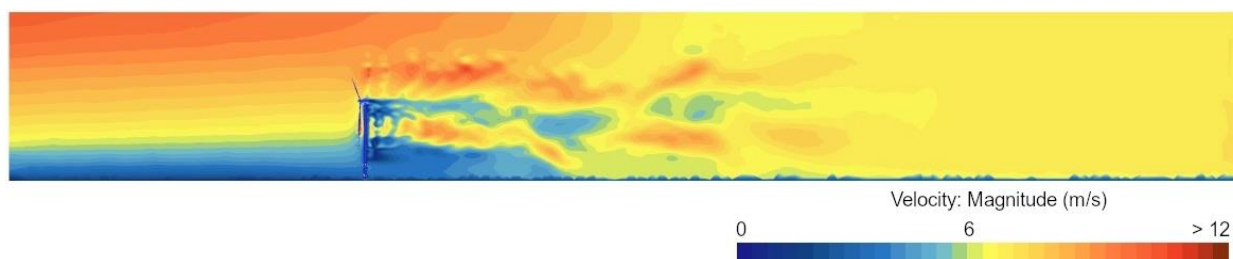


Рисунок 4 – Вертикальное продольное сечение в центральной плоскости с нанесенным полем скоростей

Верификация численных экспериментов производилась сопоставлением получаемых результатов с известными экспериментальными данными. Отклонения от данных экспериментальных исследований не превысили 5 %.

Ближний след характеризуется высокой турбулентностью и наибольшим изменением градиента скорости. Дальний след имеет менее выраженные турбулентные вихри. Восстановление скорости происходит на значительном удалении от ветротурбины, даже на 500 м за турбиной еще остается возмущение потока, которое может влиять на работу ветротурбины, стоящей следом. На рисунке 4 отчетливо видны вихревые области, образующиеся за ветротурбиной, которые распадаются на удалении восьми диаметров за ветроколесом. На общем фоне восстановления потока можно отметить расширение следа вниз по течению.

С использованием разработанного комплекса программ выполнено моделирование нейтрального АПС области модельного ветропарка, включающего семь ветротурбин. Шахматное размещение выбрано по предварительному расчету с актуаторным представлением ветротурбин. Контуры усредненной по времени скорости потока, завихренности в горизонтальной плоскости $x - y$ на высоте ступицы ветротурбин показаны на рисунке 5.

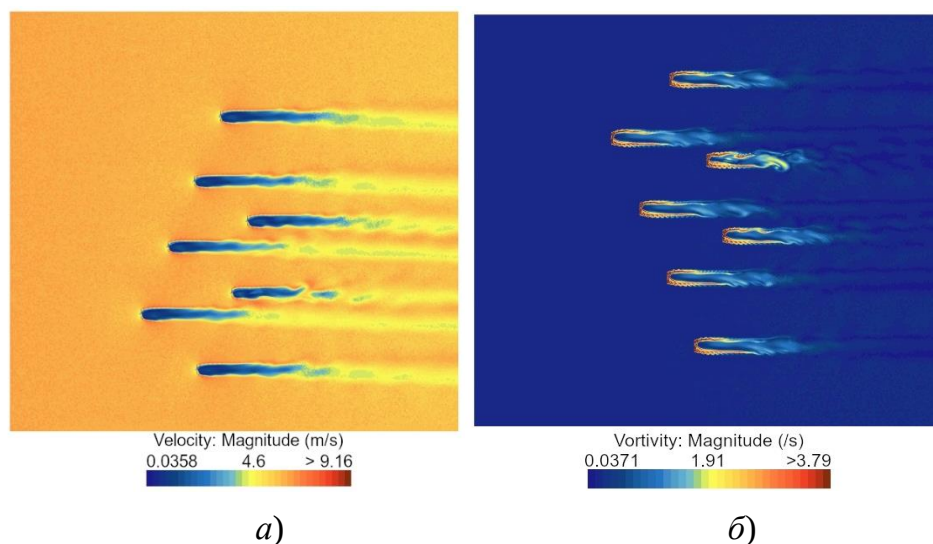


Рисунок 5 – Контуры усредненной по времени скорости (а) и завихренности (б) в горизонтальной плоскости $x - y$ на высоте ступиц ветротурбин при шахматной расстановке ветротурбин

Полученные результаты демонстрируют завихренную структуру следов за ветротурбинами, повышение уровня турбулентности, завихренности и дефицита скорости с постепенным восстановлением по мере удаления от ветротурбин.

С использованием разработанного программного комплекса выполнено моделирование нейтрального АПС области модельного ветропарка, включающего семь ветротурбин при коридорном (выравненном) расположении ветротурбин. Контуры усредненной по времени скорости и завихренности в горизонтальной плоскости $x - y$ на высоте ступицы ветротурбин показаны на рисунке 6.

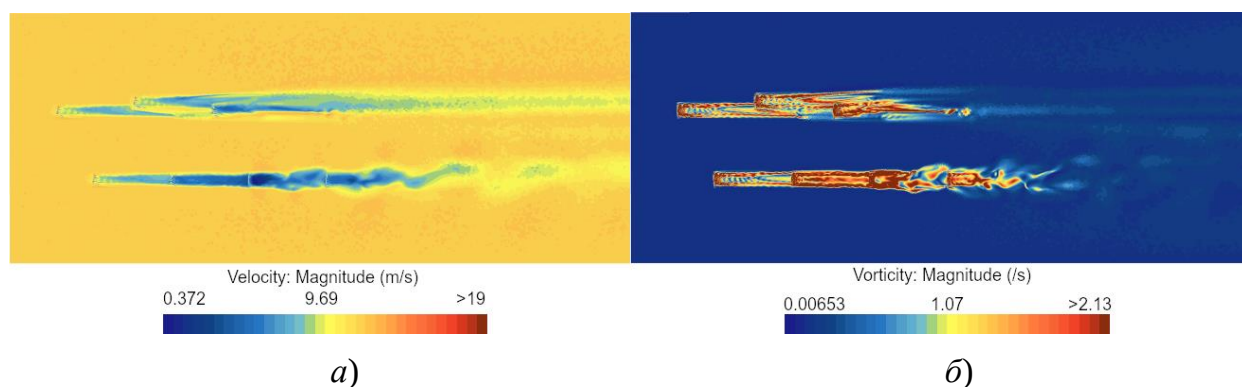


Рисунок 6 – Контуры усредненной по времени скорости (а) и завихренности в горизонтальной плоскости $x - y$ на высоте ступиц ветротурбин при коридорной расстановке ветротурбин

Для количественной оценки влияния внешних факторов (интенсивность атмосферной турбулентности, расположение ветротурбин, шероховатость подстилающей поверхности, ветровое воздействие) на аэродинамику ветро-

парка выполнена серия вычислительных экспериментов, получены профили скорости и интенсивности турбулентности в различных сечениях расчетной области.

На рисунке 7 показаны графики полей скорости после семи ветротурбин, снятые на уровне втулок ветротурбин, при различной шероховатости подстилающей поверхности z , скорости набегающего потока U , интенсивности атмосферной турбулентности I для шахматной конфигурации ветропарка.

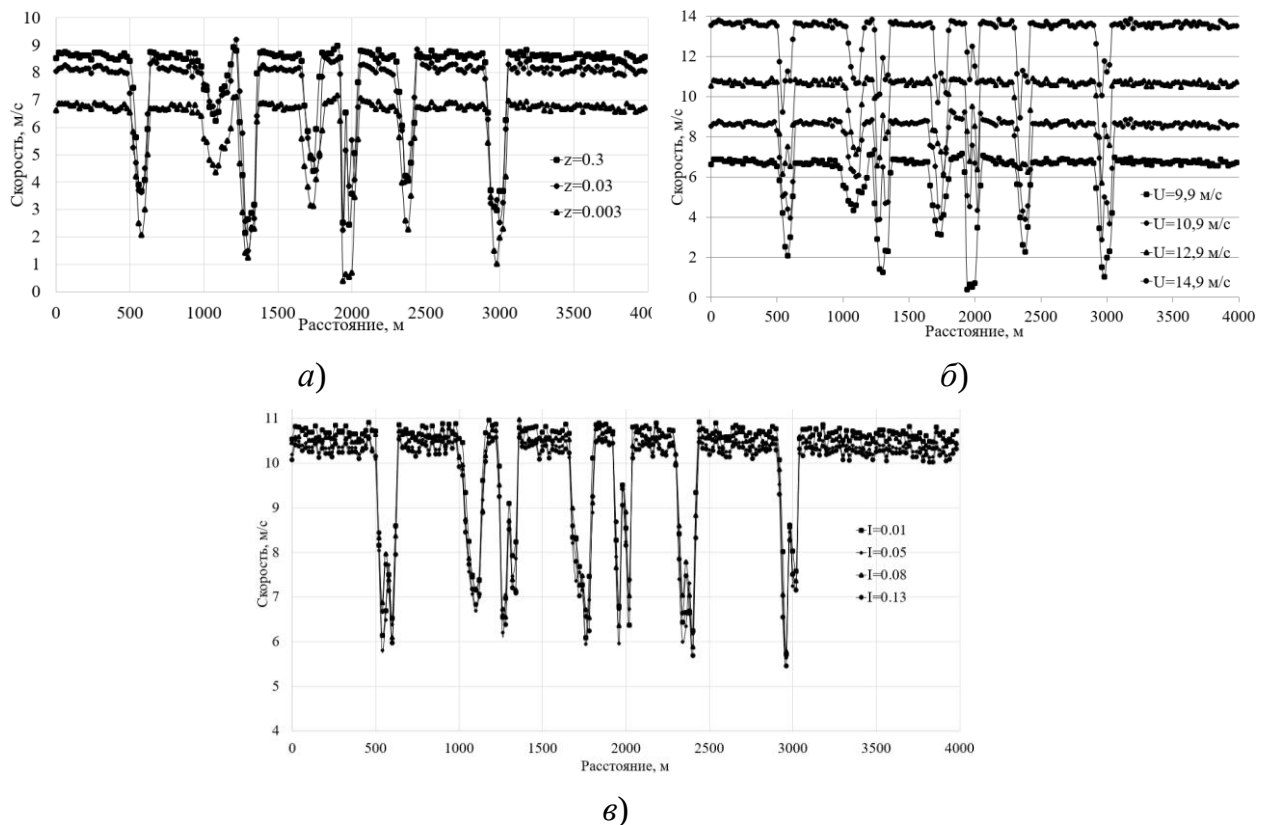


Рисунок 7 – Профили усредненных значений скорости для шахматной конфигурации ветропарка при различной шероховатости подстилающей поверхности (а), при различной скорости набегающего потока (б), при различной интенсивности атмосферной турбулентности (в)

По мере обтекания очередной ветротурбины наблюдается местное падение скорости. Результаты экспериментов демонстрируют неосесимметричное распределение профиля средней скорости и, следовательно, среднего сдвига в следе турбины. Это объясняется неоднородным (степенным) профилем скорости набегающего потока.

На рисунке 8 показаны графики полей скорости различной шероховатости подстилающей поверхности z , скорости набегающего потока U , интенсивности атмосферной турбулентности I для коридорной конфигурации ветропарка. При рассмотрении коридорного типа расположения ветротурбин ветропарка можно выделить две области: с полным наложением следов и частичным. При полном наложении следов наблюдались наибольшие дефициты скорости, чем в случае частичного наложения.

Характер движения воздушных потоков на территории ветропарка нестационарный и турбулентный. На рисунке 9 показаны графики интенсивности турбулентности для шахматной и коридорной конфигураций ветропарка. На рисунке 9 отчетливо видны локальные максимумы турбулентности, повышенные значения турбулентности вызваны обтеканием ротора и башни каждой ветротурбин, а также явлениями сдвига из-за разрушения вершинных вихрей. Турбулентность достигает пика в плоскости после семи турбин, что связано с неустойчивостью, вызванной сдвиговым слоем из-за разрушения концевых вихрей при переходе в дальний след.

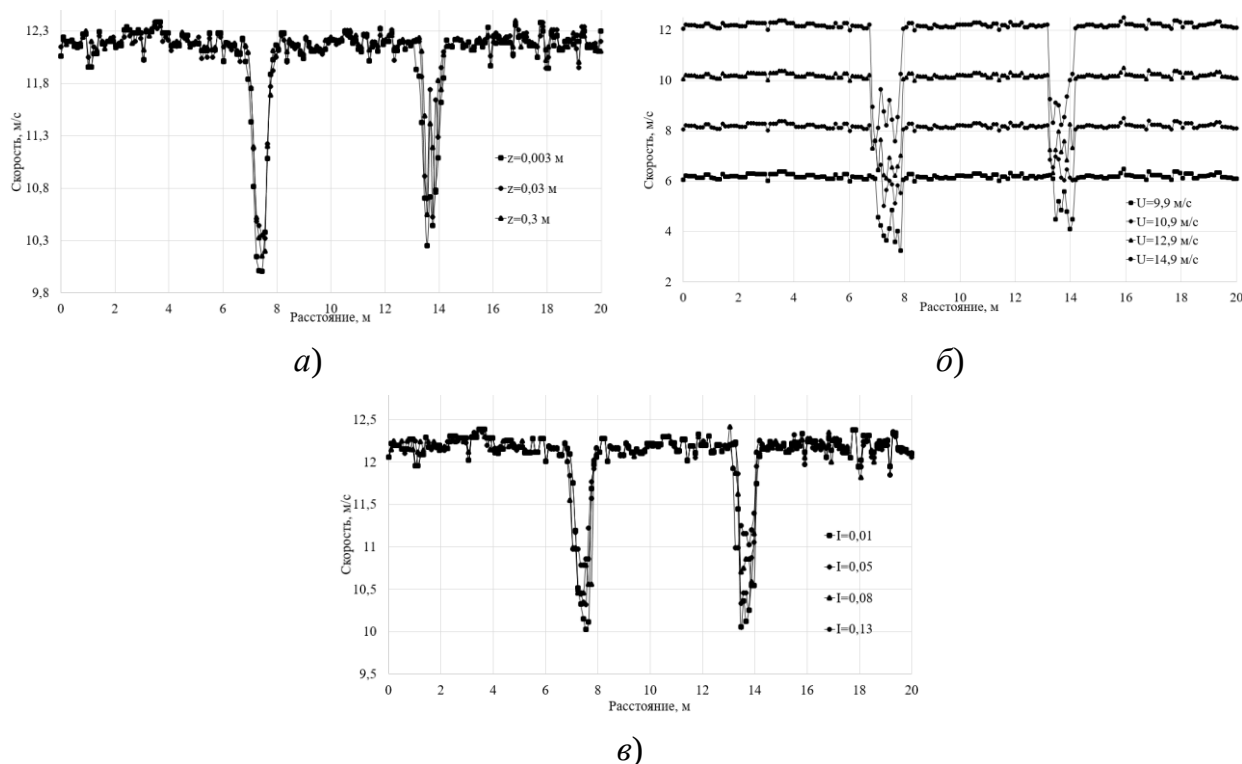


Рисунок 8 – Профили усредненных значений скорости для коридорной конфигурации ветропарка при различной шероховатости подстилающей поверхности (а), при различной скорости набегающего потока (б), при различной интенсивности атмосферной турбулентности (в)

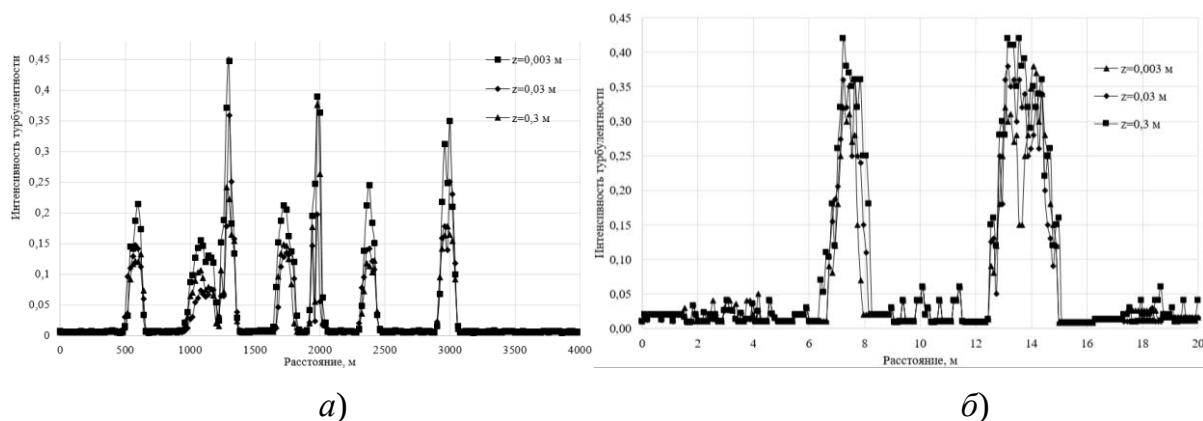


Рисунок 9 – Профили интенсивности турбулентности при шахматной (а) и коридорной (б) конфигурации ветропарка

Как видно из рисунков 8, 9, профили скорости и турбулентности не успели восстановиться на моделируемом расстоянии. Результаты расчетов АПС области ветропарка продемонстрировали, что с использованием предложенной модификации возможно рассчитывать без дополнительной настройки эффекты локальных сдвиговых течений с высокой точностью (погрешность расчетов составила 5 %).

Атмосферная турбулентность, шероховатость подстилающей поверхности и ветровое воздействие воздушного потока оказывают влияние на поле скоростей и рост интенсивности турбулентности как в ближней, так и в дальней областях аэродинамического следа. Выявлено более быстрое восстановление аэродинамических следов ветротурбин при увеличении внешней атмосферной турбулентности (с 0,01 до 0,13) для шахматной конфигурации ветропарка – до 7 % и для коридорной конфигурации ветропарка – до 15 %. Отмечено более быстрое восстановление дальних аэродинамических следов при увеличении шероховатости подстилающей поверхности – до 18 % и при увеличении скорости набегающего потока – до 20 %. При шахматной конфигурации ветропарка попаданий ветротурбин в области высокой турбулентности воздушных масс не наблюдалось.

Выявлены аналитические закономерности, выражающие зависимость дефицита скорости и роста интенсивности турбулентности аэродинамического следа от дальности его распространения при учете атмосферной турбулентности, шероховатости подстилающей поверхности и ветрового воздействия.

$$\frac{\Delta U}{U_{\infty}} = A(x/D)^n, \quad (11)$$

где U_{∞} – скорость невозмущенного потока, м/с; ΔU – дефицит скорости воздушного потока, м/с; x – расстояние за ветротурбиной, кратное диаметру ветроколеса D , м; A, n – коэффициенты, принимающие следующие значения: $0,9 < A < 1,26$; $-1,2 < n < -1,08$ для скорости невозмущенного потока $9,9 < U_{\infty} < 14,9$; $1,1 < A < 1,41$; $-0,98 < n < -0,86$ для шероховатости подстилающей поверхности $0,003 < z_0 < 0,3$; $0,84 < A < 1,05$; $-1,14 < n < -0,62$ для внешней атмосферной турбулентности потока $0,01 < I_{\infty} < 0,13$.

$$\Delta I = \sqrt{I^2 - I_{\infty}^2} = B(x/D)^m, \quad (12)$$

где I_{∞} – внешняя турбулентность потока; ΔI – рост интенсивности турбулентности; x – расстояние за ветротурбиной, кратное диаметру ветроколеса D , м; B, m – коэффициенты, принимающие следующие значения: $0,31 < B < 0,57$; $-1,41 < m < -1,16$ для скорости невозмущенного потока $9,9 < U_{\infty} < 14,9$; $0,45 < B < 0,62$; $-1,08 < m < -0,71$ для шероховатости подстилающей поверхности $0,003 < z_0 < 0,3$; $0,09 < B < 0,14$; $-0,88 < m < -0,45$ для внешней атмосферной турбулентности потока $0,01 < I_{\infty} < 0,13$.

Мощность ветротурбин пропорциональна скорости набегающего потока в третьей степени, следовательно, уточненные по зависимости (11) значения скорости позволят точно рассчитывать производительность ветропарка.

Представлен анализ влияния рассматриваемых в работе параметров на выходную мощность ветротурбин. На рисунке 10 представлены графики нормализованных мощностей ветротурбин при шахматной и коридорной конфигурации ветропарка.

Более быстрое затухание следа при повышенных показателях турбулентности способствует повышению производительности ветропарков, однако одновременно приводит к дисбалансу нагрузок на элементы ветротурбин, главным образом на лопасти. Во избежание неустойчивой работы ветропарков предложено техническое решение (патент РФ на полезную модель № 197478) для адаптации ветротурбин к повышенному турбулентному воздействию в составе ветропарков.

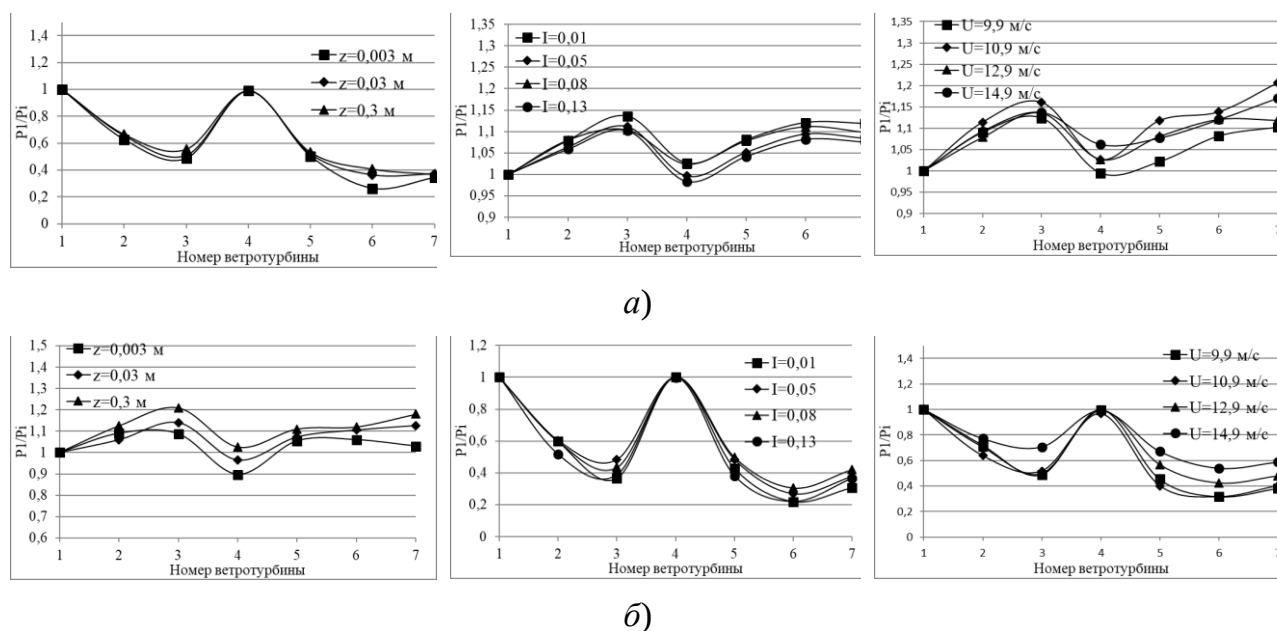


Рисунок 10 – Нормализованные значения мощности ветротурбин:
а) при шахматном расположении; б) при коридорном расположении

Расчеты были выполнены для всех сезонов года при корректном задании начальных данных. Предложено техническое решение, направленное на защиту ветротурбины от обледенения лопасти в холодное время года (патент РФ на изобретение № 2810860).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Предложенная модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии АПС с сетью ветротурбин позволила повысить точность расчета производительности ветропарков на 7 %.

2. Разработанная методика численного решения системы дифференциальных уравнений для моделирования турбулентных течений АПС области ветропарка, реализованная в виде комплекса алгоритмов, позволила сократить вычислительные затраты на процесс расчета турбулентного течения в области ветропарка до 60 %.

3. Разработанные алгоритмы численного исследования аэродинамики АПС области ветропарка позволили спроектировать и протестировать программный комплекс для проведения исследований турбулентных процессов АПС области ветропарка при различных внешних воздействиях.

4. Адекватность разработанной модификации метода математического моделирования и комплекса программ подтверждена сопоставлением тестовых расчетов с результатами натурных экспериментов и результатами авторов, проводивших схожие исследования. Отклонения от данных экспериментальных исследований не превысили 5 %.

5. С применением разработанного комплекса программ выполнена серия экспериментов для комплексных исследований обменных процессов в АПС области ветропарка. Выявлены закономерности по влиянию внешних воздействий (интенсивность атмосферной турбулентности, расположение ветротурбин, шероховатость подстилающей поверхности) на аэродинамику АПС. Выявлено более быстрое восстановление аэродинамических следов ветротурбин при увеличении внешней атмосферной турбулентности (с 0,01 до 0,13) для шахматной конфигурации ветропарка – до 7 % и для коридорной конфигурации ветропарка – до 15 %. Отмечено более быстрое восстановление дальних аэродинамических следов при увеличении шероховатости подстилающей поверхности – до 18 %, и при увеличении скорости набегающего потока – до 20 %.

6. Предложены и запатентованы новые технические решения, применение которых способствует повышению эффективности работы ветропарков и совершенствованию способов управления обменными процессами АПС.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК при Минобрнауки России

1. Корнилова, М. И. Исследование атмосферного пограничного слоя в области ветропарка для повышения эффективности при производстве энергии / М. И. Корнилова, В. Н. Ковальногов, Д. С. Степанов, Т. В. Карпухина, Д. А. Демидов // Автоматизация процессов управления. – 2024. – № 2 (76). – С. 107–116. – doi: 10.35752/1991-2927_2024_2_76_107

2. Корнилова, М. И. Численное исследование атмосферного пограничного слоя и аэродинамических следов в области ветропарка / М. И. Корнилова, В. Н. Ковальногов, Р. В. Федоров, Ю. А. Хахалев // Современные наукоемкие технологии. – 2024. – № 5. – С. 50–56. – doi: 10.17513/snt.40004

3. Корнилова, М. И. Математическое моделирование и численное исследование аэродинамического следа за ветрогенератором / М. И. Корнилова, В. Н. Ковальногов, Ю. А. Хахалев, А. В. Чукалин, Е. В. Цветова // Теплоэнергетика. – 2023. – № 12. – С. 114–125. – doi: 10.56304/S0040363623120068

4. Корнилова, М. И. Вихреразрешающее моделирование турбулентности в атмосферном пограничном слое в зоне ветропарка / Р. В. Федоров, М. И. Корнилова, Л. В. Хахалева, А. В. Чукалин // Автоматизация процессов управления. – 2023. – № 2 (72). – С. 53–62. – doi: 10.35752/1991-2927_2023_2_72_53

5. Корнилова, М. И. Моделирование, исследование и оптимизация рабочих процессов малоэмиссионных газотурбинных двигателей / Р. В. Федоров, М. И. Корнилова, А. В. Чукалин, С. В. Бусыгин // Автоматизация процессов управления. – 2023. – № 1 (71). – С. 100–111. – doi: 10.35752/1991-2927_2023_1_71_100

Публикации в изданиях, входящих в базы данных Web of Science, SCOPUS:

6. Kornilova, M. Application of Intelligent and Digital Technologies to the Tasks of Wind Energy / M. Kornilova, V. Kovalnogov, R. Fedorov, A. Chukalin, T. Karpukhina, A. Petrov // Energies. – 2023. – Vol. 16, № 1. – doi: 10.3390/en16010481

7. Kornilova, M. Modeling and Investigation of the Effect of a Wind Turbine on the Atmospheric Layer / V. Kovalnogov, R. Fedorov, A. Chukalin, E. Tsvetova, M. Kornilova // Energies. – 2022. – Vol. 15, № 21. – doi: 10.3390/en15218196

8. Kornilova, M. Runge-Kutta-Nystron methods of eight order for addressing Linear Inhomogeneous problems / V. Kovalnogov, M. Kornilova, R. Fedorov, T. Karpukhina, T. Simos, C. Tsitouras // Computational and Applied Mathematics. – 2022. – Vol. 419. – doi: 10.1016/j.cam.2022.114778

9. Kornilova, M. New family for Runge-Kutta-Nystrom pairs of orders 6(4) with coefficients trained to address oscillatory problems / V. Kovalnogov, M. Kornilova, Y. Khakhalev, D. Generalov, T. Simos, T. Charalampos // Mathematical Methods in the Applied Sciences. – 2022. – Vol. 45 (12). – doi: 10.1002/mma.8273

10. Kornilova, M. I. Zeroing Neural Network for Pseudoinversion of an Arbitrary Time-Varying Matrix Based on Singular Value Decomposition / M. I. Kornilova, V. N. Kovalnogov, R. V. Fedorov, M. R. Zamaleev, V. N. Katsikis, S. D. Mourtas, T. E. Simos // Mathematical Methods in the Applied Sciences. – 2022. – № 10 (8). – 12 p. – doi: 10.3390/math10081208

*Патенты на полезные модели, свидетельства
о государственной регистрации программ для ЭВМ*

11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2022665200. Программный модуль автоматизированной подготовки исходных данных для цифрового двойника ВЭУ / В. Н. Ковальногов, А. В. Чукалин, Е. В. Цветова, Л. В. Хахалева, М. И. Корнилова, Ю. А. Хахалев ; заявитель и патентообладатель УлГТУ ; заявл. 10.08.2022 ; опубл. 11.08.2022, Бюл. № 8.

12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023660714. Программный модуль для имплементации в Star-CCM+ оригинальной полумпирической модели турбулентности КарпаAssistant / Ю. А. Хахалев, В. Н. Ковальногов, Л. В. Хахалева, А. В. Чукалин, М. И. Корнилова, А. В. Петров, Д. А. Демидов ; заявитель и патентообладатель УлГТУ ; заявл. 11.05.2023 ; опубл. 24.05.2023, Бюл. № 6.

13. Патент 197478 Российская Федерация, МПК F 03 D 5/00. Ветроколесо / Ковальногов В. Н., Хахалева Л. В., Хахалев Ю. А., Корнилова М. И.; заявитель и патентообладатель УлГТУ ; заявл. 27.01.2020 ; опубл. 30.04.2020.

14. Патент 2810860 Российская Федерация, МПК F 03 D 80/40 F 03 D 7/04. Ветрогенератор с устройством для нагрева лопастей / Ковальногов В. Н., Чукалин А. В., Петров А. В., Корнилова М. И., Демидов Д. А., Федоров Р. В. ; заявитель и патентообладатель УлГТУ ; заявл. 11.05.2023 ; опубл. 28.12.2023.

Публикации в прочих изданиях

15. Корнилова, М. И. Учет влияния сети территориально распределенных ветротурбин, орографии местности, шероховатости поверхности и управляющих воздействий на атмосферный пограничный слой // В. Н. Ковальногов, Ю. А. Хахалев, М. И. Корнилова,

Л. В. Хахалева, А. В. Чукалин, Д. А. Демидов // Снежный покров, атмосферные осадки, аэрозоли : сборник материалов IV Байкальской Международной научной конференции-сессии (г. Иркутск, 19–23 июня 2023 г.). – Иркутск : Изд-во ООО «Репроцентр А1», 2023. – С. 170–174. – ISBN 978-5-00202-315-8

16. Корнилова, М. И. Параметризация влияния ветроустановок в моделях турбулентности при исследовании ветропарка / М. И. Корнилова, В. Н. Ковальногов // Гражданская авиация: XXI век : сборник материалов XV Международной молодежной научной конференции (г. Ульяновск, апрель 2023 г.). – Ульяновск, 2023. – С. 60–64.

17. Корнилова, М. И. Математическое исследование аэродинамики одиночной ветротурбины / Л. В. Хахалева, М. И. Корнилова, Ю. А. Хахалев, Д. А. Демидов // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии : сборник трудов Международной научно-технической конференции (XXII Бенардосовские чтения) (г. Иваново, 31 мая – 2 июня 2023 г.). – Иваново, 2023. – Т. II. Теплоэнергетика. – С. 398–400. – ISBN 978-5-00062-575-0

18. Корнилова, М. И. Исследование аэродинамики ветроэнергетической установки с применением CFD-моделирования / Л. В. Хахалева, М. И. Корнилова, Ю. А. Хахалев, А. В. Чукалин А. В., Е. В. Цветова // Развитие методов прикладной математики для решения междисциплинарных проблем энергетики : сборник докладов II Всероссийской научно-технической конференции с международным участием (г. Ульяновск, 2022 г.). – Ульяновск, 2022. – С. 57–62.

19. Kornilova, M. Modeling and research of a wind turbine in the wind farm zone for the rational use of turbulence models / A. Chukalin, V. Kovalnogov, R. Fedorov, M. Kornilova, A. Petrov // 10th International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer, THMT-23 (Rome, Italy, 11–15 September 2023). – Rome, 2023. – 6 p. – doi: 10.1615/THMT-23.1620

20. Корнилова, М. И. Прогнозирование качества функционирования технического объекта с использованием машинного обучения / М. И. Корнилова, С. В. Бусыгин, В. Н. Ковальногов, В. Н. Клячкин // Надежность и качество сложных систем. – 2023. – № 4. – С. 152–158. – doi: 10.21685/2307-4205-2023-4-14

Научное издание

КОРНИЛОВА Мария Игоревна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО
ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ ОБЛАСТИ ВЕТРОПАРКОВ**

Специальность 1.2.2. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ (технические науки)

Редактор *Т. Н. Судовчихина*
Технический редактор *Ю. В. Анурова*
Компьютерная верстка *Ю. В. Ануровой*

Подписано в печать 20.09.2024. Формат 60×84¹/₁₆.
Усл. печ. л. 1,4. Заказ № . Тираж 100.

Издательство ПГУ.
440026, г. Пенза, ул. Красная, 40.
Тел./факс: (8412) 66-60-49, 66-67-77; e-mail: iic@pnzgu.ru