

УТВЕРЖДАЮ

И. о. проректора по научной и инновационной
деятельности Национального исследовательского
Томского государственного университета,
доктор физико-математических наук, профессор



Ворожцов Александр Борисович

« 31 » октября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Корниловой Марии Игоревны «Математическое моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя области ветропарков», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Актуальность темы диссертационной работы.

Развитие современной энергетической отрасли неразрывно связано с постоянным совершенствованием систем производства энергии из возобновляемых источников. Ветроэнергетическая отрасль при этом является одной из самых быстро развивающихся. Одним из перспективных направлений исследований (в данной области науки) является изучение взаимодействия комплексов ветротурбин с атмосферным пограничным слоем. Современные методы моделирования такого рода взаимодействий позволяют существенно повысить эффективность работы как единичной ветротурбины, так и целого ветропарка. При этом недостаточное знание структуры планетарного пограничного слоя в зоне работы ветротурбин на сегодняшний день является одной из проблем.

Большинство современных математических моделей, описывающих взаимодействие ветротурбин с атмосферным пограничным слоем, имеют ряд ограничений, например, предположения об изотропности турбулентного

течения и осесимметричном аэродинамическом следе ветротурбин. Более того, существующие подходы предполагают, в большинстве своем, двумерную постановку. В этой связи целесообразно разработать методику, основанную на увеличении точности и достоверности математического моделирования турбулентности атмосферного пограничного слоя области ветропарков. Сложность подобных методик, адекватно описывающих рассматриваемые процессы в атмосферном пограничном слое, требует разработки оптимальных численных алгоритмов.

Таким образом, диссертационная работа Корниловой Марии Игоревны «Математическое моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя области ветропарков», посвященная математическому моделированию процессов в атмосферном пограничном слое области ветропарков, является актуальной. Кроме того, соискателем в процессе диссертационного исследования получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ, патенты и акты внедрения, что характеризует применение полученных результатов на практике.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 196 страницах машинописного текста, содержит 77 иллюстраций и 3 таблицы. Она состоит из введения, 4 глав, общих выводов и заключения, списка литературы из 183 наименований, трех приложений.

Во введении представлена актуальность работы, описывается ее структура, сформулирована цель исследования, отмечена практическая значимость и научная новизна полученных результатов.

В первой главе проведен обзор литературы и патентной информации по исследованиям аэродинамики атмосферного пограничного слоя области ветропарка. Рассматриваются процессы, протекающие в пограничном слое атмосферы в зоне ветропарков, а также особенности аэродинамических следов ветротурбин, вопросы потерь энергии ветра, турбулентности. Рассмотрены различные способы параметризации ветротурбин, в том числе с применением актуаторных моделей.

Во второй главе предложена модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии воздушного потока с сетью ветротурбин, отличающаяся уточнением значений кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Описаны алгоритмы машинного обучения, используемые для определения значений коэффициентов модели. Представлена структурная схема этапов предложенного модифицированного метода математического моделирования турбулентного переноса в атмосферном пограничном слое в окрестности ветротурбин.

Третья глава посвящена описанию методики численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений атмосферного пограничного слоя 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. Описаны отличительные особенности рассматриваемой методики. Показано сокращение вычислительных затрат на процесс расчета турбулентного течения в атмосферном пограничном слое области ветропарка до 60 %.

В четвертой главе приводится описание разработанного программного комплекса в виде набора программных модулей для моделирования и исследования атмосферного пограничного слоя в окрестности одиночной ветротурбины и области ветропарка. В данный программный комплекс внедрены модифицированный метод расчета турбулентности и разработанная методика численного решения системы дифференциальных уравнений атмосферного пограничного слоя. Представлена верификация результатов численных экспериментов путем сопоставления получаемых результатов с известными литературными и экспериментальными данными. Выполнена численная оценка скорости восстановления аэродинамических следов при влиянии внешних воздействий для ветропарка двух типов

конфигураций. Выполнен анализ влияния внешних воздействий на выходную мощность ветротурбин. Разработаны и запатентованы новые технические решения, которые позволяют повысить эффективность работы ветропарков при производстве энергии.

В заключении описаны основные выводы, полученные в рамках выполнения диссертационной работы.

Научную новизну диссертационной работы определяют следующие результаты исследований:

1. Разработана модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии атмосферного пограничного слоя 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 атмосферного пограничного слоя 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 нижней поверхности).

3. Разработаны алгоритмы численного моделирования атмосферного пограничного слоя области ветропарка. Отличительной особенностью алгоритмов является моделирование турбулентного переноса и наличие процедуры численного исследования основных характеристик атмосферного пограничного слоя. 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 атмосферного

пограничного слоя 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 атмосферного пограничного слоя.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается сравнительным анализом с результатами экспериментальных исследований других авторов, использованием проверенных методов математического моделирования и верификацией используемых алгоритмов.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Модифицированный метод математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии атмосферного пограничного слоя 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. Практическая значимость работы заключается в создании комплекса программ для исследования атмосферного пограничного слоя при его взаимодействии с ветропарком, применение которого дает возможность повысить эффективность ветропарка при производстве энергии путем его настройки под условия атмосферного пограничного слоя. На основании применения 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).

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы. Результаты диссертационной работы М. И. Корниловой могут быть использованы в деятельности ПАО «ЭЛ5-Энерго» и ООО «Первый Ветропарк ФРВ», а также других организаций, занимающихся производством электроэнергии, получаемой из возобновляемых источников энергии; в научно-исследовательских институтах и центрах, занимающихся численным моделированием и экспериментальными исследованиями ветрогенераторов.

Соответствие автореферата содержанию диссертации. Автореферат диссертации соответствует ее содержанию.

Подтверждение опубликованных основных результатов диссертации в научной печати. По материалам диссертации опубликовано 36 работ; в том числе 10 статей в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (из них 5 статей индексируются в международных базах данных Scopus и Web of Science); получен 1 патент на полезную модель и 1 патент на изобретение, а также 2 свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ. Все опубликованные работы соответствуют теме диссертации и с достаточной полнотой отражают содержание, выводы и заключение диссертации.

По работе имеется ряд **замечаний**:

1. В тексте диссертации присутствует термин «триммерные ячейки». Что под этим термином подразумевается?
2. Не ясна причина выбора неструктурированной сетки для тестовых расчетов одиночной ветротурбины. Более того, в диссертации отмечено, что «сходимость расчетов на структурированной сетке не достигалась». Хотелось бы более подробного объяснения.
3. Одна из задач исследования формулируется как «обеспечение требуемой точности и достоверности прогнозирования производительности

ветропарка». Однако какие-либо количественные характеристики «требуемой точности» не указываются.

4. Каким образом получены выражения для определения источниковых членов в уравнениях для k и ε ? Хотелось бы более подробного описания.

5. Рассматривались ли прочностные характеристики разработанной лопасти (патент на полезную модель № 197478)?

Отмеченные замечания не снижают общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение.

По своим целям и задачам, содержанию и методам исследования диссертация Корниловой М. И. соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки) по направлениям исследований: «Разработка, обоснование и тестирование эффективных вычислительных методов с применением современных компьютерных технологий» (п. 2 паспорта специальности); «Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента» (п. 3 паспорта специальности); «Комплексные исследования научных и технических проблем с применением современной технологии математического моделирования и вычислительного эксперимента» (п. 8 паспорта специальности).

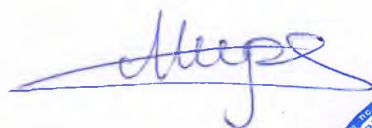
Учитывая актуальность темы диссертации, новизну и практическое значение полученных результатов, наличие патентов на полезную модель и изобретение, актов о внедрении результатов, считаем, что диссертация «Математическое моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя области ветропарков» удовлетворяет требованиям пп. 9–11, 13, 14 действующего Положения о присуждении ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, а ее автор, Корнилова Мария Игоревна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности

1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Отзыв составлен кандидатом физико-математических наук, доцентом Мирошниченко Игорем Валерьевичем.

Диссертация, автореферат и отзыв на диссертацию Корниловой М. И. обсуждены на совместном заседании регионального научно-образовательного математического центра и кафедры теоретической механики механико-математического факультета Томского государственного университета 21 октября 2024 года, протокол № 3.

Доцент кафедры теоретической механики,
старший научный сотрудник регионального
научно-образовательного математического центра
Томского государственного университета,
кандидат физико-математических наук
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),
доцент



Мирошниченко Игорь Валерьевич

30 октября 2024 г.



Подпись удостоверяю
Ведущий документовед
Андрienko И. В.



Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет»; 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36; (3822) 52-98-52, rector@tsu.ru, <http://www.tsu.ru>