

Отзыв

**официального оппонента 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 научной специальности 1.2.2. Математическое
моделирование, численные методы и комплексы программ
(технические науки)**

На существующем этапе развития энергетики ветрогенераторы используются все шире. Сокращение сроков разработки ветропарков требует создания адекватных математических моделей турбулентности в атмосферном пограничном слое для повышения точности прогнозирования характеристик ветропарков. Это сопряжено с некоторыми трудностями ввиду сложного взаимодействия воздушного потока с подстилающей поверхностью, на которой расположена сеть ветрогенераторов, и, следовательно, требующая высоких затрат вычислительных ресурсов. В этой связи, диссертационная работа Корниловой М.И., посвященная увеличению точности и достоверности математического моделирования турбулентности атмосферного пограничного слоя в области ветропарка посредством модификации метода математического моделирования турбулентного переноса, разработки методики численного решения и алгоритмов численного исследования, проведения вычислительного эксперимента, безусловно, является актуальной и практически значимой работой.

Диссертационная работа Корниловой Марии Игоревны состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, условных обозначений, используемой литературы из 183 источников, рисунков, таблиц, приложений. Общий объем диссертации составляет 187 страниц.

Первая глава посвящена анализу методов моделирования пограничного слоя, обзору исследований атмосферного пограничного слоя вблизи ветропарка, показана актуальность исследований турбулентности в окрестностях ветрогенераторов, рассмотрены преимущества и недостатки существующих методов моделирования ближнего и дальнего аэродинамических следов. В результате анализа современного состояния исследований в области моделирования атмосферного пограничного слоя соискателем сформулированы цель и задачи диссертационного исследования.

Во **второй главе** представлена математическая формулировка задачи математического моделирования турбулентного переноса в атмосферном пограничном слое в области ветропарка. В параграфе 2.1. приведены условия моделирования ветропарка, состоящего из семи ветрогенераторов горизонтального пропеллерного типа, работающих с постоянной скоростью

вращения, а также система дифференциальных уравнений в частных производных для моделирования турбулентного воздушного потока, включающая уравнение неразрывности, уравнение движения, уравнение энергии и состояния. Кроме того, приведено выражение для вектора завихренности, учитывающего влияние на моделируемые потоки работы ветрогенераторов. Во второй главе осуществлен анализ применения известных подходов к моделированию турбулентных потоков на базе дифференциальных уравнений с замыканием их с помощью известных моделей турбулентности ($k-\epsilon$, $k-\omega$, напряжений Рейнольдса, Спаларта-Аллмареса) и вихреразрешающего подхода при моделировании работы одиночного ветрогенератора, проведен анализ сеточной сходимости, определена погрешность расчета при использовании различных моделей турбулентности, достигающая 12-13 %. Предложена модификация $k-\epsilon$ -модели турбулентности, заключающаяся во включении дополнительных источников членов в уравнения турбулентного переноса кинетической энергии и диссипации, описывающих возмущение воздушного потока при его взаимодействии с лопастями ветрогенераторов и затухание турбулентного следа, что позволило снизить погрешность расчета по сравнению с имеющимися подходами и сократить вычислительные затраты на моделирование.

В третьей главе представлен метод численного решения системы дифференциальных уравнений атмосферного пограничного слоя в окрестностях ветропарка для RANS-подхода с модифицированным методом математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии воздушного потока с сетью ветрогенераторов на основе $k-\epsilon$ -модели, состоящий из следующих этапов: а) построения вычислительной сетки, б) аппроксимации уравнений переноса турбулентности с учетом дополнительных параметров, учитывающих влияние завихренности от работающих ветрогенераторов; в) решение системы алгебраических уравнений с использованием процедуры SIMPLE. В этой главе соискателем Корниловой М.И. представлена численная реализация метода пристеночных функций, алгоритм построения вычислительной сетки для задачи исследования турбулентности в атмосферном пограничном слое, представлен алгоритм задания граничных условий для моделирования ветропарка с использованием актуаторного представления ветрогенераторов, показано, что предложенная методика численного решения системы дифференциальных уравнений атмосферного пограничного слоя в окрестностях ветропарка сокращает вычислительные затраты до 60 % при обеспечении требуемой точности расчета.

В четвертой главе представлен комплекс программ для исследования атмосферного пограничного слоя в окрестностях ветропарка и алгоритмы численного исследования аэродинамики турбулентных следов за комплексом ветрогенераторов, разработан алгоритм моделирования

влияния одиночного ветрогенератора и парка ветрогенераторов на атмосферный пограничный слой в его окрестностях. Соискателем в четвертой главе представлен программный комплекс на основе решателя Star-CCM+ для настройки расчета атмосферного пограничного слоя в окрестностях парка ветрогенераторов, результаты расчетов на основе предложенной расчетной методики для одиночного ветрогенератора и их парка. Соискателем Корниловой М.И. предложены новые технические решения на ветрогенератор с устройством для нагрева лопастей.

В **заключении** представлены основные результаты и выводы диссертационной работы:

1) Предложенная модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии атмосферного пограничного слоя (АПС) с сетью ветротурбин позволила повысить точность прогнозирования 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 натуральных экспериментов и результатами авторов, проводивших схожие исследования. Отклонения от данных экспериментальных исследований не превысили 5 %, что указывает на достоверность результатов моделирования.

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.

Следующие положения определяют **научную новизну** исследования:

- разработанная модификация метода математического моделирования турбулентного переноса при взаимодействии атмосферного пограничного слоя с сетью ветрогенераторов, которая дает возможность с повышенной точностью и достоверностью прогнозировать производительность ветропарков с учетом внешних воздействий.
- разработанная методика численного решения системы дифференциальных уравнений движения, энергии, неразрывности для моделирования турбулентных течений атмосферного пограничного слоя в окрестностях ветропарка, реализованная в виде комплекса алгоритмов и отличающаяся заданием локальных характеристик для описания течения в пограничном слое вблизи твердых стенок (у лопастей и башен ветрогенераторов, у подстилающей поверхности), предопределенной конфигурацией ветропарка при применении актуаторных моделей и автоматическим заданием густоты сетки в областях ближних аэродинамических следов ветрогенераторов и в областях вращения ветроколес ветрогенераторов, позволяющая существенно сократить вычислительные затраты на процесс моделирования, повысить точность моделирования ветропарка.
- разработанные алгоритмы численного моделирования АПС области ветропарка, особенностью которых является моделирование турбулентного переноса и процедуры численного исследования основных характеристик атмосферного пограничного слоя, и представляющие собой основу взаимодействия программных модулей с интерфейсом прикладных программ для гидродинамического моделирования.
- выявленные закономерности влияния ветропарков на состояние атмосферного пограничного слоя в виде профилей дефицита скорости и интенсивности турбулентности для учета взаимного влияния аэродинамических следов ветрогенераторов, что позволяет разработать практические рекомендации по повышению эффективности работы ветропарков при производстве энергии.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в том, что модифицированный метод позволяет учесть влияние внешних воздействий (параметры работы ветрогенераторов, ветровое воздействие, атмосферная турбулентность, шероховатость подстилающей поверхности) на развитие турбулентного следа. Разработанные для реализации

модифицированного метода методика и алгоритмы позволяют уменьшить требуемые затраты вычислительных ресурсов при моделировании.

Практическая значимость диссертационной работы состоит в создании оригинального программного комплекса для исследования атмосферного пограничного слоя при его взаимодействии с ветропарком. С применением созданного комплекса программ разработаны и обоснованы технические решения, направленные на повышение эффективности работы ветрогенераторов в актуальных условиях эксплуатации ветрогенераторов.

Достоверность и обоснованность результатов работы 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. Результаты исследования апробированы на российских, международных и зарубежных конференциях, по теме работы получен грант Фонда содействия инновациям, ряд результатов получены в рамках реализации проектов при поддержке грантами Президента Российской Федерации, Правительства Российской Федерации.

По теме диссертации автором опубликовано 36 работ, пять из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК; пять статей изданы в зарубежных журналах, индексируемых в наукометрических базах Web of Science и Scopus (имеются статьи в журналах, относящихся к квартилю Q1). Автором получен патент на полезную модель (№197478, «Ветроколесо») и патент на изобретение (№2810860, «Ветрогенератор с устройством для нагрева лопастей»), два свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ (№2022665200, №2023660714).

Оценка языка и стиля диссертации и автореферата

Автореферат выдержан по форме, объему и отражает основные положения диссертационной работы. В целом, язык и стиль написания диссертации характеризуется достаточной ясностью и четкостью изложения материала.

По диссертации соискателя имеются следующие **замечания и комментарии:**

- 1) из автореферата и текста диссертации не ясно, почему при формулировке цели исследования не указана разработка математической модели для моделирования атмосферного пограничного слоя области ветропарков;
- 2) из текста диссертации не ясно, на основании каких исследований автора могут быть предложены решения по конфигурации ветропарков с количеством ветрогенераторов более семи, т.к. в диссертации (рис. 4.50) показаны только контуры завихренности для коридорного и шахматного расположения семи ветрогенераторов.

Кроме того, в тексте диссертационной работы нет данных о влиянии на атмосферный пограничный слой в области ветропарка наличия устройств для нагрева лопастей у ветрогенераторов ветропарка;

- 3) в тексте диссертационной работы и автореферата нет данных по условиям проведения эксперимента, используемого для верификации методик численного решения системы дифференциальных уравнений с модифицированной моделью турбулентности (RANS подход) и их программной реализации;
- 4) из текста диссертационной работы и автореферата не ясно, почему расчеты, результаты которых представлены на рис. 2.8, для вихреразрешающего подхода (LES) имеют существенно меньшее количество расчетных узлов по сравнению с другими расчетными подходами;
- 5) в тексте диссертационной работы и автореферате не достаточно обосновано применение при моделировании процедуры SIMPLE. Кроме того, в диссертационной работе не достаточно описано на основании чего, при моделировании приняты значения атмосферной турбулентности и как сформирован план численных экспериментов (табл. 4.1, значения скорости, шероховатости и атмосферной турбулентности);
- 6) подрисуночная подпись к рис. 2.7 не корректна, т.к. указано «Результаты расчетов дефицита скорости за ветротурбиной с использованием моделей турбулентности (« $k - \epsilon$ »-модель – $k-\epsilon$, « $k - \omega$ »-модель – $k-\omega$, Reynolds Stress – R-S, Spalart-Allmares – S-A) и вихреразрешающего подхода (LES) на различных сетках [31]», однако на рисунке представлены результаты верификации посредством сравнения с экспериментальными данными из работы «Наумов, И. В. Оценка дальности распространения следа и уровня его пульсаций за роторами ветрогенераторов / И. В. Наумов, Р. Ф. Миккельсен // Теплоэнергетика. – 2016. – № 3. – С. 54–60». Т.е. в подрисуночной надписи некорректная формулировка, т.к. экспериментальные данные использовались из этой работы, отображенной в списке литературы (пункт 31);
- 7) рис. 4.16, 4.18, 4.20, 4.23, 4.25, 4.27, 4.35-4.40, 4.42, 4.43 выполнены в таком неудачном масштабе, что подписи на рисунках имеют размерность существенно меньшую, чем шрифт подрисуночных надписей или текста диссертационной работы, что существенно снижает информативность рисунков.

Перечисленные замечания и комментарии носят дискуссионный характер и не влияют на положительную оценку диссертационной работы.

В целом, диссертация Корниловой Марии Игоревны «Математическое моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя области ветропарков» - является завершенной научной работой.

