

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СЛЕДА
ЗА ВЕТРОТУРБИНОЙ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА¹

© 2023 г. М. И. Корнилова^а, *, Ю. А. Хахалев^а,
В. Н. Ковальногов^а, А. В. Чукалин^а, Е. В. Цветова^а

^аУльяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, г. Ульяновск, 432027 Россия

*e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Поставлена задача моделирования приземного атмосферного пограничного слоя (АПС) в зоне ветротурбины в локации Ульяновского ветропарка. Достоверное и точное прогнозирование эволюции АПС, взаимодействующего с ветропарком, в широком диапазоне пространственных и временных масштабов дает ценную количественную информацию о его потенциальном воздействии на местную метеорологическую обстановку и имеет большое значение для оптимизации как проектирования (размещения турбин), так и эксплуатации ветропарков. Рассматриваются основные проблемы моделирования и численного исследования атмосферного пограничного слоя в комплексе с ветротурбиной. К основным проблемам моделирования относятся: многомасштабность, учет сильно шероховатой неоднородной поверхности, нерегулярность ветра по амплитуде, направлению и частоте, учет конвекции, солнечной радиации, стратификации и фазовых переходов и осадков, генерация турбулентности, выбор метода и инструмента моделирования. Рассматривается проблема многомасштабности исследования системы АПС – ветротурбина, приводится обзор вычислительных технологий для решения задач аэродинамики в масштабах одной установки и ветропарков. Проводится аналитический обзор методов моделирования АПС и его взаимодействия с ветротурбиной. Рассматриваются подходы к исследованию АПС на базе систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу, вихререзающих моделей, а также прямого численного моделирования, приводятся их достоинства и ограничения для решения задачи исследования системы АПС – ветрогенератор. Описывается математическая модель системы АПС – ветротурбина. Приведены результаты математического моделирования и численного исследования аэродинамики системы АПС – ветротурбина Ульяновского ветропарка, получены и проанализированы численные данные по затуханию аэродинамического следа за ветротурбиной и восстановлению профиля скорости, а также по сопротивлению трения на поверхности лопасти ветроколеса. Выполнен анализ результатов математического моделирования АПС в зоне ветротурбины.

Ключевые слова: ветротурбина, математическое моделирование, численное исследование, атмосферный пограничный слой, модель турбулентности, сопротивление трения, профиль скорости, аэродинамическая характеристика

DOI: 10.56304/S0040363623120068

Глобальное изменение климата в настоящее время является одним из главных вызовов, с которыми столкнулось человечество. За последние 150 лет средняя температура окружающей среды повысилась на 1°C и продолжает увеличиваться все более высокими темпами. Это, в свою очередь, влияет как на биосферу в целом, так и на жизнь каждого человека. Главная причина глобального потепления – антропогенный фактор,

на который наибольшее влияние оказывают продукты, образующиеся при сжигании органического топлива на транспорте и тепловых электростанциях. Потому переход к “зеленой” энергии существенно помог бы в решении данной проблемы. Сейчас ветроэнергетика является одной из наиболее динамично развивающихся отраслей. В соответствии с оценками технического и экономического потенциалов отечественной ветроэнергетики можно говорить о возможности покрытия не менее 30% всей потребности в электроэнергии ветровыми электростанциями [1]. Отечественная вет-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 22-19-00030), <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>

роэнергетика сталкивается с множеством проблем, таких как нерегулярный и низкий ветропотенциал, сложные метеоусловия с частыми переходами температурного режима через “нуль” и осадками. По мере увеличения количества ветротурбин в мире обозначаются новые проблемы: влияние на АПС ветроустановок, интерференционных эффектов и совместной работы ветротурбин в комплексах [1–20].

В этой связи возникает необходимость изучения и исследования аэродинамических следов за ветротурбинами, чтобы исключить возможные ошибки на стадии проектирования ветропарков. С помощью математического моделирования и цифровых двойников ветропарков возможно экономить ресурсы и получать достоверный прогноз вырабатываемой электрической энергии.

МЕТОДЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И ЕГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ВЕТРОУСТАНОВКОЙ

Сегодня работы, относящиеся к данной тематике, свидетельствуют о переходе от накопления эмпирического материала к его аналитическому и теоретическому обобщению [2–49]. В области численного моделирования аэродинамики большинство работ относятся к отдельным ветротурбинам [9, 10, 13–15, 18, 21–24], хотя в последнее время появилось много публикаций, посвященных изучению комплексов ветротурбин и ветропарков [3, 20, 25–31]. Эти публикации связаны главным образом с исследованиями аэродинамических следов ветротурбин и их взаимного влияния в контексте эффективности работы ветропарка [2–9, 11–14, 17, 25–30, 32].

Для адекватного моделирования реальных систем и обеспечения необходимой точности в наиболее развитых моделях демонстрируется тренд решения многомасштабных задач с использованием мощных вычислительных комплексов [3, 20, 25, 27, 30]. В настоящее время применяются следующие методы математического моделирования атмосферного пограничного слоя и ветроустановок: решение систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу (Reynolds Averaged Numerical Simulation – RANS-модели), вихре разрешающее моделирование (Large Eddy Simulation – LES-модели) и прямое численное моделирование (Direct Numerical Simulation – DNS).

В большинстве ранних исследований взаимодействия АПС с отдельными ветротурбинами использовали усредненный по Рейнольдсу подход Навье – Стокса (RANS) [6, 8, 9, 22, 33–40]. При таком подходе модель воспроизводит средние значения скорости потока и других параметров (температуры, влажности воздуха, концентрации примеси). Влияние флуктуаций учитывается с

помощью моделей турбулентности. Модели RANS могут быть одномерными, двумерными и трехмерными, но одномерные модели чаще используются в качестве блоков, параметризующих турбулентность в геофизических пограничных слоях в глобальных, региональных и мезомасштабных моделях атмосферы и океана [34, 39, 40]. Часто рассматривается нейтрально стратифицированный АПС [38]. На входе расчетной области задаются профили температуры и скорости ветра по ее высоте. Предполагается, что они не изменяются в горизонтальном направлении движения ветрового потока. Авторы [38] использовали пакет Fluent 6.3. Для экономии времени вычислений применялось двумерное приближение к реальной задаче. Расчетная область составила 3000×5000 м. Определялась зависимость профилей скорости, температуры и турбулентных характеристик от масштаба длины при различных стратификациях атмосферы.

В работе [53] используется пакет Simulink, который интегрирован с прикладным пакетом MATLAB. Данный инструмент позволяет моделировать, имитировать и проводить анализ динамических систем. Проведено моделирование крыльчатой ветроустановки и оптимизированы режимы ее работы. Однако в современных представлениях RANS-моделирование слишком зависит от характеристик конкретных потоков, чтобы использовать его в качестве метода общей применимости [25]. В силу этого в настоящее время значительная часть исследований по взаимодействию АПС с ветротурбиной выполняется с помощью вихре разрешающих моделей [2–17, 20–22, 25–30, 32–34, 39, 42–45, 49].

Эти модели базируются на гипотезе о независимости статистических характеристик крупномасштабных турбулентных движений от молекулярной вязкости среды (воздуха), из чего следует возможность описать нестационарную динамику относительно крупных вихрей (так называемых энергосодержащих вихрей, переносящих основную моду турбулентных пульсаций). Влияние мелкомасштабной турбулентности также учитывается ее моделями. Моделирование большого вихря LES предоставляет исследователям пространственную и временную информацию высокого разрешения, ценную для практических приложений. С помощью LES-моделирования можно получить надежную и подробную информацию о следах ветротурбин [2–6, 21, 25–30, 33, 41, 42, 44–49], которая необходима для оптимизации работы ветроэлектростанции (ВЭС), в частности для определения максимальной выработки электроэнергии при минимальных усталостных нагрузках и получения более точных параметров турбулентного потока.

В случаях, когда требуется установить точный прогноз движения атмосферного потока при его взаимодействии с ветротурбинами в широком диапазоне пространственных и временных масштабов, для оптимизации размещения ветротурбин применяется “высокоточное моделирование” (НФМ), охватывающее численные методы гидродинамики, ранжированные в соответствии с обработкой масштабов турбулентности. С помощью НФМ-моделирования модели ветротурбин можно разделить на три категории: разрешения лопастей, линейного привода и дискового привода [44, 49, 50]. Модели виртуальных дисков позволяют экономить ресурсы, так как не требуют точной прорисовки лопастей, а значит, и нанесения на их поверхности мелких сеток. Поэтому именно их часто используют при моделировании ветропарков.

Большой интерес в последнее время вызывает численное моделирование следа ветротурбин [2, 5, 7–9, 19, 25–30, 41, 43, 48, 49, 51]. При отрыве пограничного слоя на концах лопастей ветротурбины образуются вихри, имеющие винтообразную структуру. Они создают дополнительное ускорение либо замедление течения в следе за ветротурбиной. Теория данного явления описана и подтверждена экспериментально в работах [10, 14, 16, 21]. Существуют упрощенные представления о структуре течения, среди которых можно выделить гипотезу Тейлора о замороженной турбулентности и представление Колмогорова о каскадном переносе энергии. В [23] был выполнен расчет работы одиночной ветротурбины методом LES и методом плоских сечений вдоль ее лопасти. Математическая модель включала в себя основные уравнения неразрывности и импульса для несжимаемой жидкости. Крупномасштабные вихревые структуры рассчитывали путем интегрирования отфильтрованных уравнений. Расчет проводился с использованием модели Смагоринского для определения турбулентной подсеточной вязкости.

К настоящему моменту накоплено достаточно большое количество результатов численного исследования следов ветротурбин. Поэтому в работе [51] предпринята попытка проанализировать результаты численных исследований в целях создания эффективных суррогатных моделей для прогнозирования спутного следа, которые можно использовать в дальнейшем для изучения влияния скорости ветра и углов рыскания на выработку электроэнергии ветровыми электростанциями.

При создании математической модели ветропарков нужно учитывать следующие особенности:

- многомасштабность задачи вследствие большой разницы в масштабах рассматриваемого АПС;

- подстилающие поверхности ветропарка и ветроустановки;

- орографию (топографический рельеф) поверхности;

- стратификацию, конвекцию, солнечную радиацию и фазовые переходы;

- генерацию турбулентности вследствие обрушению ветровых волн;

- динамику спектрального переноса энергии через мезомасштабный интервал [34].

Проблема выбора характерного масштаба в рамках многомасштабности заключается в том, что площадь ветропарков составляет десятки квадратных километров, высота атмосферного пограничного слоя в интересующей области примерно 1 км (очень условно, так как процессы, происходящие в атмосферном пограничном слое, затрагивают и более высокий слой атмосферы), размер лопастей ветроколеса равен 1–100 м. Характерный масштаб турбулентных вихрей можно предположить равным расстоянию от ветротурбины до поверхности земли [34]. Более мелкие вихри имеют масштаб 1–2 см вблизи поверхности земли и ветроустановок, более крупные вихри – 10–1000 м в слое смешения атмосферного пограничного слоя. Большой разброс масштабов расчетных областей сопряжен с высокими вычислительными затратами, поэтому решение задач аэродинамики ветропарков стало возможным лишь в последние десятилетия с развитием высокопроизводительных вычислительных машин и программного обеспечения, такого как ANSYS, Fluent, SFX, STAR CCM+ [48], а также некоммерческих пакетов и других программ [29, 31, 34, 45].

При решении задачи моделирования следа одиночной ветротурбины проблема многомасштабности стоит уже не так остро, так как характерные размеры ветроколеса не превышают 150 м, а вихревой след распространяется вниз по потоку на 10–20 калибров (диаметров ветротурбины).

Распространенным подходом является иерархическое моделирование “макромасштаб – мезомасштаб – микромасштаб”.

Математическое моделирование параметров потока в ВЭС выполняется с помощью программного обеспечения piso Foam Turbine и метода Actuator Line Model [20]. Авторы [31] разработали модель ветропарка в программном комплексе MATLAB и получили характеристики работы группы ветроустановок при одинаковых и разных скоростях ветра.

Необходимость учета орографии местности при моделировании течений в атмосферном пограничном слое доказывается в [36]. Авторы работ [32, 46, 47] приводят результаты численного исследования течения воздуха над поверхностью со сложным рельефом, показывающие существенное влияние орографии поверхности на работу ветроустановок.

Задачи генерации турбулентных вихрей, а также динамики спектрального переноса энергии через мезомасштабный интервал решаются с помощью моделей турбулентности. Используются главным образом вихреразрешающий LES-подход и k - ε -модели турбулентности [34, 37–40]. В то же время точность LES-подхода при моделировании потока АПС с сетью поверхностно распределенных ветротурбин зависит от способности параметризовать турбулентные потоки в подсеточных масштабах. При этом установлено, что при LES-моделировании, которое разрешает крупномасштабную динамику, можно более точно уловить турбулентность, чем при RANS-моделировании, но для этого необходимы более значительные ресурсы мощности и более длительное время для решения [3–5, 25, 33, 41].

Другой метод базируется на численном решении системы дифференциальных уравнений Навье – Стокса. Этот метод требует высокого пространственно-временного разрешения, а значит большой вычислительной мощности. Поэтому он используется чаще всего для получения больших массивов данных турбулентных потоков с простой структурой [48–50].

УСЛОВИЯ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА

Несмотря на многочисленные результаты исследования следов ветротурбин, существует необходимость всестороннего изучения их аэродинамики в условиях Ульяновского ветропарка, так как поставлена задача создать в будущем его цифровой двойник. Ветропарк расположен в поселке Красный Яр Ульяновской области. На сегодня его установленную мощность 85 МВт обеспечивают 14 ветротурбин марки DF2.5 MW-110 и 14 ветротурбин марки V126-3.45 MW. Географическое положение Ульяновской области отличается боль-

шой акваторией Куйбышевского водохранилища. Этим объясняются значительные температурные и влажностные градиенты. Перепад высот на территории ветропарка с юга на север не превышает 22 м. Средняя высота ветропарка относительно уровня моря составляет 90.5 м. На рис. 1 представлен фрагмент спутникового снимка Google Maps с Ульяновским ветропарком.

Для моделирования профиля скорости и температуры использовали результаты годовых ежедневных измерений метеорологических параметров с равными промежутками времени за 2021 г. [52], а для построения вертикального профиля скорости – метеоданные, по которым вычисляли показатель степени n зависимости скорости потока воздуха u от высоты [53]:

$$u = u_1 \left(\frac{H}{H_1} \right)^n, \quad (1)$$

где u_1 – скорость, м/с, измеренная на высоте H_1 , м; H – высота размещения оси ветротурбины, принимается равной 100 м; n – показатель степени, принимается равным 0.2. В данной работе показатель степени n определяли по метеоданным, так как 0.2 соответствует среднегодовому значению [53].

Метеоданные получены с использованием программы WindPRO [52] и восстановлены с помощью базы данных ERA5 [54]. Эта система моделирования опирается на данные измерений метео- и спутниковых станций и с учетом рельефа местности генерирует значения для промежуточных (между метеостанциями) точек. Профили верифицировали в соответствии с [55] при следующих географических координатах г. Ульяновск: $54^\circ 19.00'$ северной широты и $48^\circ 23.00'$ восточной долготы. После анализа метеоданных показатели степени n в зависимости (1) составили 0.34, 0.32,

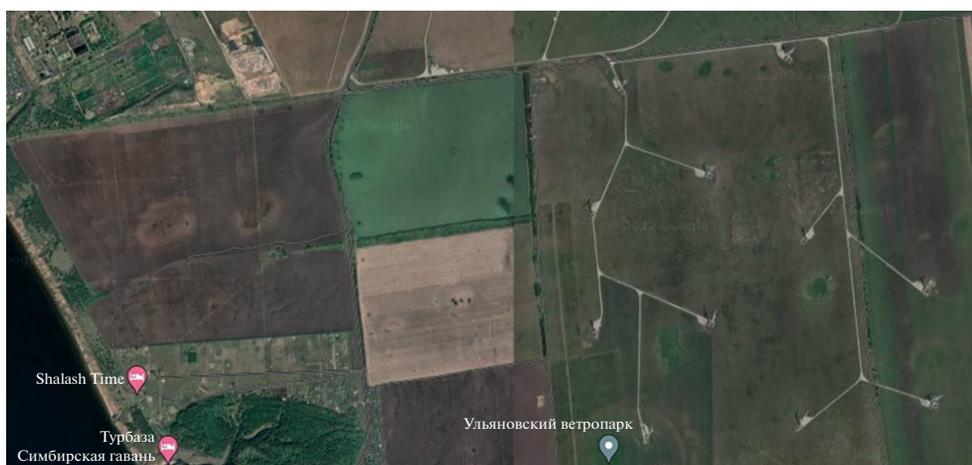


Рис. 1. Спутниковый снимок Ульяновского ветропарка (GoogleMaps)

0.13 и 0.11 для лета, зимы, весны и осени соответственно. Для линейной аппроксимации температурной зависимости по высоте также были определены коэффициенты с учетом вертикального градиента температуры γ по сезонам 0.48, 0.36, 0.32 К/м соответственно для лета, осени/зимы и весны на высоте от 0 до 500 м (температурной стратификации). Эти данные свидетельствуют о том, что вертикальный градиент температуры меньше адиабатического ($\gamma = 0.6$ К/м) и препятствует вертикальному движению воздуха. Следовательно, процесс конвекции не поддерживается.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АПС В ОКРЕСТНОСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ

В качестве математического инструмента для моделирования атмосферного пограничного слоя и аэродинамического следа работающей ветротурбины предлагается использовать коммерческий пакет STAR CCM+, который содержит все необходимые опции. Лицензионная версия с консультативной поддержкой позволяет произвести необходимые численные исследования.

Предварительно были протестированы предлагаемые модели $k-\epsilon$, $k-\omega$, напряжений Reynoldsstress (RS) и турбулентности Spalart – Allmaras (S-A). Верификацию проводили с использованием результатов измерений и аналитической зависимости относительного дефицита скорости потока воздуха u_0/u_∞ (здесь u_0 – дефицит скорости в следе, м/с; u_∞ – скорость набегающего потока, м/с) от относительного расстояния x/D (здесь x – расстояние за ветротурбиной; D – диаметр ветроколеса) [10, 16] (рис. 2). Было принято решение использовать RANS-метод и стандартную $k-\epsilon$ -модель турбулентности. Такой выбор в рамках поставленной прикладной трехмерной нестационарной задачи обеспечивает лучшую точность и сходимость решения при экономии вычислительных ресурсов. Кроме того, результаты, полученные при использовании $k-\epsilon$ -модели, наиболее близки к степенной зависимости.

Постановка математической задачи формулируется в виде следующих уравнений:

уравнение неразрывности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

где ρ – плотность среды, кг/м³; x_i – координаты x, y, z ; u_i – компонента осредненной скорости ветра, м/с; t – время, с;

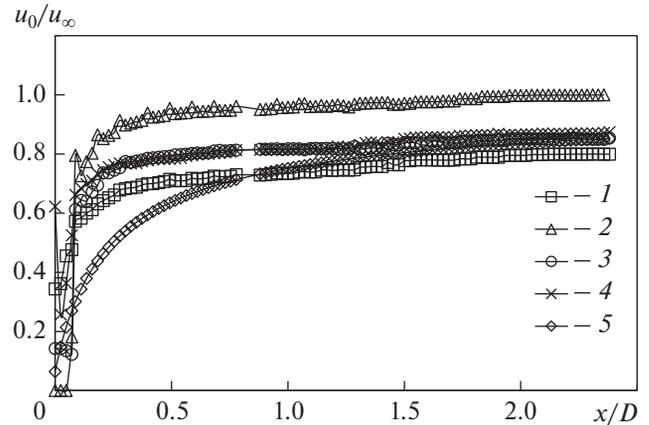


Рис. 2. Верификация модели.

Модель: 1 – $k-\epsilon$; 2 – $k-\omega$; 3 – RS; 4 – S-A; 5 – $n = -\frac{2}{3}$

уравнение движения

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] - \frac{\partial (\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j')}{\partial x_j} + \rho g_i, \quad (3)$$

где p – давление, Па; μ – динамический коэффициент вязкости воздуха, Па · с; δ_{ij} – дельта Кронекера ($\delta_{ij} = 1$, если $i = j$, и $\delta_{ij} = 0$, если $i \neq j$); u_i, u_j, u_k – составляющие скорости движения воздушного потока, м/с; x_i, x_j, x_k – координаты, м; \bar{u}_i', \bar{u}_j' – пульсации скорости, м/с; g_i – компонент вектора гравитации в i -м направлении;

уравнение энергии

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i h)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda + c_p \frac{\mu_t}{Pr_t} \right) \frac{\partial T}{\partial x_i}, \quad (4)$$

где

$$h = c_p T \quad (5)$$

– энтальпия, кДж/кг; c_p – удельная изобарная теплоемкость, кДж/(кг · К); T – температура воздуха, К; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м · К); μ_t – турбулентный коэффициент вязкости, Па · с; Pr_t – турбулентное число Прандтля, $Pr_t = 0.85$ [38];

уравнение турбулентной кинетической энергии

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho k u_i)}{\partial x_i} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} + G_b - \rho \epsilon, \quad (6)$$

где k – турбулентная кинетическая энергия; E_{ij} – компонента тензора скоростей деформаций; ϵ –

скорость диссипации кинетической энергии турбулентности; σ_k – обратное эффективное число Прандтля для k ;

$$G_b = g_i \bar{\rho}' \bar{u}_i' \quad (7)$$

– генерация турбулентности, обусловленная пульсациями плотности и корреляцией между пульсациями плотности и скорости; $\bar{\rho}'$ – пульсация плотности воздуха, кг/м³;

уравнение скорости диссипации кинетической энергии турбулентности

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \\ + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (2\mu_t E_{ij} E_{ij} + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$, $C_{3\varepsilon}$ – эмпирические константы; σ_ε – обратное эффективное число Прандтля для ε .

Константа $C_{3\varepsilon}$ зависит от архимедовой силы и определяется как

$$C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|, \quad (9)$$

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

Турбулентная вязкость определяется по выражению

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (10)$$

где C_μ – константа турбулентности; уравнение состояния

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (11)$$

где R – газовая постоянная.

В соответствии с [38–40] можно принять следующие значения:

$$\begin{aligned} C_\mu = 0.0373; \quad \sigma_k = 1.0; \quad \sigma_\varepsilon = 1.3; \\ C_{1\varepsilon} = 1.176; \quad C_{2\varepsilon} = 1.92. \end{aligned} \quad (12)$$

Значения коэффициентов C_μ и $C_{1\varepsilon}$ уточняли в ходе расчетов для наилучшего приближения к результатам измерений дефицита скорости [10, 16].

При задании граничных условий для расчета на поверхностях значение постоянной Кармана α принимали равным 0.39 на лопастях ветроустановки и 0.42 на подстилающей поверхности в соответствии с [56, 57]. Данный подход позволяет учитывать такие особенности, как градиент давления, вращение лопастей ветроколеса и шероховатость подстилающей поверхности.

Далее приведены граничные условия для стационарного АПС:

$$\begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = 0; \\ \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} = 0; \quad C = 0. \end{aligned} \quad (13)$$

Во входном сечении расчетного туннеля задавали вертикальные профили скорости (использовались летние профили) и температуры потока в программе StarCCM как пользовательские функции. Профиль скорости ветра принимали изменяющимся по высоте по степенному закону (1), профиль температуры – по линейному, исходя из сезонных градиентов. На нижней границе расчетного туннеля известны температура и шероховатость поверхности. В выходном сечении принимали граничное условие давления на выходе расчетного туннеля, которое определяет условие истечения, основанное на давлении потока на выходе, и обычно используется, когда на входе задана скорость (или расход) или более высокое давление. Профиль давления задавали однородным. Так как высота расчетной области составляла 200 м, давление по высоте изменялось незначительно.

Систему уравнений (2)–(11) с граничными условиями (13) и константами (12) решали относительно составляющих скорости, температуры и турбулентных характеристик.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ АПС В ОКРЕСТНОСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ

На рис. 3 представлена геометрическая модель ветротурбины в масштабе 1 : 1, на рис. 4 – ее расчетная область с нанесенной сеткой. Предварительно были произведены расчеты аэродинамического следа за ветротурбиной для сеток с базовыми размерами ячеек 3, 5 и 6 м, а также полигедральной и триммерной сеток. Для дальнейших расчетов была выбрана полигедральная сетка с базовым размером ячеек 5 м. Размеры сетки выбирали такими, чтобы обеспечить достаточную точность и минимизацию затрат машинного времени на расчет. С использованием встроенных возможностей программы была выполнена проверка шагов сетки пристеночной функцией y^+ и качества сетки функцией качества ячеек. При этом использовали стандартную пристеночную функцию [58]. Для лопасти, втулки и башни сетку на поверхности адаптировали для выполнения условия $30 < y^+ < 100$. Так как полигедральная сетка нерегулярна, применяли призматические слои на поверхности для обеспечения большей точности расчета. На поверхности лопастей, втулки, башни, поверхности земли проводили сгущение сетки. Для вращающихся частей ветротурбины создавали движущуюся



Рис. 3. Геометрическая модель ветротурбины с расчетным туннелем

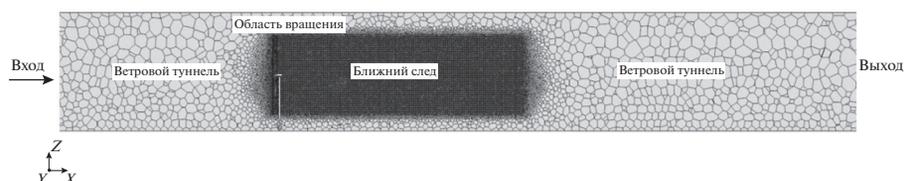


Рис. 4. Расчетная область ветротурбины с нанесенной сеткой

юся сетку, для которой задавали новую локальную систему координат.

При диаметре ветроколеса турбины V126-3.45 126 м длина расчетной области x составила 500 м до ветротурбины и 1000 м после ветротурбины, высота и ширина расчетной области были равны 200 м при минимальном размере сетки 0.01 м и максимальном размере 5.0 м. Для моделирования турбулентного следа была выделена расчетная область – туннель длиной 500 м, где также проводилось измельчение сетки для более точного расчета ближнего следа. Время процесса вращения ветротурбины составило 100 с, шаг по времени – 0.01 мс.

На рис. 5 показан ближний след за ветротурбиной. На рисунке видно, что структура аэродинамического следа в общем виде повторяет структуру, выявленную экспериментально и описанную в [16]. Отчетливо выделяется винтообразная структура вихря.

В целом результаты расчетов дефицита скорости за ветротурбиной, представленные на рис. 6, демонстрируют хорошее согласие с результатами исследований [10]. Таким образом, потенциальный вихревой след, генерируемый ветротурбиной, может распространяться на расстояние до 1000 м. В связи с этим прогнозирование направления и размеров вихревого следа является важной задачей математического моделирования при проектировании и эксплуатации ветропарков. Наилучшее приближение к аналитической зависимости при $n = -\frac{2}{3}$ показали расчеты с помощью $k-\epsilon$ -модели турбулентности при базовом размере сетки 5 м. Погрешность расчетов составила 5%.

На рис. 7 показано вертикальное продольное сечение воздушного потока в центральной плос-

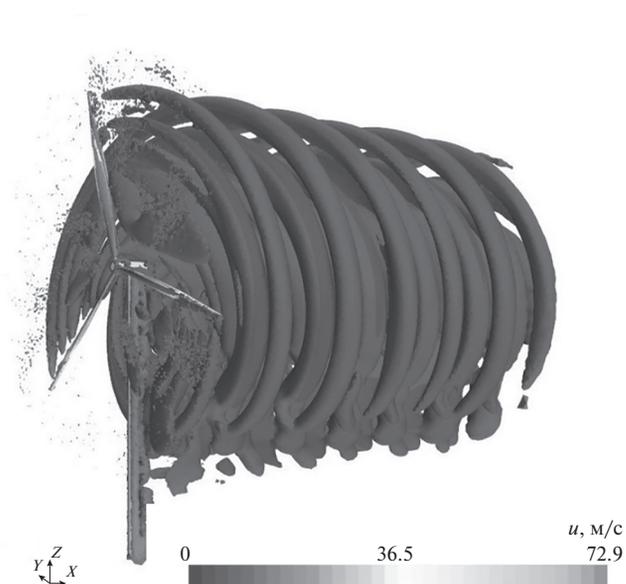


Рис. 5. Ближний след за ветротурбиной

кости с полем скоростей. На рисунке отчетливо видны вихри, образующиеся за ветротурбиной, которые распадаются на удалении 8 калибров. Также можно отметить некоторое расширение следа вниз по течению на общем фоне ослабления. Полученные результаты коррелируют с данными [4, 10, 21]. Изменение размеров расчетной области до 300×300 м в поперечном сечении и 4000 м в продольном направлении не оказало существенного влияния на результаты расчета в представленной области и не привело к их заметному изменению.

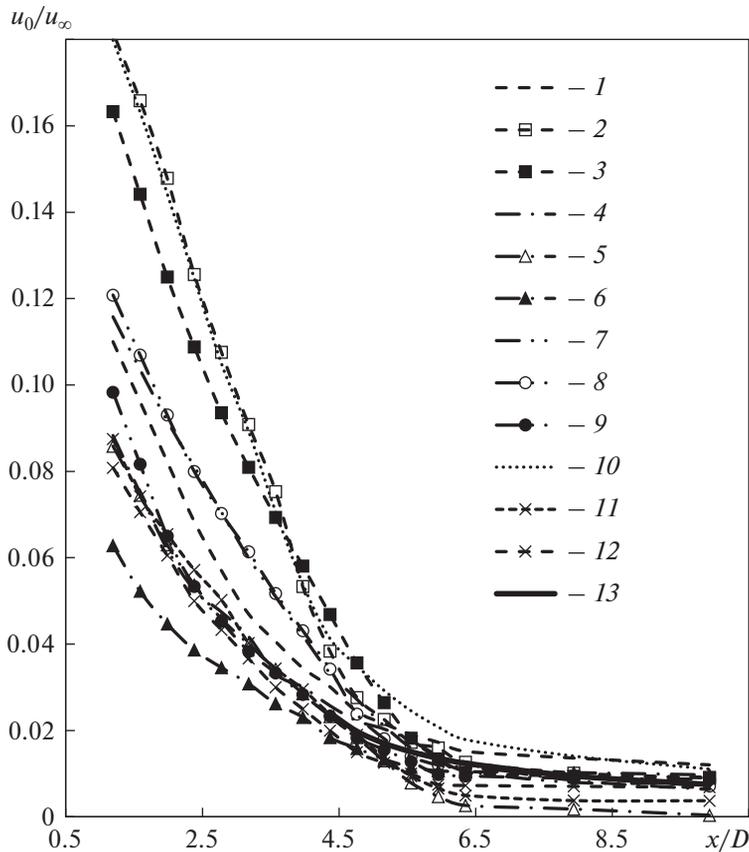


Рис. 6. Дефицит скорости за ветротурбиной, рассчитанный с использованием разных моделей турбулентности. Базовый размер сетки, м: 1, 4, 7, 10 – 3; 2, 5, 8, 11 – 5; 3, 6, 9, 12 – 6; 13 – $n = -\frac{2}{3}$



Рис. 7. Вертикальное продольное сечение в центральной плоскости за ветротурбиной с полем скоростей

На рис. 8 показаны профили скорости воздушного потока на различном удалении от ветротурбины. Ближний след характеризуется высокой турбулентностью (см. рис. 7) и наибольшим изменением градиента скорости (см. рис. 8). Дальний след имеет менее выраженные турбулентные вихри. На его длину влияют такие характеристики ветротурбины, как коэффициент тяги и мощность, в отличие от ближнего следа, на который определяющее влияние оказывает строение ветроколеса. Зависимости, представленные на рис. 8, показывают удовлетворительное восстановление

профиля скорости потока примерно на расстоянии 1000 м. Восстановление происходит довольно медленно, но более быстро, чем указано в работах [4, 10, 21]. На расстоянии 500 м за турбиной еще остается возмущение потока, которое может влиять на работу турбины, стоящей следом. Погрешность расчетов составила 5%, безразмерный коэффициент сопротивления трения на поверхности лопасти равен $2 \times 10^{-3} - 10.8$. Эти результаты удовлетворительно согласуются с данными, приведенными в [59, 60].

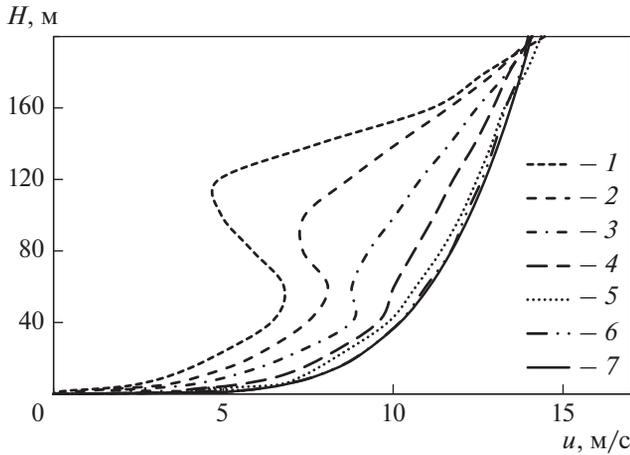


Рис. 8. Профиль скорости за ветротурбиной.
 x , м: 1 – 50; 2 – 100; 3 – 300; 4 – 500; 5 – 800; 6 – 1000;
 7 – $u_{\text{вх}}$

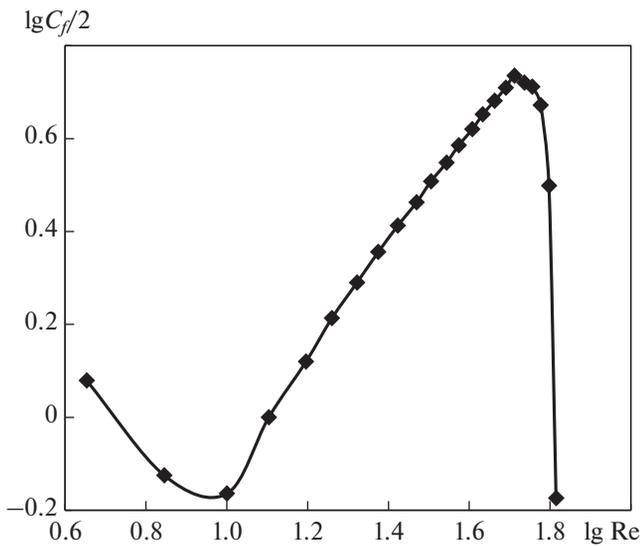


Рис. 9. Зависимость сопротивления трения от числа Рейнольдса вдоль поверхности лопасти ветротурбины V126-3.45

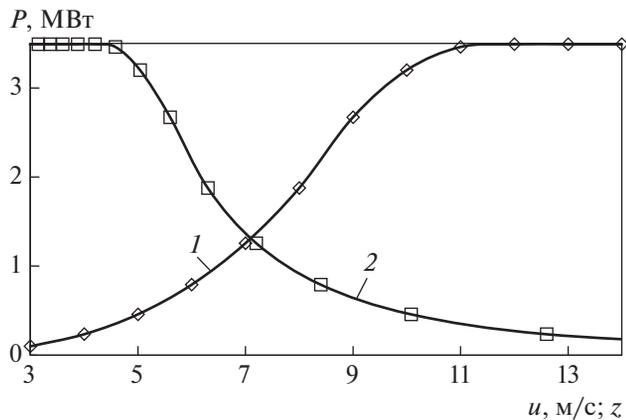


Рис. 10. Зависимость мощности турбины P от скорости ветрового потока 1 [59] и быстроходности 2

На рис. 9 показана зависимость коэффициента сопротивления трения C_f от числа Рейнольдса вдоль поверхности лопасти ветротурбины в логарифмических координатах, полученная в результате моделирования.

Первоначальное снижение сопротивления трения с увеличением числа Рейнольдса Re в пределах $1.5 \times 10^7 < Re < 3.4 \times 10^7$ свидетельствует о том, что сила сопротивления пропорциональна скорости u , что характерно для ламинарного режима течения. Далее коэффициент сопротивления трения возрастает по мере увеличения числа Рейнольдса в области $3.4 \times 10^7 < Re < 1.7 \times 10^8$, что объясняется стремлением ламинарного режима течения на данном участке к переходному режиму и дальнейшему образованию завихрений на концах лопастей. Затем в узкой зоне чисел Рейнольдса $1.7 \times 10^8 < Re < 1.97 \times 10^8$ коэффициент C_f резко снижается. В этой области пограничный слой становится турбулентным. Можно отметить, что турбулентный пограничный слой обладает большей сопротивляемостью отрыву. Поэтому точка отрыва, уже турбулентного пограничного слоя, резко смещается вниз по потоку.

Полученная в результате численного исследования аэродинамическая характеристика лопасти ветротурбины V126-3.45 Ульяновского ветропарка позволяет проводить сравнение с другими возможными вариантами конструкций лопастей при поиске оптимальных технических решений и режимов работы ветроустановки.

При заданных скоростях вращения ротора ветротурбины оптимальный режим работы ветроустановки характеризуется наибольшим коэффициентом использования энергии ветра – критерием Бетца, который, в свою очередь, связан с коэффициентом сопротивления трения на поверхности лопасти ветроколеса, характеризующим ее аэродинамическое совершенство.

На рис. 10 представлена зависимость мощности P турбины V126-3.45 от скорости ветрового потока u и быстроходности ветротурбины z . Ротор ветротурбины вращается с постоянной угловой скоростью 0.4 рад/с. Быстроходность при скорости набегающего потока 12 м/с составляет 4.5, мощность – 3.5 МВт, коэффициент использования энергии ветра – 0.49 [59]. Однако теоретически существует возможность его повышения, что отражено в [15].

В рассматриваемых условиях изменение температуры воздуха по высоте расчетной области составляет 0.5°C , что говорит о незначительном влиянии единичной ветротурбины на температуру воздуха в ее окрестности.

ВЫВОДЫ

1. Для оптимальной работы ветропарка турбины должны размещаться с учетом затухания турбулентного следа от каждой из них, которое происходит медленно, и дефицита скорости, который сохраняется на удалении 8 калибров от ветротурбины. При скорости набегающего потока на уровне оси ветротурбины 12 м/с скорость в следе на удалении 0,5, 1,0, 3,0, 5,0, 8,0 калибров составляет 4,8, 9,0, 11,0, 11,8, 11,5 м/с соответственно. Восстановление профиля происходит на расстоянии 8 калибров от установки. Следующая по ходу установка не должна попадать в ближний след впереди стоящей турбины и располагаться на расстоянии более 1000 м от нее.

2. На эффективность работы ветрогенератора оказывают влияние конструкция ветроколеса, аэродинамические характеристики лопасти, вторичные вихри от вращения ветроколеса, порывы ветра и след за предыдущей по ходу ветра ветротурбиной. Полученные данные, такие как дефицит скорости в следе за ветротурбиной, коэффициент сопротивления трения на лопатке (2×10^{-3} –10,8), мощность и энергия ветрового потока, позволяют сделать вывод о возможности повышения коэффициента использования энергии ветра единичных турбин благодаря оптимизации их взаимного расположения на территории ветропарка.

3. Предлагаемый подход к исследованию и полученные результаты дают возможность оптимизировать работу как отдельной ветроэнергетической установки, так и ветропарка в целом и будут использованы для последующего создания цифрового двойника Ульяновского ветропарка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Безруких П.П.** Ветроэнергетика: справ. и метод. пособие. М.: Изд. дом "Энергия", 2010.
2. **Wu Y.T., Porté-Agel F.** Large-eddy simulation of wind-turbine wakes: Evaluation of turbine parametrizations // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. V. 138. No. 3. P. 345–366. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9569-x>
3. **Large eddy simulation of wind farm aerodynamics: A review** / D. Mehta, A.H. Zuijlen, B. Koren, J.G. Holierhoek, H. Bijl // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2014. V. 133. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.07.002>
4. **Bastankhan M., Porté-Agel F.** A new analytical model for wind-turbine wakes // *Renewable Energy*. 2014. V. 70. P. 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.002>
5. **Basu S., Porté-Agel F.** Large-eddy simulation of stably stratified atmospheric boundary layer turbulence: A scale-dependent dynamic modeling approach // *J. Atmos. Sci.* 2005. V. 63. No. 8. P. 2074–2091. <https://doi.org/10.1175/JAS3734.1>
6. **Anisotropy of turbulence in wind turbine wakes** / R. Gómez-Elvira, A. Crespo, E. Migoya, J. Manuel, F. Hernández // *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 2005. V. 93. No. P. 797–814. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.08.001>
7. **Numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics** / M.J. Churchfield, S. Lee, J. Michalakes, P.J. Moriarty // *J. Turbul.* 2012. V. 13. No. 14. P. 1–32. <https://doi.org/10.1080/14685248.2012.668191>
8. **On atmospheric stability in the dynamic wake meandering model** / R.E. Keck, M. deMaré, M.J. Churchfield, S. Lee, G. Larsen, H.A. Madsen // *Wind Energy*. 2014. V. 17. No. 11. P. 1689–1710. <https://doi.org/10.1002/we.1662>
9. **A numerical study of atmospheric and wake turbulence impacts on wind turbine fatigue loadings** / S. Lee, M.J. Churchfield, P.J. Moriarty, J. Jonkman, J. Michalakes // *J. Solar Energy Eng.* 2013. V. 135. No. 3. P. 031001. <https://doi.org/10.1115/1.4023319>
10. **Окулов В.Л.** Роль физического моделирования в развитии роторной аэродинамики (обзор) // *Теплофизика и аэромеханика*. 2018. № 25 (1). С. 1–22.
11. **Bastankhah M., Porté-Agel F.** Experimental and theoretical study of wind turbine wakes in yawed conditions // *J. Fluid Mech.* 2016. V. 806. P. 506–541. <https://doi.org/10.1017/jfm.2016.595>
12. **Dufresne N.P., Wosnik M.** Velocity deficit and swirl in the turbulent wake of a wind turbine // *J. Marine Technol. Soc.* 2013. V. 47. No. 4. P. 193–205. <https://doi.org/10.4031/MTSJ.47.4.20>
13. **Natural snowfall reveals large-scale flow structures in the wake of a 2.5-MW wind turbine** / J. Hong, M. Toulou, L.P. Chamorro, M. Guala // *Nature Commun.* 2014. V. 5. No. 1. P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/ncomms5216>
14. **PIV and LDA measurement soft the wake behind a wind turbine model** / I. Naumov, R. Mikkelsen, J. Sorensen, V. Okulov // *J. Phys.: Conf. Ser.* 2014. V. 524. No. 1. P. 012168. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/524/1/012168>
15. **Эффективность работы роторов ветрогенераторов, оптимизированных по методу Глауэрта и Беца** / В.Л. Окулов, Р.Ф. Миккельсен, И.В. Литвинов, И.В. Наумов // *ЖТФ*. 2015. Т. 85. № 11. С. 60–64. <https://doi.org/10.1134/S1063784215110237>
16. **Наумов И.В., Миккельсен Р.Ф., Окулов В.Л.** Оценка дальности распространения следа и уровня его пульсаций за роторами ветрогенераторов // *Теплоэнергетика*. 2016. № 3. С. 54–60. <https://doi.org/10.1134/S0040363616030073>
17. **Bastanhaha M., Porté-Agel F.** Wind farm power optimization via yaw angle control: A wind tunnel study // *J. Renewable Sustainable Energy*. 2019. V. 11. No. 2. P. 023301. <https://doi.org/10.1063/1.5077038>
18. **Abdel Salam A.M., Velraj R.** Numerical simulation of atmospheric boundary layer and wakes of horizontal-axis wind turbines // *J. Energy South Africa*. 2014. V. 25. No. 1. P. 44–50. <https://doi.org/10.17159/2413-3051/2014/v25i1a2687>
19. **Abkar M., Porté-Agel F.** Effect of atmospheric stability on wind turbine wakes: A simulation study of large eddies // *Phys. Fluids*. 2015. V. 27. P. 035104. <https://doi.org/10.1063/1.4913695>

20. **Крапошин М.В., Стрижак С.В.** Предметно-ориентированная библиотека SOWFA для решения прикладных задач ветроэнергетики // Труды ИСП РАН. 2018. Т. 30. Вып. 6. С. 259–274.
21. **Vermeer L.J., Sorensen J.N., Crespo A.** Wind turbine wake aerodynamics // Prog. Aero. Sci. 2003. V. 39. No. 6. P. 467–510. [https://doi.org/10.1016/S0376-0421\(03\)00078-2](https://doi.org/10.1016/S0376-0421(03)00078-2)
22. **Kasmi A.E., Masson C.** An extended model for turbulent flow through horizontal-axis wind turbines // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2008. V. 96. No. P. 103–122. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.03.007>
23. **Стрижак С.В.** Математическое моделирование параметров потока одиночной ветроэлектрической установки // Науч. вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19. № 6. С. 176–184.
24. **Беляков П.Ю., Рябов Д.Ю.** Математическая модель для исследования характеристик и режимов работы ветроэнергетической установки с крыльчатым ветроприемником // Электротехнические комплексы и системы управления. 2007. № 1. С. 55–58. www.v-itc.ru/electrotech (Дата обращения: 21.06.2022.)
25. **Hewitt S., Margetts L., Revell A.** Building a digital wind farm // Arch. Computat. Methods Eng. 2017. V. 25. P. 879–899. <https://doi.org/10.1007/s11831-017-9222-7>
26. **Lu H., Porté-Agel F.** Large-eddy simulation of a very large wind farm in a stable atmospheric boundary layer // Phys. Fluids. 2011. V. 23. No. 6. P. 065101. <https://doi.org/10.1063/1.3589857>
27. **A large-eddy simulation of wind-plant aerodynamics / M.J. Churchfield, S. Lee, P.J. Moriarty, L.A. Martinez, S. Leonardi, G. Vijayakumar, J.G. Brasseur // 50th AIAA Aerospace Sci. Meeting. Nashville, Tennessee, 9–12 Jan. 2012.** <https://doi.org/10.2514/6.2012-537>
28. **Calaf M., Meneveau C., Meyers J.** Large eddy simulation study of fully developed wind-turbine array boundary layers // Phys. Fluids. 2010. V. 22. No. 1. P. 1–16. <https://doi.org/10.1063/1.3291077>
29. **Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms / F. Porté-Agel, Y.T. Wu, H. Lu, R.G. Conzemius // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2011. V. 99. No. 4. P. 154–168.** <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.01.011>
30. **Verhulst C., Meneveau C.** Large eddy simulation study of the kinetic energy entrainment by energetic turbulent flow structures in large wind farms // Phys. Fluids. 2014. V. 26. No. 2. P. 025113. <https://doi.org/10.1063/1.4865755>
31. **Козин А.А., Кирпичникова И.М.** Анализ группы вертикально-осевых ветроустановок в программном комплексе MATLAB // Альтернативная энергетика и экология (ИСИЭЭ). 2014. № 5. С. 45–49.
32. **Chock G., Cochran L.** Modeling of topographic wind speed effects in Hawaii // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2005. V. 93. No. 8. P. 623–638. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2005.06.002>
33. **Hansen M.O.L.** Aerodynamics of wind turbines. L.: Earthscan, 2008.
34. **Лыкосов В.Н.** Моделирование процессов взаимодействия атмосферного пограничного слоя с неоднородной подстилающей поверхностью // Школа молодых ученых и междунар. конф. по числительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде “CITES-2017”. г. Таруса; Звенигород, 28 августа–7 сентября 2017. <http://www.scert.ru/conference/cites2017/> (Дата обращения: 21.06.2022.)
35. **Воронцов П.А.** Турбулентность и вертикальные токи в пограничном слое атмосферы. М.: Гидрометеоиздат, 1966.
36. **Кожевников В.Н., Беданок М.К.** Нелинейная многослойная модель обтекания произвольного профиля // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 1993. Т. 24. № 6. С. 546–556.
37. **Зилитинкевич С.С., Лайхтман Д.Л.** О замыкании системы уравнений турбулентного движения для пограничного слоя атмосферы // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. Вып. 167. Физика пограничного слоя атмосферы / под ред. Д.Л. Лайхтмана. Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
38. **Численное моделирование пограничного слоя атмосферы с учетом ее стратификации / А.И. Купцов, Р.Р. Акберов, Д.Я. Исламхузин, Ф.М. Гимранов // Фундаментальные исследования. 2014. № 9–7. С. 1452–1460.** <https://fundamental-research.ru/ru/article/view?id=35083> (Дата обращения: 17.05.2022.)
39. **Alinot C., Masson C.** Aerodynamic simulations of wind turbines operating in atmospheric boundary layer with various thermal stratifications // ASME Conf. Proc. 2002. V. 2002. No. 7476X. P. 206–215. <https://doi.org/10.1115/WIND2002-42>
40. **Alinot C., Masson C.** K-ε model for the atmospheric boundary layer under various thermal stratifications // J. Sol. Energy Eng. 2005. V. 127. No. 4. P. 438–443. <https://doi.org/10.1115/1.2035704>
41. **Wan F., Porté-Agel F.** Large-eddy simulation of stably-stratified flow over a steep hill // Boundary-Layer Meteorol. 2011. V. 138. No. 3. P. 367–384. <https://doi.org/10.1007/s10546-010-9562-4>
42. **Sagaut P.** Large eddy simulation for incompressible flows. Berlin; Heidelberg: Springer-Verlag, 2006.
43. **Large-eddy simulation of spectral coherence in a wind turbine wake / A. Jimenez, A. Crespo, E. Migoya, J. Garcia // Environ. Res. Lett. 2008. V. 3. No. 1. P. 015004.** <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/1/015004>
44. **Martnez-Tossas L.A., Churchfield M.J., Leonardi S.** Large eddy simulations of the flow past wind turbines: actuator line and disk modeling // Wind Energy. 2014. V. 18. No. 6. P. 1–18. <https://doi.org/10.1002/we.1747>
45. **Multiscale approach to micro-siting of wind turbines / A. Rasheed, K. Sorli, R. Holdahl, T.A. Kvamsdal // Energy Proc. 2012. V. 14. P. 1458–1463.** <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.1117>
46. **O’Sullivan J.P., Pecnik R., Iaccarino G.** Investigating turbulence in wind flow over complex terrain // Stanford CTR Summer Program. Stanford University, 24 June–20 July 2010. P. 129–139. <http://hdl.handle.net/2292/19204>
47. **Blocken B.** 50 years of computational wind engineering: Past, present and future // J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 2014. V. 129. P. 69–102. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.008>
48. **Calaf M., Meneveau C., Meyers J.** Large eddy simulation of fully developed wind-turbine array boundary

- layers // Phys. Fluids. 2010. V. 22. No. 1. P. 1–16.
<https://doi.org/10.1063/1.3291077>
49. **Martnez-Tossas L.A., Churchfield M.J., Leonardi S.** Large eddy simulations of the flow past wind turbines: actuator line and disk modeling: LES of the flow past wind turbines: actuator line and disk modeling // Wind Energy. 2014. V. 18. No. 6. P. 1047–1060.
<https://doi.org/10.1002/we.1747>
50. **Recommendations** for the distribution of body force in wind turbine drive line modeling on simulation-type grids with large vortices / P.K. Jha, M.J. Churchfield, P.J. Moriarty, S. Schmitz // J. Sol. Energy Eng. 2014. V. 136. No. 3. P. 031003.
<https://doi.org/10.1115/1.4026252>
51. **Deep** learning for wake modeling of wind turbines / S. Pawar, A. Sharma, G. Vijayakumar, C.J. Bay, S. Yellapantula // Proc. of the 11th Intern. Conf. on Computational Fluid Dynamics (ICCFD11). Maui, Hawaii, 11–15 July. 2022.
52. www.globalwindatlas.info.api.vortexfd.com (Дата обращения: 03.05.2022.)
53. **Твайделл Д., Уэйр А.** Возобновляемые источники энергии. М.: Энергоатомиздат, 1990.
54. <https://www.ecmwf.int/> (Дата обращения: 03.05.2022.)
55. **ГОСТ Р 54084-2010.** Модели атмосферы в пограничном слое на высотах от 0 до 3000 м для аэрокосмической практики. Параметры. М.: Стандартинформ, 2013.
56. **Ковальногов Н.Н.** Прикладная механика жидкости и газа. Ульяновск: УлГТУ, 2010.
57. **Математическое** моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя в окрестности ветропарков / В.Н. Ковальногов, Ю.А. Хахалев, Л.В. Хахалева, Е.В. Цветова // Автоматизация процессов управления. 2021. № 3(65). С. 33–40.
58. **Снегирёв А.Ю.** Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.
59. <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/1249-vestas-v126-3.45> (Дата обращения: 09.10.2022.)
60. **Управление** обтеканием толстого профиля с вихревой ячейкой со щелевым отсосом воздуха и выбросом в ближний след / С.А. Исаев, П.А. Баранов, М.Ю. Смуров, А.Г. Судаков, А.В. Шебелев // Теплофизика и аэромеханика. 2016. Т. 23. № 5. С. 665–669.

Mathematical Modeling and Numerical Research of the Aerodynamic Wake Behind the Wind Turbine of the Ulyanovsk Wind Farm

M. I. Kornilova^{a, *}, Yu. A. Khakhalev^a, V. N. Kovalnogov^a, A. V. Chukalin^a, and E. V. Tsvetova^a

^a Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027 Russia

*e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru

Abstract—The task of modeling the surface atmospheric boundary layer (ABL) in the wind turbine zone at the location of the Ulyanovsk wind farm is set. Reliable and accurate prediction of the evolution of ABL interacting with a wind farm over a wide range of spatial and temporal scales provides valuable quantitative information about its potential impact on the local meteorological situation and is of great importance for optimizing both the design (placement of turbines) and the operation of wind farms. The main problems of modeling and numerical investigation of the atmospheric boundary layer in combination with a wind turbine are considered. The main modeling problems include: multiscale, accounting for a highly rough inhomogeneous surface, wind irregularity in amplitude, direction and frequency, accounting for convection, solar radiation, stratification and phase transitions and precipitation, turbulence generation, and choice of modeling method and tool. The problem of multiscale research of the ABL–wind turbine system is considered and an overview of computational technologies for solving aerodynamic problems on the scale of one installation and wind farms is given. An analytical review of methods for modeling ABL and its interaction with a wind turbine is carried out. Approaches to the study of ABL based on systems of equations averaged by Reynolds, eddy-resolving models, and direct numerical modeling are considered; their advantages and limitations are given for solving the problem of studying the ABL–wind generator system. The mathematical model of the ABL–wind turbine system is described. The results of mathematical modeling and numerical study of the aerodynamics of the ABL–wind turbine system of the Ulyanovsk wind farm are presented, and numerical data on the attenuation of the aerodynamic wake behind the wind turbine and the restoration of the velocity profile, as well as on the friction resistance on the surface of the wind turbine blade, are obtained and analyzed. The analysis of the results of mathematical modeling of ABL in the wind turbine zone is carried out.

Keywords: wind turbine, mathematical modeling, numerical study, atmospheric boundary layer, turbulence model, friction drag, velocity profile, aerodynamic characteristic