

УДК 533.6.011.6:519.87

DOI

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ И АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ СЛЕДОВ В ОБЛАСТИ ВЕТРОПАРКА

Корнилова М.И., Ковальногов В.Н., Федоров Р.В., Хахалев Ю.А.

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет», Ульяновск,
e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru, kvn@ulstu.ru, chukalin.andrej@mail.ru, ulstu-td-ua@mail.ru

Актуальность исследований атмосферного пограничного слоя в области ветропарков и моделирования аэродинамических процессов обусловлена быстрым развитием ветроэнергетики и, как следствие, возникшей необходимостью обеспечения эффективных режимов работы ветропарков. В данной работе авторами выполнено исследование северной части Ульяновского ветропарка в виде семи ветротурбин горизонтального типа с применением методов математического моделирования и численного анализ. Цель работы – комплексное исследование аэродинамики атмосферного пограничного слоя в области ветропарка для оценки влияния шероховатости подстилающей поверхности на скорость восстановления аэродинамических следов ветротурбин. Рассматриваются особенности развития ближних и дальних аэродинамических следов, представлены результаты численных экспериментов в части расчета дефицита скорости и интенсивности турбулентности. Расчеты выполнялись для условий нейтрального атмосферного пограничного слоя. Для анализа турбулентного течения авторами предложена модификация модели турбулентности $k - \varepsilon$. В качестве инструмента был выбран коммерческий программный CFD пакет Star CCM+ Academic Pack. Выполнена количественная оценка влияния шероховатости подстилающей поверхности на профили скорости и турбулентных характеристик, главным образом турбулентной кинетической энергии и скорости ее диссипации. Авторами отмечено увеличение динамической нагрузки на элементы ветротурбин при повышенной шероховатости подстилающей поверхности, что вызвано дополнительной турбулизацией потока при взаимодействии с поверхностью. Полученные результаты имеют большое значение как для инженеров в области ветротехнологий, так и для исследователей явлений в атмосферном пограничном слое.

Ключевые слова: ветропарк, турбулентность, математическое моделирование, аэродинамика, дефицит скорости, интенсивность турбулентности, шероховатость

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>.

NUMERICAL STUDY OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER AND AERODYNAMIC WAKES IN THE WIND FARM AREA

Kornilova M.I., Kovalnogov V.N., Fedorov R.V., Khakhalev Yu.A.

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk,
e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru, kvn@ulstu.ru, r.fedorov@ulstu.ru, ulstu-td-ua@mail.ru

The relevance of studies of the atmospheric boundary layer in the field of wind farms and modeling of aerodynamic processes is due to the rapid development of wind energy and, as a consequence, the need to ensure efficient operating modes of wind farms. In this work, the authors performed a study of the northern part of the Ulyanovsk wind farm with seven horizontal wind turbines using mathematical modeling and numerical methods. The researchers goal is the comprehensive study of the aerodynamic boundary layer to identify the influence of roughness of the bottom surface on the dynamics of the wind farm and the recovery of the aerodynamic wakes of wind turbines. The features of the development of near and far aerodynamic wakes are considered, and the results of numerical experiments in terms of calculating the velocity deficit and turbulence intensity are presented. Calculations were performed for conditions of a neutral atmospheric boundary layer. An extended modified $k - \varepsilon$ turbulence model was used to analyze the turbulent flow. The commercial CFD software package Star CCM+ Academic Pack was chosen. A quantitative assessment of the influence of bottom surface roughness on the profiles of velocity and turbulent characteristics, mainly turbulent kinetic energy and its dissipation rate, was performed. The authors noted an increase in the dynamic load on wind turbine elements with increased roughness of the bottom surface, which is caused by additional turbulence of the flow when interacting with the surface. The results obtained are of great importance for both wind technology engineers and researchers of atmospheric boundary layer phenomena.

Keywords: wind farm, turbulence, mathematical modeling, aerodynamics, speed deficit, turbulence intensity, roughness

The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-00030, <https://rscf.ru/project/22-19-00030/>.

Ветропарки работают в нижней части атмосферного пограничного слоя, для которой характерна существенная турбулентность. Турбулентность ($Re \approx 10^5$) может привести к повышенным усталостным нагрузкам ветротурбин и преждевремен-

ному выходу их из строя. Для анализа скоростных и турбулентных характеристик воздушного потока необходимо принять во внимание особенности рельефа территории и шероховатость подстилающей поверхности.

Теория аэродинамики одиночной ветротурбины выстроена и хорошо изучена [1; 2] в значительной степени благодаря накопленному опыту аэродинамики воздушных винтов. Ряд исследований посвящен структуре аэродинамических следов отдельных ветротурбин [3-5]. В исследованиях ветропарков и их влияния на атмосферный пограничный слой остается еще ряд не до конца изученных вопросов, например влияние шероховатости поверхности на состояние пограничного слоя атмосферы и аэродинамики ветротурбин. Современные работы в области аэродинамики ветропарков направлены, главным образом, на изучение структуры турбулентных следов ветротурбин и их взаимодействия для поиска оптимальных конфигураций ветропарков [6-8]. Известно [9], что при увеличении шероховатости поверхности происходит изменение структуры пограничного слоя по высоте, что вызвано перемешиванием слоев воздуха, движением потоков импульса и тепла. В связи с этим для поддержания эффективных аэродинамических режимов работы ветропарков необходимо комплексное исследование турбулентных течений в зоне ветропарка с учетом шероховатости подстилающей поверхности.

Натурные исследования атмосферных течений в области ветропарков ограничиваются затратами на дорогостоящие средства измерений и диагностики, невозможностью изменения условий эксперимента. В этой связи большую популярность получают методы вычислительной гидродинамики (от англ. Computational Fluid Dynamic, CFD) на базе математического моделирования и численных подходов, обеспечивающих выполнение экспериментов в контролируемых условиях. К числу таких методов относятся моделирование течений на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (RANS), а также метод вихреразрешающего моделирования (LES). Результаты расчетов CFD-моделей многократно демонстрировали хорошее соответствие с измерениями в аэродинамических трубах [1; 2; 4]. В настоящей работе для моделирования турбулентности авторы применяют метод RANS на основе осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса по причине меньших требований к вычислительным

ресурсам (по сравнению с LES-подходом, как, например, в [8]) и удовлетворительной согласованности полученных результатов с экспериментальными данными. RANS-подход демонстрирует приемлемую точность расчетов при корректной настройке параметров модели [10]. Для этого авторы применяют модифицированную модель турбулентности $k-\varepsilon$ с уточненными значениями кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации, что позволит достоверно учесть влияние сети ветротурбин на атмосферный пограничный слой, а также оценить эффективность управления ветротурбинами в текущих условиях.

Цель работы – комплексное исследование аэродинамики атмосферного пограничного слоя в области ветропарка на основе применения методов математического моделирования и численного анализа, оценка влияния шероховатости подстилающей поверхности на динамику ветропарка и скорость восстановления аэродинамических следов ветротурбин.

Материал и методы исследования

Объектом исследования в данной работе выступает часть Ульяновского ветропарка в виде семи ветротурбин марки V126-3.45 номинальной мощностью 3,5 МВт. На рисунке 1 показаны цифровая 3D-модель ветротурбины V126-3.45 и расчетная область исследуемой части ветропарка для численных экспериментов, включающая семь ветротурбин.

Вращающиеся поверхности ветротурбин (Rotating Part) выделены цветом. Высота ветротурбин составляет 100 м, длина лопасти – 62 м. Размеры ветрового туннеля составили 4*4 км².

В работе рассматривается течение воздушного потока в зоне ветропарка для условий нейтрального атмосферного пограничного слоя. Математическая формулировка включает уравнения движения для составляющих скорости движения воздушного потока, уравнение состояния и граничные условия. Для анализа турбулентных потоков в области ветропарка решено применять RANS-подход. Для связи характеристик осредненного течения с добавочными напряжениями трения используется предложенная авторами расширенная модель турбулентности $k-\varepsilon$ с уточненными значениями кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации. Для описания пристеночных областей (поверхность лопасти ветроколеса, подстилающая поверхность на нижней стенке) применялся метод пристеночных функций.

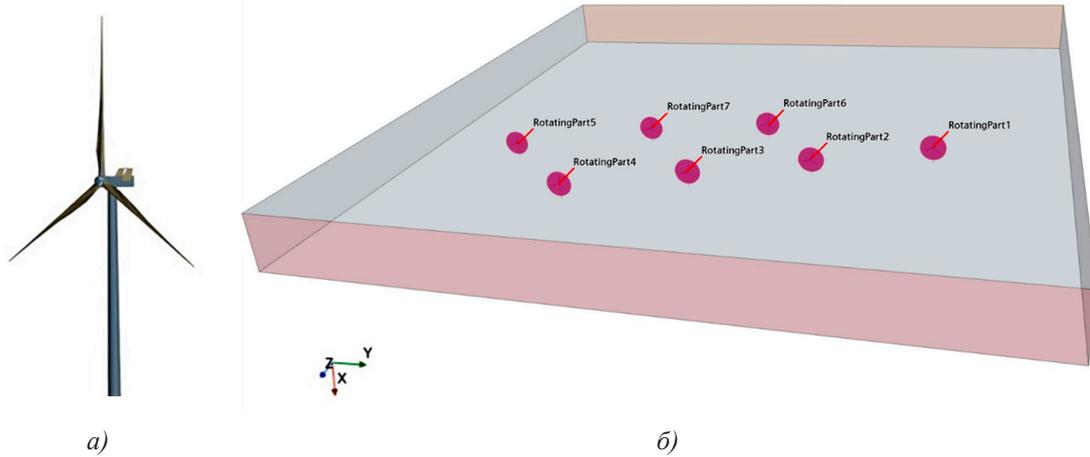


Рис. 1. Цифровая 3D-модель ветротурбины V126-3.45 (а), расчётная область исследуемой части ветропарка (б)

В рамках $k - \varepsilon$ модели турбулентности коэффициент турбулентной вязкости определяется по следующему выражению:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (1)$$

где μ_t – коэффициент турбулентной вязкости, Па·с; C_μ – безразмерная константа турбулентности, принимается равной 0,09; k – кинетическая энергия турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^2$; ε – вязкая диссипация кинетической энергии турбулентности, $\text{м}^2/\text{с}^3$.

Транспортные уравнения для кинетической энергии турбулентности k и скорости диссипации кинетической энергии ε приведены в следующем виде:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho u_j k)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\mu + \frac{\mu_\delta}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon + f_{ik}, \quad (2)$$

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

где ρ – плотность среды, $\text{кг}/\text{м}^3$; x_j – координаты $x, y, z, \text{м}$; u_j – компоненты осредненной скорости ветра $u, v, w, \text{м}/\text{с}$; τ – время, с; μ – динамическая вязкость среды, Па·с; μ_t – турбулентная вязкость, Па·с; P_k – генерация энергии турбулентности, $\text{м}^3/\text{с}^3$; f_{ik} – источниковый член, описывающий влияние ветротурбин на генерацию кинетической энергии, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^3)$; $f_{i\varepsilon}$ – источниковый член, описывающий влияние ветротурбин на диссипацию турбулентной кинетической энергии в потоке, $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с}^4)$.

Принимается, что константы, используемые в $k - \varepsilon$ модели турбулентности, имеют значения: $C_{\varepsilon 1} = 1,44$; $C_{\varepsilon 2} = 1,92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1,3$. Выражения для определения источниковых членов f_{ik} и $f_{i\varepsilon}$ были получены на основе анализа дифференциальных уравнений Рейнольдса [15] и идентификации влияющих факторов.

$$f_{ik} = \frac{\pi \cdot D_0^2 \cdot a}{4} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot (C_d e_D + C_L e_L) \cdot \left(\alpha_k \cdot \frac{\bar{u}_i^3}{2} - \alpha'_k \cdot \bar{u}_i \cdot k \cdot \zeta \cdot \frac{x}{D_0} \right), \quad (4)$$

$$f_{i\varepsilon} = \beta_\varepsilon \frac{\varepsilon}{k} f_{ik} = \beta_\varepsilon \cdot \frac{\pi \cdot D_0^2 \cdot a}{4} \cdot \rho \cdot \zeta \cdot (C_d e_D + C_L e_L) \cdot \left(\alpha_k \cdot \frac{\varepsilon}{k} \cdot \frac{\bar{u}_i^3}{2} - \alpha'_k \cdot \bar{u}_i \cdot \varepsilon \cdot \zeta \cdot \frac{x}{D_0} \right), \quad (5)$$

где D_0 – диаметр ветроколеса, м; a – плотность ветротурбин на территории ветропарка, $\text{м}^2/\text{м}^3$; ζ – коэффициент заполнения ветропарка, определяется расположением и количеством ветротурбин; 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; α_k – доля средней кинетической энергии потока, которая преобразовалась в турбулентную кинетическую энергию из-за действия ветротурбин; α'_k – доля диссипации турбулентной кинетической энергии из-за каскадного переноса энергии в аэродинамическом следе ветротурбин.

Значение констант модели α_k , α'_k , β_e проводилось с использованием алгоритмов оптимизации и серии тестовых вычислительных экспериментов для наилучшего приближения к результатам измерений [1; 2; 8].

Для проведения вычислительных экспериментов использовалось коммерческое программное обеспечение Star-CCM+ Academic Pack. Эксперименты выполнялись на компьютерной модели в масштабе 1:100. Для распространения результатов модели на реальный ветропарк использовались подходы из теории подобия. Численное исследование выполнено на сгенерированной расчетной сетке с многогранными ячейками. Общее количество расчетных ячеек многогранной сетки составило 14,9 млн штук.

Граничные условия настраивались по стандартной схеме расчета [5] с уточнениями значения постоянной Кармана a , которую принимали равной 0,39 на лопастях ветроустановки и 0,42 на подстилающей поверхности. Скорость ветра профильная, описываемая степенным законом для летнего периода. На уровне ступицы ветротурбины величина скорости составила 8 м/с. Атмосферная турбулентность задана 5%. Все ветротурбины ориентированы перпендикулярно направлению потока, количество оборотов составило 10 об./мин. согласно режимному графику.

Результаты исследования и их обсуждение

Выполнена серия расчетов при различных значениях шероховатости подстилающей поверхности z . Шероховатость характеризует тип поверхности: $z = 0,003$ м для плоских равнинных поверхностей; $z = 0,03$ м для открытых аграрных территорий, редколесья; $z = 0,3$ м для лесных массивов.

Моделирование ветропарка производилось на достаточном времени для обеспечения квазистационарных условий течения и статистической сходимости результатов. Адекватность полученного численного решения подтверждается сходимостью расчетов, невязки без колебаний, ограничением по величине. Верификация результатов

производилась по известным литературным и экспериментальным данным [1; 2; 8]. Погрешность расчетов не превысила 8%. Общее время счета задачи составило 90 секунд, шаг по времени задавался $dt = 0,01$ с.

В ходе расчета были получены поля осредненных и мгновенных величин: скорости и интенсивности турбулентности.

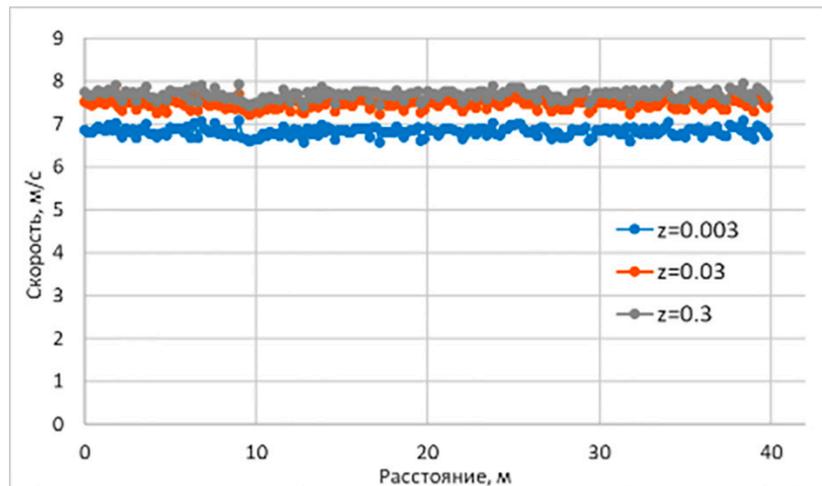
По мере обтекания очередной ветротурбины наблюдается местное падение скорости. На рисунке 2 показаны рассчитанные контуры усредненной по времени скорости потока на уровне ступицы ветротурбин при различной шероховатости подстилающей поверхности.

Попадая в область вращения ветроколеса, характер движения воздушного потока изменяется. При обтекании ветротурбин происходит турбулизация потока, аэродинамические следы имеют форму винтовой спирали. Отмечена извилистость следов ветряных турбин. Отбирая энергию набегающего потока, ротор ветротурбины тормозит его, и в аэродинамическом следе образуется характерный провал скорости, кроме этого, в данной зоне наблюдались наибольшие значения уровня турбулентности потока (рис. 2, 3).

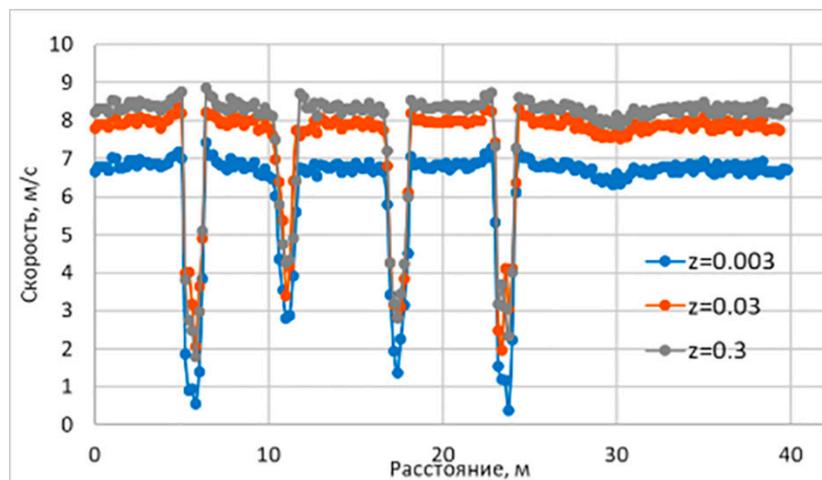
Результаты расчетов демонстрируют несимметричное распределение профиля средней скорости и, следовательно, среднего сдвига в следе турбины. Это объясняется неоднородным (логарифмическим) профилем скорости набегающего потока.

Характер движения воздушных потоков на территории ветропарка нестационарный и турбулентный. Результаты в части расчета интенсивности турбулентности воздушного потока в окрестности ветротурбин при различной шероховатости подстилающей поверхности приведены на рисунке 3.

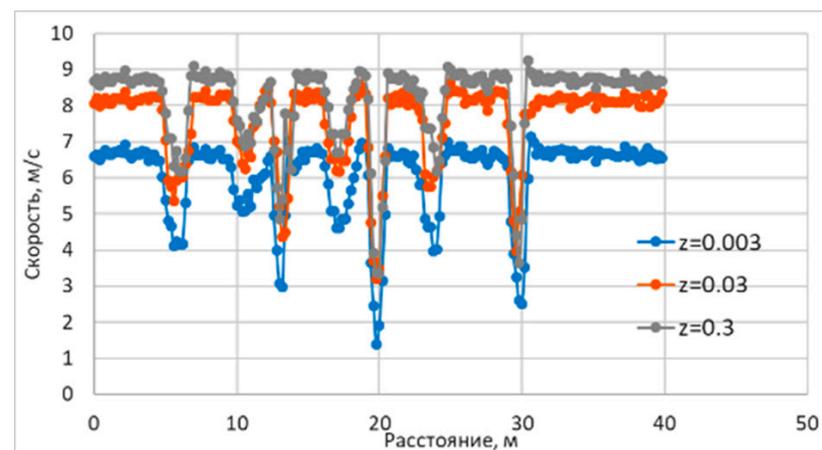
В случаях с более высокой шероховатостью подстилающей поверхности следы восстанавливались несколько быстрее с расстоянием вниз по течению. Так, при шероховатости подстилающей поверхности $z = 0,3$ профиль скорости восстанавливается на 18% быстрее, чем при наименьшем рассматриваемом значении шероховатости $z = 0,003$. Увеличение шероховатости подстилающей поверхности способствовало увеличению интенсивности турбулентности и вертикальному перемешиванию воздушных потоков, что приводило к более быстрому восстановлению аэродинамических следов ветротурбин. Помимо более высокой интенсивности турбулентности, извилистые следы в нестабильных случаях также могут объяснить более плавные профили следа.



а)

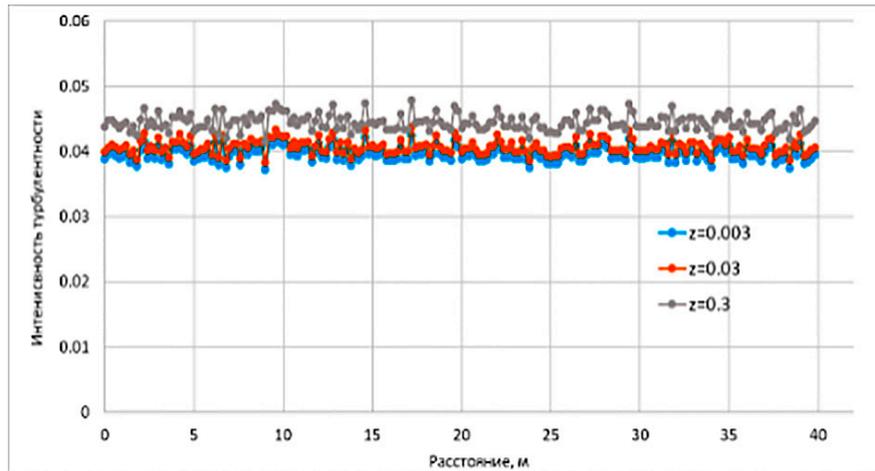


б)

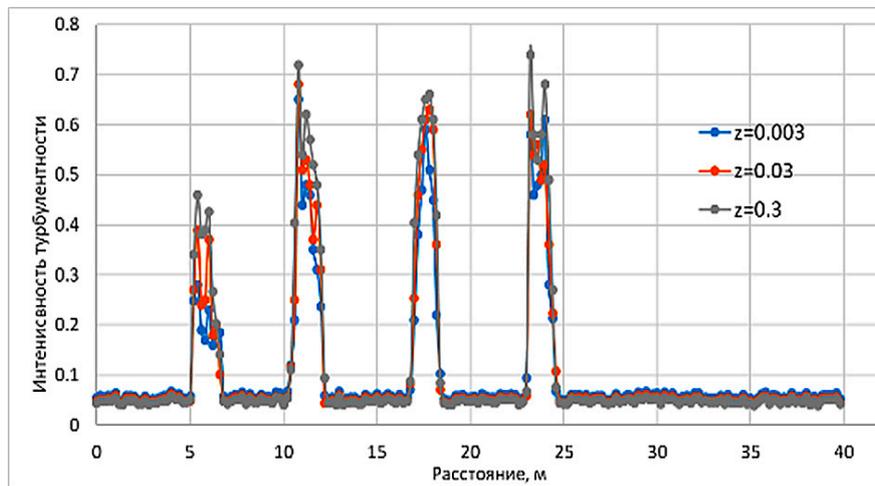


в)

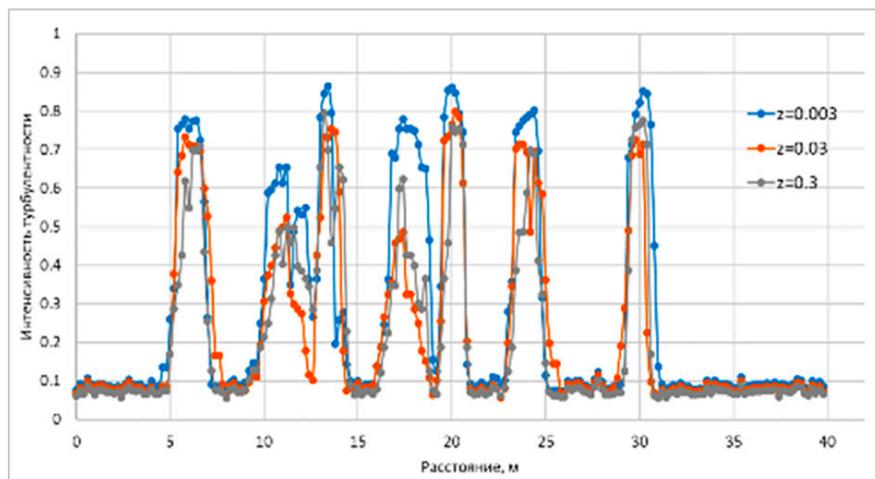
Рис. 2. Усредненная по времени скорость воздушного потока на уровне ступиц ветротурбин при различной шероховатости подстилающей поверхности: до ветротурбин (а), после первых четырех по потоку ветротурбин (б), после всех ветротурбин на расстоянии $2D$ (D – диаметр ветроколеса) (в)



а)



б)



в)

Рис. 3. Интенсивность турбулентности воздушного потока на уровне ступиц ветротурбин при различной шероховатости подстилающей поверхности: до ветротурбин (а), после первых четырех по потоку ветротурбин (б), после всех ветротурбин на расстоянии $2D$ (D – диаметр ветроколеса) (в)

Однако при сложной конфигурации ветропарка повышенный уровень турбулентности может приводить к чрезмерным механическим нагрузкам на элементы нижестоящих ветротурбин, а дефицит скорости потока не позволит работать ветротурбинам в режиме максимальной выработки. Поэтому восстановление аэродинамического следа до состояния невозмущенного потока имеет ключевое значение для эксплуатации крупных ветропарков. В рассматриваемом случае расположение ветротурбин оптимальное, так как попадания ветротурбин в области высокой турбулентности воздушных масс не наблюдалось. Дефицит скорости является наибольшим вблизи ветротурбины и становится меньше по мере того, как след расширяется и увлекает окружающий воздух. Тем не менее эффект следа все еще заметен даже на расстояниях, достигающих 11D (D-ветроколеса).

Заклучение

В работе выполнено моделирование и численное исследование атмосферного пограничного слоя в окрестности части Ульяновского ветропарка, состоящего из семи ветротурбин. В работе использовались усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) для расчета, замыкание системы уравнений реализовано с использованием модифицированной $k-\epsilon$ модели турбулентности.

RANS-подход позволил весьма точно смоделировать аэродинамические процессы в области ветропарка. Выявлено, что увеличение шероховатости подстилающей поверхности способствует увеличению интенсивности турбулентности и приводит к более быстрому восстановлению аэродинамических следов ветротурбин. Результаты, полученные при моделировании, находятся в приемлемом согласии с известными литературными и экспериментальными данными. Погрешность расчетов не превысила 8%.

В будущих исследованиях авторы намерены рассмотреть влияние осадков и многофазных воздушных потоков на эффективность работы ветропарков. Понимание аэродинамики воздушных потоков в области ветропарков позволит корректно прогнозировать производство электроэнергии, а также разрабатывать эффективные стратегии управления для снижения механических нагрузок на элементы ветротурбин.

Список литературы

1. Hansen M.O. L. Aerodynamics of Wind Turbines. Second Edition. Printed and bound in the UK by TJ International. Padstow, 2008. 192 p.
2. 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.
3. Окулов В.Л. Роль физического моделирования в развитии роторной аэродинамики // Теплофизика и аэромеханика. 2018. Т. 25, № 1. С. 1–22.
4. Стрижак С.В. Математическое моделирование параметров течения одиночной ветроэлектрической установки // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 6. С. 176–184.
5. Корнилова М.И., Ковальногов В.Н., Хахалев Ю.А., Чукалин А.В., Цветова Е.В. Математическое моделирование и численное исследование аэродинамического следа за ветрогенератором // Теплоэнергетика. 2023. № 12. С. 114–125.
6. Давыдов Д.Ю. Оптимизация расположения ветроустановок с учетом аэродинамического взаимовлияния и протяженности кабельных линий сети сбора мощности // Энергосбережение и водоподготовка. 2020. № 3 (125). С. 30–34.
7. Hou P., Zhu J., Ma K., Yang G., Hu W., Chen Z. A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods // Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2019. Vol. 7. P. 975–986. DOI: 10.1007/s40565-019-0550-5.
8. Porte-Agel F., Wu Y., Lu H., Conzemius R.J. Large-eddy simulation of atmospheric boundary layer flow through wind turbines and wind farms // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2011. Vol. 99. P. 154–168.
9. Барскова К.В., Глазунов А.В., Репина И.А., Степаненко В.М., Лыкосов В.Н., Маммарелла И. О применимости теории подобия для устойчиво-стратифицированного атмосферного пограничного слоя над поверхностями сложной структуры // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2018. Т. 54, № 5. С. 544–555.
10. Гарбарук А.В., Стрелец М.Х., Шур М.Л. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 88 с.