MATHEMATICAL MODELING

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 533.6.011.6

В.Н. Ковальногов, Ю.А. Хахалев, Е.В. Цветова, Л.В. Хахалева

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АТМОСФЕРНОГО ПОГРАНИЧНОГО СЛОЯ В ОКРЕСТНОСТИ ВЕТРОПАРКОВ

Ковальногов Владислав Николаевич, доктор технических наук, окончил Казанский государственный университет, заведующий кафедрой «Тепловая и топливная энергетика» Ульяновского государственного технического университета. Имеет статьи, монографии, патенты в области моделирования, исследования и оптимизации гидрогазодинамических и тепловых процессов, ветроэнергетики, сжигания топлив. [e-mail: kvn@ulstu.ru].

Хахалев Юрий Андреевич, кандидат технических наук, окончил УлГТУ, доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ. Имеет статьи и патенты в области моделирования и исследования гидрогазодинамических и тепловых процессов. [e-mail: ulstu-td-ua@mail.ru].

Цветова Екатерина Владимировна, кандидат технических наук, окончила УлГТУ, доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ. Имеет статьи и патенты в области моделирования и исследования гидрогазодинамических и тепловых процессов. [e-mail: katf0k@mail.ru].

Хахалева Лариса Валерьевна, кандидат технических наук, окончила Ульяновский политехнический институт, доцент кафедры «Тепловая и топливная энергетика» УлГТУ. Имеет статьи и патенты в области моделирования и исследования гидрогазодинамических и тепловых процессов. [e-mail: larvall@mail.ru].

Аннотация

В статье произведен аналитический обзор российских и зарубежных источников по проблеме взаимодействия ветротурбин с приземными слоями атмосферы. Выявлены основные проблемы математического моделирования атмосферного пограничного слоя в окрестности ветропарков, связанные со сложными метеорологическими условиями, в частности, с постоянными переходами «через ноль» в осенне-зимний период, разнообразными осадками, широким временным диапазоном, параметрами наружного воздуха, рельефа местности и другими особенностями. Произведен анализ эволюции математических моделей турбулентности для описания пограничного слоя около ветротурбин, от более ранних до активно развивающихся и используемых в настоящее время. Для достижения большей точности и натуралистичности предлагается использовать высокопроизводительные эффективные алгоритмы, основанные на объединении масштабов и физике явлений. В статье авторами предложена математическая модель для исследования состояния атмосферного полидисперсного пограничного слоя в условиях Ульяновского ветропарка, учитывающая наличие дисперсных частиц в потоке, кривизну поверхности, градиент давления и другие воздействия.

Ключевые слова: математическое моделирование, модель, пограничный слой, турбулентный поток, ветроэнергетика, ветропарк.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-3-65-33-40

MATHEMATICAL MODELING AND NUMERICAL STUDY OF ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER NEAR WINDFARMS

Vladislav Nikolaevich Kovalnogov, Doctor of Sciences in Engineering; graduated from Kazan State University; Head of the Department of Heat-and-Power Engineering of Ulyanovsk State Technical University; a patent holder, an author of articles, monographs in the field of modeling, research and optimization of the thermal and hydro-gas-dynamic processes, firing and wind power engineering. e-mail: kvn@ulstu.ru.

Iurii Andreevich Khakhalev, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Heat-and-Power Engineering of UISTU; a patent holder; an author of articles in the field of modeling and research of the hydro-gas-dynamic and thermal processes. e-mail: ulstu-td-ua@mail.ru.

Ekaterina Vladimirovna Tsvetova, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk State Technical University; Associate Professor at the Department of Heat-and-Power Engineering of UISTU; a patent holder; an author of articles in the field of modeling and research of the hydro-gas-dynamic and thermal processes. e-mail: katf0k@mail.ru.

Larisa Valerevna Khakhaleva, Candidate of Sciences in Engineering; graduated from Ulyanovsk Polytechnic Institute; Associate Professor at the Department of Heat-and-Power Engineering of UISTU; a patent holder; an author of articles in the field of modeling and research of the hydro-gas-dynamic and thermal processes. e-mail: larvall@mail.ru.

Abstract

The article analyzes Russian and foreign sources relating to the interaction of wind turbines with the surface layers of the atmosphere. It specifies the main problems of mathematical modeling of the atmospheric boundary layer near the wind farms due to adverse meteorological conditions, in particular, constant zero crossings in the autumn-winter period, various precipitation, a wide time range, air parameters, terrain and other features. The authors analyze the evolution of mathematical models of turbulence to describe the boundary layer near wind turbines from earlier to rapidly developing and currently used. To achieve greater accuracy and naturalism, it is proposed to use high-performance efficient algorithms based on combining scales and physics of phenomena. The authors propose a mathematical model for studying the state of the atmospheric polydisperse boundary layer under conditions of the Ulyanovsk wind farm, taking into account the dispersed particles in the flow, surface curvature, pressure gradient and other influences.

Keywords: mathematical modeling, model, boundary layer, turbulent flow, wind power, wind farm.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во всем мире и в России возрастают установленные мощности ветропарков, и проблематика, связанная с изучением взаимодействия ветряных турбин с атмосферным пограничным слоем, становится актуальной и значимой как в ветроэнергетической практике, так и в научных сообществах, занимающихся исследованиями атмосферы. Имеющиеся оценки технического и экономического потенциала отечественной ветроэнергетики свидетельствуют о возможности покрытия не менее трети от существующей потребности в электроэнергии за счёт ветроэнергетики. Развитию отечественной ветроэнергетики препятствуют нерегулярный и низкий ветропотенциал на большей части территории Российской Федерации, а также сложные метеорологические условия с частыми переходами температурного режима «через ноль» и осадками. Следствиями этого являются необходимость в избыточных и дорогостоящих резервах установленной мощности и накопителей энергии, а также длительные фазы

работы ветроэнергетических комплексов в неэффективных аэродинамических режимах, либо технологических простоях, связанных с производством работ по очистке рабочих поверхностей ветряных турбин от наледи.

Чтобы решить данные проблемы, необходимо исследование закономерностей влияния ветропарков на состояние атмосферного полидисперсного пограничного слоя. Авторы связывают это с развитием мезомасштабных моделей турбулентного переноса и созданием цифровых двойников атмосферного пограничного слоя ветропарка как средства исследования возможностей и эффективности технологий управления метеорологической обстановкой на локальных территориях (в частности «программируемого» выпадения осадков) посредством рационального использования ветропарков. Достоверное и точное прогнозирование эволюции взаимодействующего с ветропарком атмосферного пограничного слоя в широком диапазоне пространственных и временных масштабов позволяет получить ценную количественную информацию о потенциальном воз-

действию на местную метеорологическую обстановку и имеет большое значение для оптимизации как проектирования (в частности размещения турбин), так и эксплуатации ветропарков.

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР

Большое количество работ, опубликованных по этой тематике к настоящему времени [1–18], свидетельствует о переходе от накопления эмпирического материала к его обобщениям и появлению возможности аналитических развитий. Подавляющее большинство известных в области численного моделирования аэродинамики работ относятся к отдельным ветротурбинам, и лишь в последнее десятилетие появились работы, посвящённые изучению комплексов ветротурбин и ветропарков [1, 6–10]. В основном эти работы связаны с исследованиями аэродинамических следов ветротурбин и их взаимного влияния в приложениях к оптимизации их расположения в составе ветропарка для максимизации выработки энергии, минимизации эксплуатационных нагрузок на ветротурбины, снижения генерируемого шума.

Работы, посвящённые исследованию возможностей и условий рационального использования ветропарков для направленного воздействия на метеорологическую обстановку и выпадение осадков на локальных территориях в их окрестности, отсутствуют, хотя потенциал такого воздействия и предпосылки для создания соответствующих технологий отмечает ряд исследователей [2–4, 6]. Современные технологии искусственного образования осадков предусматривают внесение в атмосферный пограничный слой, как правило, с использованием авиационной техники, мелкодисперсных концентраторов влаги (йодид серебра, твёрдый диоксид углерода, мелкодисперсный цемент) [19, 30]. Для реализации таких технологий путём рационального использования ветропарков необходимо достоверно и точно прогнозировать эволюцию состояния атмосферного полидисперсного пограничного слоя в окрестности ветропарка в широком диапазоне пространственных и временных масштабов [19–20].

Для наилучшего приближения к реальным системам и обеспечения необходимой точности моделирования, в наиболее развитых моделях исследователи демонстрируют явную тенденцию к объединению масштабов и физики в единые модели, использующие высокопроизводительные вычислительные системы [4, 6]. В большинстве ранних исследований потока атмосферного пограничного слоя через изолированные ветряные турбины параметризовали турбулентность, используя усреднённый по Рейнольдсу подход Навье-Стокса (RANS) [11–16]. Однако, в соответствии с современными представлениями [6], RANS слишком зависит от характеристик конкретных потоков, чтобы использовать их в качестве метода общей применимости. Симуляция большого вихря (LES) может потенциально предоставить вид пространственной и временной информации

с высоким разрешением, необходимой для практических приложений. Вместе с тем, точность LES при моделировании потока атмосферного пограничного слоя с сетью поверхностно распределённых ветряных турбин зависит от нашей способности параметризовать турбулентные потоки в подсеточных масштабах (SGS). При этом установлено, что модель LES, которая разрешает крупномасштабную динамику, может помочь более точно уловить турбулентность, чем модель RANS, которая моделирует все турбулентные масштабы, но не обеспечивает достаточного разрешения.

Отдельную проблему при моделировании атмосферного пограничного слоя в окрестности ветропарков составляет адекватный учёт эволюции дисперсного кластера в пограничном слое [2, 19–21]. Исследования дисперсных потоков с фазовыми переходами активно ведутся в научных центрах ведущих стран. В теоретическом плане наиболее интенсивно развиваются в настоящее время разделы тепломассообмена и механики жидкости и газа, связанные с дисперсными двухфазными течениями [19–26]. В соответствии с современными представлениями, расчёт двухфазного течения включает моделирование переноса массы, импульса и тепла для каждой из фаз, а также межфазного взаимодействия. Все разнообразие существующих на сегодняшний день математических моделей двухфазных потоков можно разбить на два класса: двухжидкостные и эйлера-лагранжевы. При этом недостатки первых являются преимуществом вторых и наоборот. Преимущество двухжидкостных моделей состоит в том, что численные модели дисперсных потоков мало отличаются от моделей однородного потока. Это даёт широкие возможности по заимствованию численных методов, используемых для решения системы уравнений. Недостатком двухжидкостных моделей является существенно меньшая их информативность относительно движения отдельно взятой частицы. К преимуществам эйлера-лагранжевых моделей относится детальная информация о движении каждой частицы в отдельности в известном поле скоростей и температур несущего потока. Но существует и ряд ограничений в реализации расчетов этого типа. При увеличении концентрации второй фазы возрастает степень влияния частиц на параметры несущей среды, а также возрастает вероятность столкновения частиц, что приводит к «запутыванию» их траекторий. С уменьшением размера частиц осложняется вычислительный процесс, так как для корректного представления движения частиц необходим учёт их взаимодействия со всё меньшими турбулентными вихрями несущего потока. Основные принципиальные трудности, возникающие при моделировании двухфазных турбулентных течений, связаны с турбулентным характером движения, со специфической физикой процессов: взаимодействием частиц дисперсного кластера с турбулентными вихрями сплошной фазы, а также друг с другом в результате столкновений; эволюцией спектра и др.

С учётом изложенного, предлагается мезомасштабное развитие модели, учитывающей опосредованное влияние продольного градиента давления и ряда других воздействий через изменение коэффициентов турбулентного переноса теплоты и количества движения.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Система дифференциальных уравнений, описывающих движение и теплообмен дисперсного потока, представляется отражающими влияние частиц уравнениями пограничного слоя для несущей среды, содержащей внутренние источники теплоты и количества движения:

- дифференциальное уравнение энергии:

$$\rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial y} \left[r^n (\lambda + \lambda_T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + (\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + u \frac{dp}{dx} + q_v, \quad (1)$$

- дифференциальное уравнение движения:

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial \tau} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \frac{1}{r^n} \frac{\partial}{\partial y} \left[r^n (\mu + \mu_T) \frac{\partial u}{\partial y} \right] - \frac{dp}{dx} + s_v, \quad (2)$$

- дифференциальное уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{1}{r^n} \left[\frac{\partial (\rho u r^n)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v r^n)}{\partial y} \right] = 0, \quad (3)$$

- уравнение состояния:

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

где μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; ρ – плотность, кг/м³; c_p – удельная изобарная теплоемкость, КДж/(кг·К); R – газовая постоянная, КДж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, КДж/(м·К); p – давление потока, Па; u – продольная составляющая скорости, м/с; v – поперечная составляющая скорости, м/с; T – термодинамическая температура потока, К; x – продольная координата, м; y – поперечная координата, м; λ_T – коэффициент турбулентного переноса теплоты, КДж/(м·К); μ_T – коэффициент турбулентного переноса количества движения, Па·с; τ – время, с; n – параметр, численно равный 1 для осесимметричного пограничного слоя и 0 – для плоского пограничного слоя; s_v – член, характеризующий интенсивность внутренних источников количества движения, Па/м; q_v – член, характеризующий интенсивность внутренних источников теплоты, Вт/м³.

Зависимости теплофизических свойств воздуха от температуры T в диапазоне ее изменения от 243 до 313 К аппроксимированы функциями:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{NM}; \quad \frac{c_p}{c_{p0}} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{NC}; \quad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \left(\frac{T}{T_0} \right)^{NL} \quad (5)$$

Интенсивность внутренних источников теплоты q_v и количества движения s_v применительно к дисперсному пограничному слою:

$$s_v = \frac{0,75 \rho_s \rho c_{fs}}{\rho_g d_s} |u_s - u| (u_s - u), \quad (6)$$

$$q_v = \frac{6 \alpha_s \rho_s}{\rho_g d_s} (T_s - T), \quad (7)$$

где α_s – коэффициент теплоотдачи конденсированных частиц дисперсной среды, Вт/(м²·К); c_{fs} – коэффициент сопротивления конденсированных частиц дисперсной среды; ρ_s – плотность конденсированной фазы (масса конденсированных частиц, в единице объема среды), кг/м³; ρ_g – плотность вещества частиц, кг/м³; u_s , T_s – скорость и температура частиц, м/с и К соответственно.

Для определения параметров конденсированной фазы ρ_s , u_s , T_s осуществляется расчет траекторий и параметров частиц нескольких выделенных фракций в заданном поле несущей среды (методом последовательных приближений). В число этих фракций включается представительная фракция со среднемассовым диаметром частиц d_{sm} . Температура T_{sm} и скорость u_{sm} частиц представительной фракции используются для расчета комплексов A и B :

$$A = \frac{q_v}{(T_{sm} - T)}; \quad B = \frac{s_v}{(u_{sm} - u)}. \quad (8)$$

Комплексы A и B изменяются (по толщине пограничного слоя, в разных итерациях при уточнении поля течения несущей среды) значительно слабее величин q_v и s_v . Поэтому найденные в предыдущем приближении значения комплексов A и B усредняются по анализируемому сечению пограничного слоя, и эти усредненные значения используются для определения локальных параметров q_v и s_v по выражениям:

$$q_v = a(T_{sm} - T); \quad s_v = b(u_{sm} - u), \quad (9)$$

где a , b – усредненные по толщине пограничного слоя значения комплексов A и B .

Профили температуры T_{sm} и скорости u_{sm} частиц представительной фракции в сечениях пограничного слоя аппроксимируются зависимостями:

$$u_{sm} = u_{sm\infty} \left[\varphi_u + (1 - \varphi_u) \right] \frac{u}{u_\infty};$$

$$T_{sm} = T_{sm\infty} \left[\varphi_T + (1 - \varphi_T) \right] \frac{T}{T_\infty}, \quad (10)$$

где φ_u , φ_T – коэффициенты, сохраняющие постоянные значения в анализируемом сечении пограничного слоя. Коэффициенты φ_u и φ_T могут изменяться в диапазоне от 0 до 1 и зависят в основном от толщины пограничного слоя, размеров частиц и скорости их поперечного перемещения. В тех областях, где скорость направленного поперечного перемещения частиц равна 0 (инерционное выпадение частиц на лопасть отсутствует), коэффициенты φ_u и φ_T принимают значения, близкие к 0. Расчетное исследование в настоящей работе выполнено для условий $\varphi_u = \varphi_T = \varphi_s$, где параметр φ_s определяет характер относительного движения фаз (наличие или отсутствие инерционного выпадения конденсированных частиц на лопасть).

Для определения значений коэффициентов a , b , φ_u , φ_T проводится расчет траекторий и параметров частиц по известным методикам [21].

После определения численных значений искомых коэффициентов появляется возможность рассчитывать внутренние источники q_v и s_v в процессе интегрирования уравнений пограничного слоя с помощью выражений (8)–(10), а не автономно методом последовательных приближений. Значения этих коэффициентов зависят от структуры пограничного слоя значительно слабее величин q_v и s_v , поэтому достигается высокая скорость сходимости решения.

Начальные условия:

$$\tau = 0 : u = u_0(x, y); T = T_0(x, y);$$

$$p = p_0(x). \quad (11)$$

Граничные условия на поверхности лопасти и на внешней границе пограничного слоя формируются одинаково при расчете как температуры T_r , так и температуры T_{adw} :

$$y = 0 : u = 0; v = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0;$$

$$y = \infty : \frac{\partial u}{\partial y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

Граничные условия в исходном сечении пограничного слоя при расчете температуры T_r записываются в виде:

$$x = 0, y > 0 : u = u_0; T = T_0. \quad (13)$$

На участке поверхности лопасти с ламинарным пограничным слоем принимаем $\lambda_T = \mu_T = 0$.

На участке лопасти с турбулентным пограничным слоем коэффициент турбулентного переноса теплоты λ_T можно определить по соотношению:

$$\lambda_T = \frac{\mu_T c_p}{Pr_T} \approx \frac{\mu_T c_p}{0,9}. \quad (14)$$

Коэффициент турбулентного переноса количества движения в соответствии с моделью пути смешения Прандтля определяется зависимостью:

$$\mu_T = \frac{\rho l^2 \partial u}{\partial y}, \quad (15)$$

где длина пути смешения рассчитывается по выражению:

$$l = \alpha y \left\{ 1 - \exp \left[-\rho v^* y / (26 \mu) \right] \right\}, \quad (16)$$

где v^* – динамическая скорость в рассматриваемой точке.

Коэффициент $\alpha = \alpha_T$ определяется зависимостью, предложенной Ковальновым Н.Н. [21], учитывающей влияние фактора динамической нестационарности, продольного градиента давления и кривизны обтекаемой поверхности:

$$\alpha / \alpha_T = \frac{\sqrt{1 - \frac{c_2}{\rho_\infty u_0} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \left[\frac{\partial P_\infty}{\partial \tau} \frac{u_\infty}{u_{0\infty} r} \right]}}{1 - 21,4 \frac{\left(\frac{\partial P_\infty}{\partial x} \right)}{\rho_\infty u_{0\infty} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0}}}, \quad (17)$$

где c_2 – эмпирический коэффициент, индекс ∞ характеризует параметры течения в анализируемом сечении за пределами пограничного слоя.

Численное интегрирование приведенной к безразмерному виду системы уравнений (1)–(10) вместе с граничными условиями (13), (14) осуществляется методом прогонки с использованием неявной шеститочечной разностной схемы. Разработан алгоритм расчета, также сформулированы условия, при которых обеспечивается устойчивость и сходимость численного решения [27–30].

Вычисляются средние значения скоростей и давлений, коэффициент сопротивления трения на поверхности лопасти ветроколеса. На рисунке приводятся результаты тестового численного эксперимента по сопротивлению трения на поверхности лопасти ветроколеса. Предварительные результаты численного исследования сопротивления трения турбулентного потока около поверхности ветроколеса, с использованием предлагаемой модели турбулентности, показали удовлетворительную адекватность модели. В дальнейшем планируется провести полномасштабный численный эксперимент.

Разрабатываемый авторами цифровой двойник строится на основе оригинального аналитического ядра, обеспечивающего высокоточное моделирование тепломассопереноса и фазовых превращений при взаимодействии полидисперсного воздушного потока

с сетью ветротурбин и рельефной поверхностью локальной территории Ульяновского ветропарка.

Рис. Результаты тестового эксперимента: □ – численный эксперимент; линия – расчет по эмпирической зависимости $\frac{C_f}{2} = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}$, $C_f/2$ – коэффициент сопротивления трения, Re – число Рейнольдса

Особенностью местных условий является также специфичная роза ветров, частые переходы «через ноль». Однако данная модель может быть применена для схожих условий средней полосы России.

Предполагается использование в аналитическом ядре проблемно-ориентированного комплекса средств исследования разработанной оригинальной полуэмпирической модели турбулентного переноса в пограничном слое дисперсных потоков с воздействиями, в которой адекватно учтено воздействие влияющих факторов, в том числе полидисперсности пограничного слоя, орграфии обтекаемой поверхности и градиента давления потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги предварительного исследования позволяют сделать вывод, что предлагаемая математическая модель для численного исследования атмосферного полидисперсного пограничного слоя, взаимодействующего с турбинами ветропарка в условиях широкого спектра интенсивных воздействий, на тестовых экспериментах показала свою адекватность, что позволит продолжать дальнейшие исследования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Large Eddy Simulation of Wind Farm Aerodynamics: A Review / D. Mehta, A.H. Zuijlen, B. Koren, J.G. Holierhoek, H. Bijl // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014. 133. pp. 1–17.
2. Baidya Roy S., Pacala S.W., Walko R.L. Can Large Wind Farms Affect Local Meteorology? // *J. Geophys. Res.* 2004. iss 109. pp. 1–6.
3. Kirk-Davidoff D.B., Keith D.W. On the Climate Impact of Surface Roughness Anomalies // *J. Atmos. Sci.* 2008. iss 65. pp. 2215–2234.
4. Basu S., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer Turbulence: A Scale-

Dependent Dynamic Modeling Approach // *J. Atmos. Sci.* 2006. iss 63 (8). pp. 2074–2091.

5. Wan F., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Stably-Stratified Flow Over a Steep Hill // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. iss 138 (3). pp. 367–384.
6. Hewitt S., Margetts L., Revell A. Building a Digital Wind Farm // *Arch. Computat. Methods Eng.* 2018. iss 25. pp. 879–899.
7. Lu H., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of a Very Large Wind Farm in a Stable Atmospheric Boundary Layer // *Phys. Fluids*. 2011. iss 23. pp. 065101.
8. Calaf M., Meneveau C., Meyers J. Large Eddy Simulation Study of Fully Developed Wind-Turbine Array Boundary Layers // *Physics of Fluids*. 2010. iss 22 (1). art. nr. 015110. pp. 1–16.
9. Large-Eddy Simulation of Atmospheric Boundary Layer Flow Through Wind Turbines and Wind Farms / F. Porté-Agel, Y.T. Wu, H. Lu, R.J. Conzemius // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2011. iss 99 (4). pp. 154–168.
10. VerHulst C., Meneveau C. Large Eddy Simulation of the Kinetic Energy Entrainment by Energetic Turbulent Flow Structures in Large Wind Farms // *Physics of Fluids*. 2014. iss 26. pp. 025113.
11. Vermeer L.J., Sorensen J.N., Crespo A. Wind Turbine Wake Aerodynamics // *Progress Aero Sci. J.* 2003. iss 39. pp. 467–510.
12. Anisotropy of Turbulence in Wind Turbine Wakes / R. Gómez-Elvira, A. Crespo, E. Migoya, J. Manuel, F. Hernández // *J. Wind Engind. Aerodyn.* 2005. iss 93. pp. 797–814.
13. Kasmi A.E., Masson C. An Extended to a Model for Turbulent Flow Through Horizontal-Axis Wind Turbines // *J. Wind Eng. Ind Aerodyn.* 2008. iss 96. pp. 103–122.
14. Sagaut P. Large Eddy Simulation for Incompressible Flows. 3rd ed. Berlin Heidelberg : Springer-Verlag, 2006.
15. On Atmospheric Stability in the Dynamic Wake Meandering Model / R.E. Keck, M. De Maré, M.J. Churchfield, S. Lee, G. Larsen, H.A. Madsen // *Wind Energy*, 2014. iss 17, pp. 1689–1710.
16. 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. Michalakos // *Journal of Solar Energy Engineering*. 2013. iss 135 (3). pp. 31001–31010.
17. Wu Y.T., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrizations // *Boundary-Layer Meteorology*. 2011. iss 138 (3). pp. 345–366.
18. Approach to Micrositing of Wind Turbines / A. Rasheed, K. Sorli, R. Holdahl, T.A. Kvamsdal // *Multiscale Energy Procedia*. 2012. iss 14. pp. 1458–1463.
19. Берюлев Г.П., Данелян Б.Г., Зимин Б.И. Методические указания: проведение работ по искусственному регулированию погодных условий в мегаполисах. М. : Метеоагентство Росгидромета, 2006.
20. Гвоздяков Д.В., Губин В.Е. Численное моделирование процесса конденсации продуктов сгорания

натуральных топлив ТЭС в атмосфере // Теплофизические основы энергетических технологий : сб. науч. тр. IV Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 10-12 октября 2013 г., Томск / Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), Энергетический институт (ЭНИИ). Томск : Изд-во ТПУ, 2013. С. 144–148.

21. Ковальногов Н.Н. Пограничный слой в потоках с интенсивными воздействиями. Ульяновск, 1996.

22. Вараксин А.Ю. Обтекание тел дисперсными газовыми потоками // Теплофизика высоких температур. 2018. Т. 56, № 2. С. 282–305.

23. Пахомов М.А., Терехов В.И. Влияние испарения капель на турбулентность газа и теплообмен при течении двухфазного потока за внезапным расширением трубы // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54, № 3. С. 352.

24. Пахомов М.А., Терехов В.И. Структура течения в неізотермическом закрученном газокapельном потоке за внезапным расширением трубы // Изв. РАН. Механика жидкости и газа. 2016. № 1. С. 69.

25. Спокойный Ф.Е. Горбис З.Р. Особенности осаждения тонкодиспергированных частиц из охлаждаемого газового потока на поперечно обтекаемой поверхности теплообмена // Теплофизика высоких температур. 1981. Т. 19, № 1. С. 182.

26. Циркунов Ю.М., Тарасова Н.В. Влияние температуры преграды на осаждение тонкодисперсной примеси из сверхзвукового потока газозвеси // Теплофизика высоких температур. 1992. Т. 30, № 6. С. 1154.

27. Ковальногов В.Н., Хахалев Ю.А. Результаты численного исследования турбулентного потока с воздействиями на основе анализа фрактальной размерности пульсаций давления // Труды Академэнерго. 2014. № 3. С. 7–15.

28. Ковальногов В.Н., Хахалев Ю.А., Хахалева Л.В. Практическое применение результатов численного эксперимента на основе хаотической модели в системе охлаждения лопаток турбин // Труды Академэнерго. 2014. № 4. С. 16–29.

29. Св-во о гос. регистрации программ для ЭВМ. № 2014616990. Программа расчета параметров турбулентного потока на основе фрактальной размерности пульсаций давления Kobo. Ver. 1.0 / Хахалев Ю.А., Ковальногов В.Н. Заявка № 2014614575 ; зарег. 09.07.2014.

30. Цветова Е.В., Синявский О.Ю. О возможности управления погодой // Гражданская авиация: XXI век : сб. матер. XI Междунар. молодеж. науч. конф. Ульяновск : УВАУГА, 2019. С. 229–232.

REFERENCES

1. D. Mehta, A.H. Zuijlen, B. Koren, J.G. Holierhoek, H. Bijl Large Eddy Simulation of Wind Farm Aerodynamics. A Review. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. 2014, iss. 133, pp. 1–17.

2. Baidya Roy S., Pacala S.W., Walko R.L. Can Large Wind Farms Affect Local Meteorology? *Geophys Res. Journal*, 2004, iss. 109, pp. 1–6.

3. Kirk-Davidson D.B., Keith D.W. On the Climate Impact of Surface Roughness Anomalies. *Atmos. Sci. Journal*, 2008, iss. 65, pp. 2215–2234.

4. Basu S., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer Turbulence: A Scale-Dependent Dynamic Modeling Approach. *Atmos. Sci. Journal*, 2006, iss. 63 (8), pp. 2074–2091.

5. Wan F., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Stably-Stratified Flow Over a Steep Hill. *Boundary-Layer Meteorology*, 2011, iss. 138 (3), pp. 367–384.

6. Hewitt S., Margetts L., Revell A. Building a Digital Wind Farm. *Arch. Computat. Methods Eng.*, 2018, iss. 25, pp. 879–899.

7. Lu H., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of a Very Large Wind Farm in a Stable Atmospheric Boundary Layer. *Phys. Fluids J.*, 2011, iss. 23, pp. 065101.

8. Calaf M., Meneveau C., Meyers J. Large Eddy Simulation Study of Fully Developed Wind-Turbine Array Boundary Layers. *Physics of Fluids J.*, 2010, iss. 22 (1), art. nr. 015110, pp. 1–16.

9. Porté-Agel F., Wu Y.T., 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, iss. 99 (4), pp. 154–168.

10. VerHulst C., Meneveau C. Large Eddy Simulation Study of the Kinetic Energy Entrainment by Energetic Turbulent Flow Structures in Large Wind Farms. *Physics of Fluids J.*, 2014, iss. 26, pp. 025113.

11. Vermeer L.J., Sorensen J.N., Crespo A. Wind Turbine Wake Aerodynamics. *Progress Aero Sci. J.*, 2003, iss. 39, pp. 467–510.

12. Gómez-Elvira R., Crespo A., Migoya E., Manuel J., Hernández F. Anisotropy of Turbulence in Wind Turbine Wakes. *Wind Eng Ind Aerodyn. J.*, 2005, iss. 93, pp. 797–814.

13. Kasmi A.E., Masson C. An Extended to a Model for Turbulent Flow Through Horizontal-Axis Wind Turbines. *Wind Eng Ind Aerodyn J.*, 2008, iss. 96, pp. 103–122.

14. Sagaut P. *Large Eddy Simulation for Incompressible Flows*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg Springer-Verlag. 2006.

15. Keck R.E., Maré M.De, Churchfield M.J., Lee S., Larsen G., Madsen H.A. On Atmospheric Stability in the Dynamic Wake Meandering Model. *Wind Energy*, 2014, iss. 17, pp. 1689–1710.

16. Lee S., Churchfield M.J., Moriarty P.J., Jonkman J., Michalakes J. A Numerical Study of Atmospheric and Wake Turbulence Impacts on Wind Turbine Fatigue Loadings. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2013, iss. 135 (3), pp. 31001–31010.

17. Wu Y.T., Porté-Agel F. Large-Eddy Simulation of Wind-Turbine Wakes: Evaluation of Turbine Parametrizations. *Boundary-Layer Meteorology J.*, 2011, iss. 138 (3), pp. 345–366.

18. Rasheed A., Sorli K., Holdahl R., Kvamsdal T.A. Approach to Micrositing of Wind Turbines. *Multiscale Energy Procedia J.*, 2012, iss. 14, pp. 1458–1463.

19. Beriulev G.P., Danelian B.G., Zimin B.I. *Metodicheskie ukazaniia: provedenie rabot po iskusstvennomu*

regulirovaniu pogodnykh uslovii v megapolisakh [Methodological Guidelines]. Moscow, Meteoagentstvo Rosgidrometa Publ., 2006.

20. Gvozdiakov D.V., Gubin V.E. Chislennoe modelirovanie protsessa kondensatsii produktov sgoraniia naturalnykh topliv TES v Atmosfere [Numerical Modeling of Condensation Process of the Combustion TES Natural Fuel Products of in Atmosphere]. *Teplofizicheskie osnovy energeticheskikh tekhnologii. Sb. nauch. tr. IV Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem, 10-12 oktiabria 2013 g., Tomsk. Natsionalnyi issledovatel'skii Tomskii politekhnicheskii universitet (TPU), Energeticheskii institut (ENIN)* [Proc. of 4th Russian Sci.- Pract. Conf. with Int. Participation on Fundamentals of Energy Technologies. Tomsk National Research Polytechnic University (TPU), Institute of Power Engineering (ENIN)]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 144–148.

21. Kovalnogov N.N. *Pogranichnyi sloi v potokakh s intensivnymi vozdeistviiami* [Boundary Layer in Flows with Intensive Exposure]. Ulyanovsk, 1996.

22. Varaksin A.Iu. Obtekanie tel dispersnymi gazovymi potokami [Gas-Solid Flows Past Bodies]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2018, vol. 56, iss. 2, pp. 282–305.

23. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Vliianie ispareniia kapel na turbulentnost gaza i teploobmen pri techenii dvukhfaznogo potoka za vnezapnym rasshireniem truby [The Effect of Drop Evaporation on Gas Turbulence and Heat transfer for Two-Phase Flow behind Sudden Pipe Expansion]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 2016, vol. 54, iss. 3, pp. 352.

24. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Struktura techeniia v neizotermicheskom zakruchennom gazokapelnom potoke za vnezapnym rasshireniem truby [Structure of the Nonisothermal Swirling Gas-Droplet Flow behind an Abrupt Tube Expansion]. *Izv. RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza* [Proc. of RAS. Fluid Dynamics], 2016, iss. 1, p. 69.

25. Spokoinyi F.E. Gorbis Z.R. Osobennosti osazhdeniia tonkodispergirovannykh chastits iz okhlazhdaemogo gazovogo potoka na poperechno obtekaemoi poverkhnosti teploobmena [Properties of Precipitation of Finely

Dispersed Particles from a Cooled Gas-Flow Transverse to a Heat-Exchanging Surface]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 1981, vol. 19, iss. 1, pp. 182.

26. Tsirkunov Iu.M., Tarasova N.V. Vliianie temperatury pregrady na osazhdenie tonkodispersnoi primesi iz sverkhzvukovogo potoka gazovzvesi [Influence of the Temperature of an Obstacle on the Precipitation of a Finely-Dispersed Impurity from Supersonic Flow of a Gas Suspension]. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature], 1992, vol. 30, iss. 6, pp. 1154.

27. Kovalnogov V.N., Khakhalev Iu.A. Rezultaty chislennogo issledovaniia turbulentnogo potoka s vozdeistviiami na osnove analiza fraktalnoi razmernosti pulsatsii davleniia [Results of Numerical Investigation of Turbulent Flow with the Impacts based on the Fractal Dimension of Pressure Fluctuations Analysis]. *Trudy Akademenergo* [Transactions of Akademenergo], 2014, iss. 3, pp. 7–15.

28. Kovalnogov V.N., Khakhalev Iu.A., Khakhaleva L.V. Prakticheskoe primenenie rezultatov chislennogo eksperimenta na osnove khaosnoi modeli v sisteme okhlazhdeniia lopatok turbin [Practical Using Results of Numerical Experiment based on the Chaos Model in Cooled Turbine Blades]. *Trudy Akademenergo* [Transactions of Akademenergo], 2014, iss. 4, pp. 16–29.

29. Khakhalev Iu.A., Kovalnogov V.N. *Programma rascheta parametrov turbulentnogo potoka na osnove fraktalnoi razmernosti pulsatsii davleniia Kobo. Ver. 1.0. Svidetel'stvo o gos. registratsii programm dlia EVM* [A Program for Calculating Parameters of Turbulent Flow based on the Fractal Dimension of Pressure Fluctuations]. Certificate of State Registration RF for Computer Program, no. 2014616990. Application no. 2014614575, dated 09 Jul., 2014.

30. Tsvetova E.V., Siniavskii O.Iu. O vozmozhnosti upravleniia pogodoi [On the Weather Manipulation Possibility]. *Grazhdanskaia aviatsiia. XXI vek. Sb. mater. 11 Mezhdunar. molodezh. nauch. konf.* [Proc. of the 11th Int. Youth Sci. Conf. on Civil Aviation. 21 Cent.]. Ulyanovsk, UVAUGA Publ., 2019, pp. 229–232.