

УДК 621.311

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И ТУРБУЛЕНТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЕТРОВОГО ПОТОКА В АНТРОПОГЕННОЙ СРЕДЕ

Новиков В.Г., канд. техн. наук.

*Институт технической теплофизики НАН Украины, ул. Желябова, 2а, Киев, 03680, Украина*

Наведено результати чисельного моделювання процесів переносу при взаємодії вітрового потоку у приземному шарі атмосфери з будівлями і спорудами, компактно розташованими в межах міської забудови. У цільовій області розраховані тривимірні поля швидкості вітру, питомої потужності вітрового потоку та його турбулентні характеристики з метою визначення місць найбільш доцільного розташування вітрових енергетичних установок для електропостачання експериментального будинку пасивного типу.

Приведены результаты численного моделирования процессов переноса при взаимодействии ветрового потока в приземном слое атмосферы со зданиями и сооружениями, компактно расположенными в пределах городской застройки. В целевой области рассчитаны трехмерные поля скорости ветра, удельной мощности ветрового потока и его турбулентных характеристик с целью определения мест наиболее целесообразного расположения ветровых энергетических установок для электроснабжения экспериментального дома пассивного типа.

Presented the results of numerical modeling of transport processes in the interaction of wind flow in the surface layer of the atmosphere with the buildings and structures located within the compact urban development. In the target area calculated three-dimensional velocity field of wind power density of the wind flow and turbulence characteristics in order to determine the most appropriate places of location of wind power installations for power supply pilot house passive type.

Библ. 19, табл. 1, рис. 8.

**Ключевые слова:** ветровой поток, пограничный слой атмосферы, CFD-модель, модель турбулентности, трехмерные поля.

$K_v$  – коэффициент скорости;  
 $P_v$  – удельная мощность ветрового потока;  
 $TKE$  – нормализованная кинетическая энергия турбулентности;  
 $I_t$  – интенсивность турбулентности;  
 $U$  – локальная скорость ветрового потока;  
 $U_{in}$  – скорость ветра на входе в область решения;  
 $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  
 $\rho$  – плотность воздуха;  
 $C_p$  – коэффициент мощности ветровой турбины;  
 $A_t$  – ометаемая площадь ветроколеса;  
 $P_{cp}$  – средняя мощность на выходе ветряной турбины;  
 $E_{год}$  – годовая выработка энергии;  
 $z_f$  – высота флюгера;

$x_i$  – прямоугольные координаты;  
 $u_i$  – составляющие вектора скорости;  
 $\mu$  – молекулярная вязкость воздуха;  
 $\mu_t$  – турбулентная вязкость потока;  
 $\varepsilon$  – диссипации кинетической энергии турбулентности;  
 $G_k$  – генератор кинетической энергии турбулентности;  
 $C_{\mu}, C_{1\varepsilon}, C_{2\varepsilon}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$  – постоянные стандартной k-ε модели турбулентности;  
 $k_s$  – песочная шероховатость;  
 $z_0$  – аэродинамическая шероховатость земной поверхности;  
 $\kappa$  – постоянная Кармана;  
 $u_f$  – скорость трения.

Анализ известных литературных источников, посвященных исследованиям ветрового потенциала в приземном слое атмосферы как возобновляемого энергетического источника, показал, что в настоящее время развитие ветроэнергетики пошло в двух направлениях. Первое

направление заключается в создании мощных ветровых электрических станций на шельфе или внутри материков вдали от всякого рода построек [1-4], и второе направление заключается в интеграции ветровых энергетических установок в зоны архитектурных застроек вблизи по-

требителей, между зданиями и сооружениями или непосредственно на них [5-10]. Оба направления важны и имеют свои преимущества и недостатки. В частности, мощные ветровые электростанции, расположенные вдали от потребителей, требуют дополнительных капиталовложений для создания инженерных сетей по доставке электроэнергии потребителю, которые обуславливают достаточно большие потери мощности при передаче и распределении энергии [8].

Интеграция ветровых турбин в архитектурные зоны предполагает решение трех основных научно-исследовательских задач [6,8]. Первая задача связана с оценкой энергетического потенциала ветрового потока в архитектурной среде. Вторая – связана с типами ветровых турбин, предназначенных для использования в пределах городских элементов на улицах, мостах, шоссе или в других относительно открытых пространствах. Третья задача состоит в оценке экологической и социально-экономической целесообразности интеграции ветровых турбин в архитектурной среде.

Таким образом, как в случае создания крупных ветровых электростанций, так и в случае установки ветровой турбины в зоне городской застройки перед финансированием ветровых энергетических проектов, инвесторы прежде всего нуждаются в точных оценках ветровых ресурсов, чтобы в свою очередь оценить потенциальную выработку электроэнергии и рассчитать отдачу от своих инвестиций. На современном этапе наиболее точную оценку энергетического потенциала ветра и, соответственно, объемы производства электроэнергии ветровой турбиной можно произвести посредством CFD-моделирования.

В связи с этим, основная цель настоящего исследования заключается в оценке посредством CFD-моделирования энергетического потенциала ветра и турбулентных характеристик ветрового потока в пределах городской застройки для определения наиболее оптимального места расположения ветровой энергетической установки, необходимой для электроснабжения дома пассивного типа. В данном случае целевым объектом исследования являлся комплекс зданий и сооружений ИТТФ НАН Украины, расположенных

по адресу г. Киев, ул. Академика Булаховского, 2.

К настоящему времени сложился определенный алгоритм решения задач оценки энергетического потенциала ветра для нужд ветроэнергетики [11]:

- Получение и обработка ветровой статистики целевого района.
- Оценка характеристик ветрового потока с использованием CFD-моделирования.
- Выбор конструкции и мощности ветровых турбин по данным моделирования.

#### **Физическая постановка задачи**

При оценке характеристик ветрового потока с точки зрения его потенциала для ветровых энергетических установок, прежде всего, оценивают скоростные (1,2) и турбулентные (3,4) характеристики ветра [12,13]

– коэффициент скорости

$$K_v = \frac{U - U_{in}}{U_{in}}; \quad (1)$$

– удельная мощность ветрового потока

$$P_v = \frac{\rho U^3}{2}; \quad (2)$$

– нормализованная кинетическая энергия турбулентности

$$TKE = \frac{k}{U_{in}^2}; \quad (3)$$

– интенсивность турбулентности

$$I_t = \frac{\sqrt{2k/3}}{U}; \quad (4)$$

где  $U$  – локальная скорость ветрового потока, м/с;  $U_{in}$  – скорость ветра на входе в область решения, м/с;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>;  $\rho$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

Скорость ветра необходима для расчета механической мощности на оси ротора ветровой турбины с целью выбора типа и мощности ветроустановки [13]:

$$P = C_p A_t \rho U^3 / 2,$$

при этом годовая выработка энергии  $E_{год}$  может быть рассчитана по формуле:

$$E_{\text{год}} = \frac{P_{\text{ср}} \cdot 8760(\text{ч} \cdot \text{год})}{1000},$$

где  $C_p$  – коэффициент мощности ветровой турбины;  $A_t$  – ометаемая площадь ветроколеса;  $P_{\text{ср}}$  – средняя мощность на выходе ветряной турбины.

Локальные значения турбулентных характеристик воздушного потока (3,4) на месте монтажа ветровой турбины не менее важны, чем его скоростные характеристики. Повышенная турбулентность уменьшает возможность эффективного использования энергии ветра. Она также является причиной ускоренного износа ветроагрегатов, и в связи с этим, турбулентность, образующуюся над поверхностью земли, учитывают при расчетах высоты турбинной башни с целью ослабления её влияния.

Оценить приведенные выше величины возможно посредством численного моделирования процессов переноса при взаимодействии ветрового потока в приземном слое атмосферы со зданиями и сооружениями компактно расположенными в пределах городской застройки.

При решении данной задачи предполагается, что воздух – несжимаемая среда, воздушный поток – турбулентный, а воздействие сил Кориолиса пренебрежимо мало по сравнению с силами трения воздуха о подстилающую поверхность. Также, как и при построении большинства моделей динамики воздушных потоков в пределах атмосферного пограничного слоя [14, 15], в настоящей работе принимается нейтральная стратификация атмосферы над рассматриваемой местностью, что позволяет не учитывать теплообмен между воздухом и подстилающей земной поверхностью.

### Ветровая статистика

Исходные данные о средней скорости и направлении ветра в районе исследования соответствуют данным метеорологической станции аэропорта «Жуляны», г. Киев. Измерения скорости и направления ветра проводились в течение 2-х лет с интервалом осреднения 3 часа. Дальнейшая обработка указанных данных по-

зволила построить соответствующую розу ветров (рис. 1) и определить среднюю скорость ветра по 8 румбам на высоте флюгера  $z_f = 10$  м.

Как видно из приведенных данных (табл. 1) в районе исследования преобладают Западный и Юго-Западный ветер.

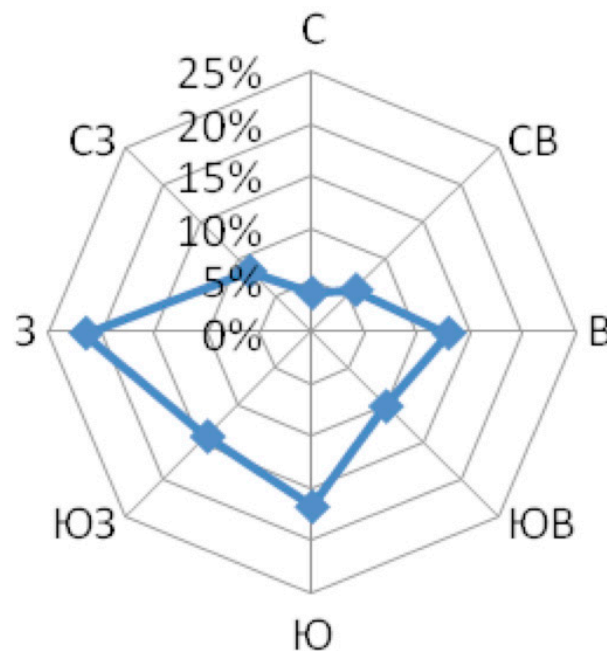


Рис. 1. Роза ветров в районе исследования.

### Математическая модель

Воздушные потоки в приземном слое атмосферы традиционно моделируются посредством численного решения системы уравнений переноса импульса турбулентным ветровым потоком, которая замыкается двумя дополнительными уравнениями для кинетической энергии турбулентности (5, а) и диссипации кинетической энергии турбулентности (5, б):

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (5, \text{а})$$

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}, \quad (5, \text{б})$$

где  $G_k$  – генератор кинетической энергии турбулентности,  $\mu_t$  – турбулентная вязкость потока,

Табл. 1. Направление и средняя скорость ветра

Румб	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ
Роза ветров 2007 – 2008 гг.	4 %	6 %	13 %	10 %	17 %	14 %	21 %	8 %
Средняя скорость ветра, м/сек	3,4	3,9	3,4	3,0	3,4	3,2	5,0	4,7

которая рассчитывается по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (6)$$

где  $C_\mu$ ,  $C_{1\varepsilon}$ ,  $C_{2\varepsilon}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – постоянные стандартной  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности, значения которых были предложены Panofsky & Dutton в 1984 г. для CFD-моделирования ветровых потоков в приземном слое атмосферы над сложной пересеченной местностью [12]:

$$C_\mu = 0,033, C_{1\varepsilon} = 1,176, C_{2\varepsilon} = 1,92, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1,3. \quad (7)$$

Выбор модели турбулентности обусловлен результатами исследовательских работ [3, 12], в которых была проведена оценка различных моделей турбулентности с точки зрения их пригодности для численного моделирования процессов переноса в воздушном потоке формирующимся в приземном слое атмосферы. Было отмечено, что при достаточно высокой точности стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель позволяет быстрее получить численное решение по сравнению со многими другими моделями турбулентности, и таким образом находит широкое распространение в инженерных приложениях [3].

#### **Численное моделирование ветрового потока в приземном слое атмосферы**

Численное интегрирование системы дифференциальных уравнений, динамики вязкой жидкости реализуется в известных CFD-пакетах, таких как ANSYS Fluent, ANSYSCFX, Star CCM, PHOENICS, Open Form и другие. В последние десятилетия эти пакеты стали широко использоваться для моделирования процессов переноса при движении воздуха в атмосферном пограничном слое.

За время использования средств вычислительной гидродинамики для целей моделирования ветровых потоков над поверхностью

Земли были выработаны определенные алгоритмы построения CFD-моделей и соответствующие требования к ним [5,16], позволяющие достаточно точно моделировать течение воздуха в приземном слое атмосферы.

При построении CFD-модели движения воздуха в приземном слое атмосферы одновременно должны быть выполнены четыре условия [5, 4]:

1. Достаточно высокое разрешение расчетной сетки в вертикальном направлении, вблизи земной поверхности.

2. Горизонтальная однородность ветрового потока в области решения.

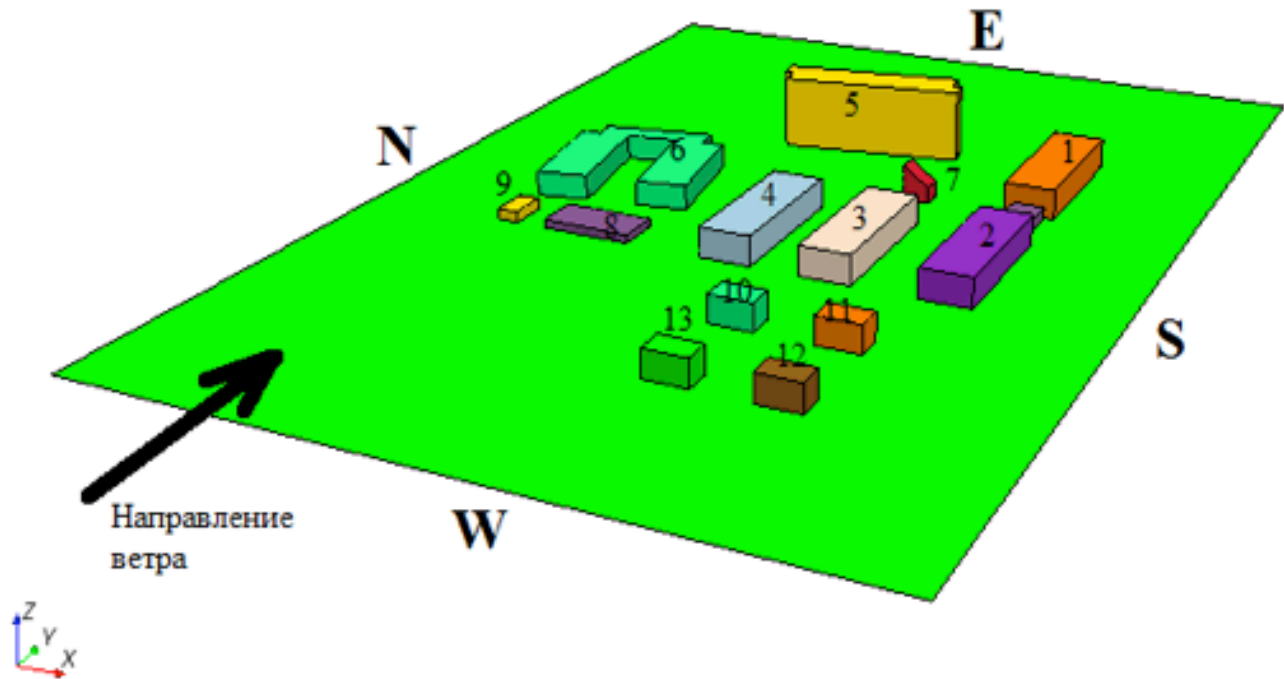
3. Расстояние  $z_p$  между центрами, прилегающего к поверхности земли первого слоя ячеек и самой поверхностью, должно быть больше, чем высота физической (или геометрической) песочной  $k_s$  шероховатости, которая учитывается в CFD-пакетах ( $z_p > k_s$ ).

4. Учет соотношения между физической высотой шероховатости  $k_s$  в CFD-пакетах и эффективной (аэродинамической) шероховатостью земной поверхности  $z_0$ , от которой зависит профиль скорости ветра в приземном слое атмосферы.

#### **Область решения и сеточная модель**

Область решения CFD-модели по оценке ветрового потенциала в зоне компактно расположенных зданий и сооружений ИТТФ НАН Украины (рис. 2) построена в соответствии с рекомендациями [5]. Так, плоскость входа в область решения должна отстоять от первых целевых сооружений на расстояние 5...6 высот наибольшего здания, плоскость выхода – на 7...9 (до 15) высот, верхняя граница может доходить до 4...5 высот.

Здания и сооружения моделируются прямоугольниками, сохраняющими основные геометрические размеры и конфигурацию зданий:



**Рис. 2. Геометрическая модель комплекса зданий ИТТФ НАН Украины по ул. Академика Булаховского.**

1 – 4 лабораторные корпуса (20×60×11 м);  
 5 – административный корпус (71×17×29 м).  
 6 – опытное производство – здание сложной конфигурации, в плане занимает квадрат 60×60 м, высота здания 9 м, расстояние между цехами 20 м;  
 7 – опытный дом пассивного типа (10×8×13 м);  
 8 – гараж (35×17×3 м);  
 9 – трансформаторная подстанция (8×15×4 м);  
 10 – 13 – помещения специального назначения. (11×20×10).

Размеры области решения  $x = 295$  м,  $y = 420$  м,  $z = 70$  м.

При построении сеточной модели учитывалась мощность современных компьютеров и достаточно универсальные сеткопостроители в CFD-пакетах, которые позволяют создавать сеточные модели практически любой сложности с высокой разрешающей способностью. Для целей настоящего моделирования в области решения задачи построена тетраэдральная сетка с призматическим слоем у поверхностей, фрагмент которой приведен на рис. 3. Количество ячеек в сетке составляет величину порядка 6 млн. (5 968 тыс.).

#### **Начальные и граничные условия**

Движение воздушного потока в области решения задачи определяются условиями на границах области. Ниже приводятся граничные условия, используемые в настоящей модели.

#### **Условия на входе в область решения**

На входе в область решения (западная граница модели, рис. 2) задавались профиль скорости и параметры турбулентности полностью развитого турбулентного горизонтально однородного ветрового потока, сформулированные Ричардом и Хоксни [17]:

- изменение средней скорости ветра по высоте;

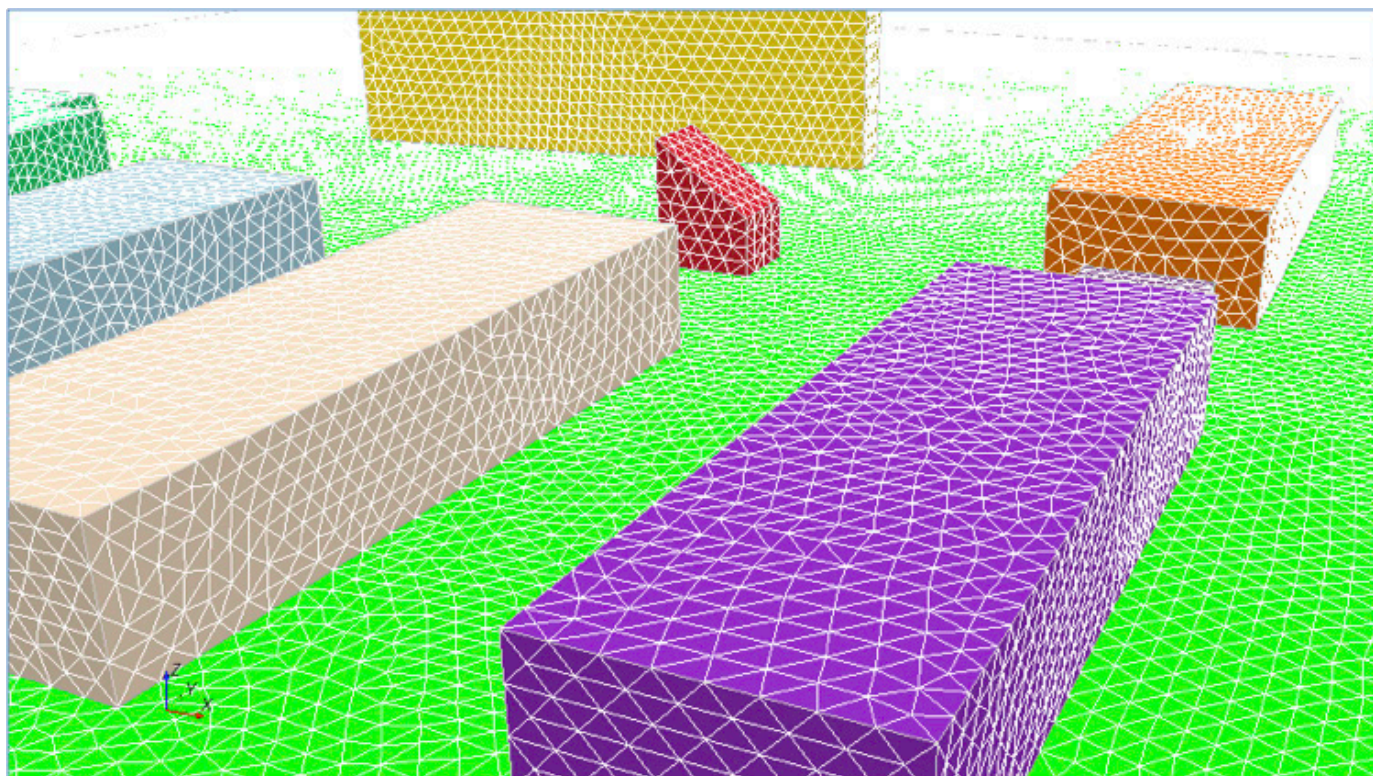
$$U(z) = \frac{u_f}{\kappa} * \ln \left( \frac{z+z_0}{z_0} \right); \quad (8)$$

- значение кинетической энергии турбулентности (КЭТ);

$$k(z) = u_f^2 / \sqrt{C_\mu}; \quad (9)$$

- значение диссипации кинетической энергии турбулентности.

$$\varepsilon(z) = \frac{u_f^3}{\kappa} (z + z_0)^{-1}. \quad (10)$$



*Рис. 3. Фрагмент расчетной сетки модели.*

В формулах (8–10)  $k = 0,41$  – постоянная Кармана,  $u_f$  – скорость трения;  $z_0$  – так называемый параметр аэродинамической шероховатости, или высота, на которой  $U = 0$ . Значение  $z_0$  зависит от типа подстилающей поверхности [15].

Верхняя и боковые границы области решения задавались как плоскости симметрии, что позволяет исключить градиенты скорости ветра на этих границах и, соответственно их влияние на целевой участок модели.

Нижняя граница области решения моделировалась как непроницаемая шероховатая стенка. Для поверхности Земли использовалась стандартная функция стенки с модификацией песочной  $k_s$ -шероховатостью [18]. Песочная  $k_s$ -шероховатость и постоянная шероховатости  $C_s$  согласовывались с аэродинамическим коэффициентом шероховатости  $z_0$  в соответствии с известным соотношением [16]

$$k_s = \frac{Ez_0}{C_s}. \quad (11)$$

В настоящей модели выбраны значения  $z_0 = 1$  м,  $k_s = 1,4$  м и  $CS = 7$ ,  $E = 9$ . На поверхностях стен зданий и сооружений также использовалась стандартная функция стенки, но с нулевой высотой песочной  $k_s$ -шероховатостью.

#### *Условия на выходе из области решения*

На выходе из области решения задавалось условие известного атмосферного давления  $P = 101325$  Па, а для возвратного течения задавались параметры турбулентности в соответствии с формулами (9,10).

#### *Результаты расчетов*

В результате испытания численной модели взаимодействия ветрового потока в приземном слое атмосферы с комплексом зданий и сооружений, относительно компактно расположенных в пределах городской застройки, получены поля скоростей, давлений, энергетические характеристики ветра и другие параметры ветрового потока. Ниже приводятся основные результаты моделирования для западного направления ветра, средняя скорость которого

на высоте флюгера составляет 5 м/с табл. 1. Западное направление ветра выбрано как наиболее вероятное направление согласно ветровой статистики (рис. 1).

На рис. 4 для плоских сечений области решения модели на высоте 10, 20, и 30 метров представлены поля значений безразмерного коэффициента скорости ветра  $K_v$  (1), который характеризует относительное увеличение (уменьшение) скорости ветра по сравнению со скоростью невозмущенного потока на входе в область решения.

Как видно из приведенных рисунков, уже на высоте 30 м при западном ветре большая часть целевой области находится в зоне практически невозмущенного ветрового потока, т.е. влияние зданий и сооружений, расположенных на поверхности Земли, минимально. Целевая высота 30 м выбрана не случайно. В соответствии с украинским законодательством, строения не выше 30 м не требуют дополнительных разрешительных документов, и именно такой высоты планируется башня ветровой турбины. В связи с этим результаты энергетических и турбулентных характеристик ветрового потока для целей выбора места монтажа ветровой энергетической установки приводятся именно для этой высоты.

На рис. 5 приведена схема наиболее вероятных мест расположения ветровой турбины.

Учитывая расположение дома пассивного типа рис. 5, целесообразно рассмотреть энергетические и турбулентные характеристики ветра на высоте 30 м вдоль линий А-А, В-В и С-С.

На рис. 6 – 8 приведены графики изменения удельной мощности ветрового потока (2), нормализованной кинетической энергии турбулентности (3) и интенсивности турбулентности вдоль линий А-А, В-В и С-С.

Как свидетельствуют графики на рис. 6 – 8, удельная мощность ветрового потока и его турбулентные характеристики имеют практически одинаковые значения, начиная от входного сечения области решения и до корпуса № 2 по трем указанным на рис. 5 возможным линиям размещения установки. Более того, турбулентные и энергетические характеристики ветра в рассматриваемой области практически совпадают с соответствующими показателями невозмущенного ветрового потока, что является наиболее благоприятным фактором для ветровой энергетической установки. В частности, среднее значение нормализованной кинетической энергии турбулентности невозмущенного потока на высоте 30 м составляет величину  $TKE_{cp} = 0,07854$ .

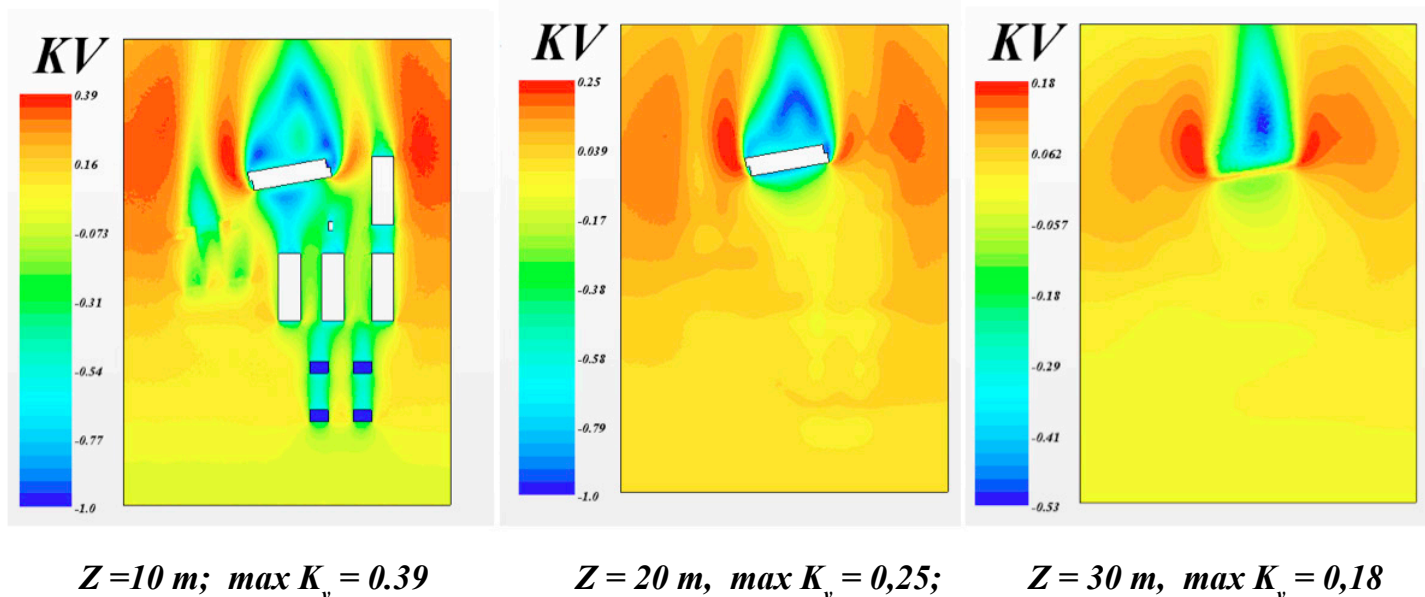


Рис. 4. Поле скоростей.

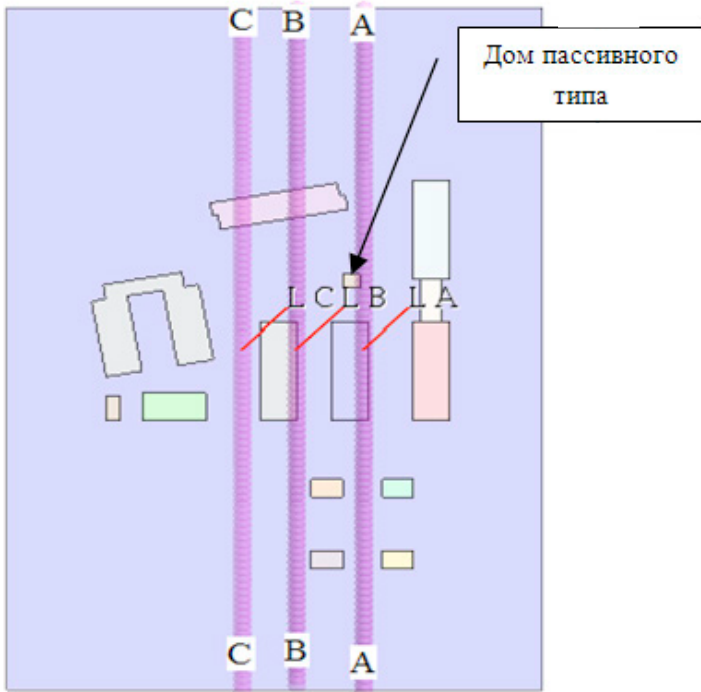


Рис. 5. Схема оценки ветровых показателей.

По мере приближения ветра к корпусу № 5 начинают резко возрастать турбулентные характеристики потока и падать его энергетические показатели. Это еще раз подтверждает отрицательное влияние турбулентности на работу традиционных ветровых турбин и нежелательность их установки в зонах повышенной турбулентности. Если же речь идет о специальных конструкциях ветроагрегатов, предназначенных для интеграции в городскую застройку [19], например с вертикальным расположением ротора турбины, то наиболее удачным местом его размещения будет место в районе северного торца корпуса № 5, на высоте до 20 м, рис. 4.

**Заключение и выводы**

Ветровые потоки вблизи зданий и сооружений значительно отличаются от общей ветровой обстановки в регионе. Атмосферный слой деформируется, турбулентность ветрового потока увеличивается, появляются отрывы, застойные зоны и т.д. В то же самое время устойчивая работа ветровых турбин требует однородного потока с умеренной турбулентно-

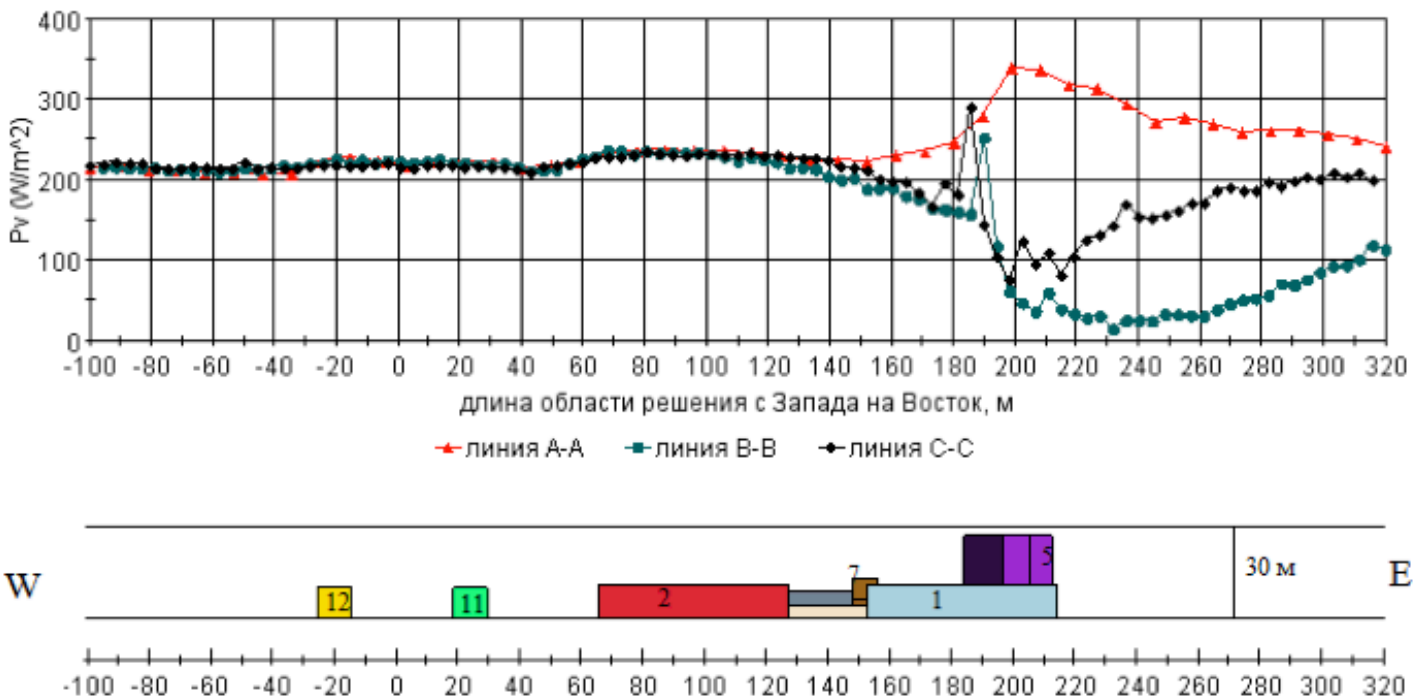


Рис. 6. Удельная мощность ветрового потока.



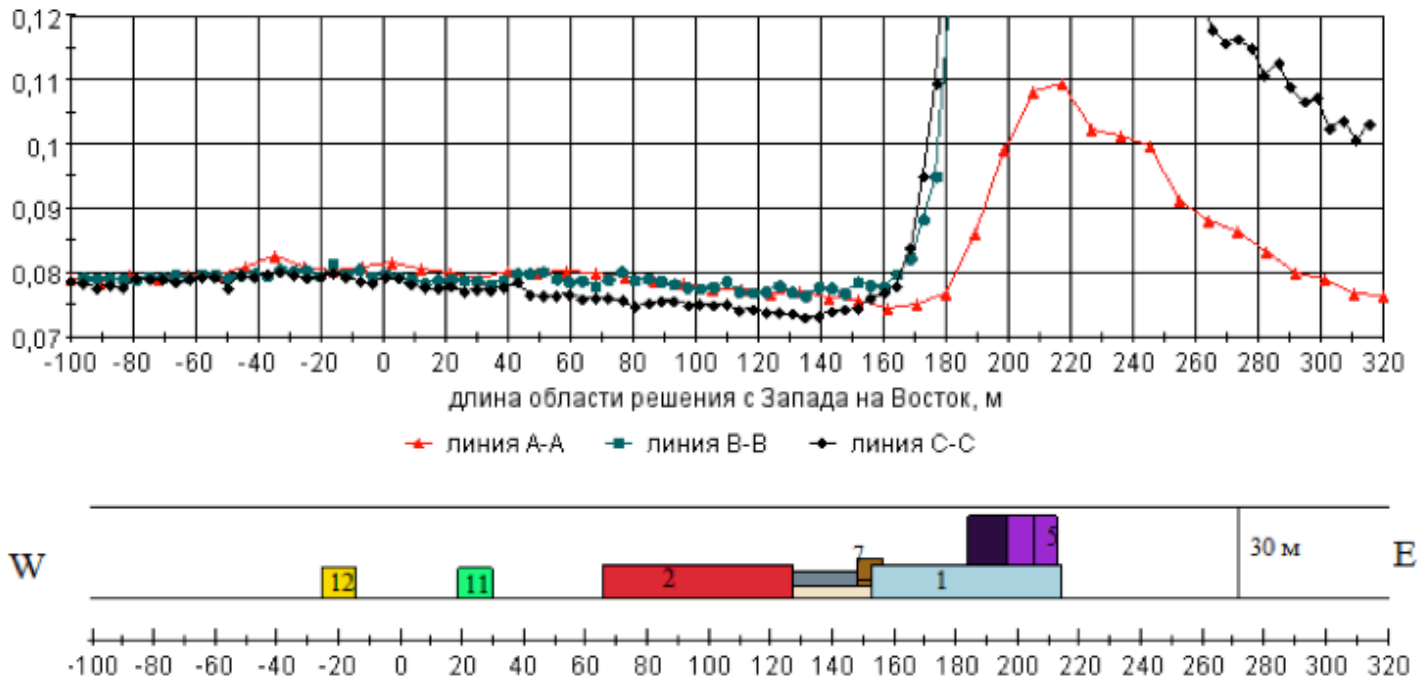


Рис. 7. Нормализованная кинетическая энергия турбулентности.

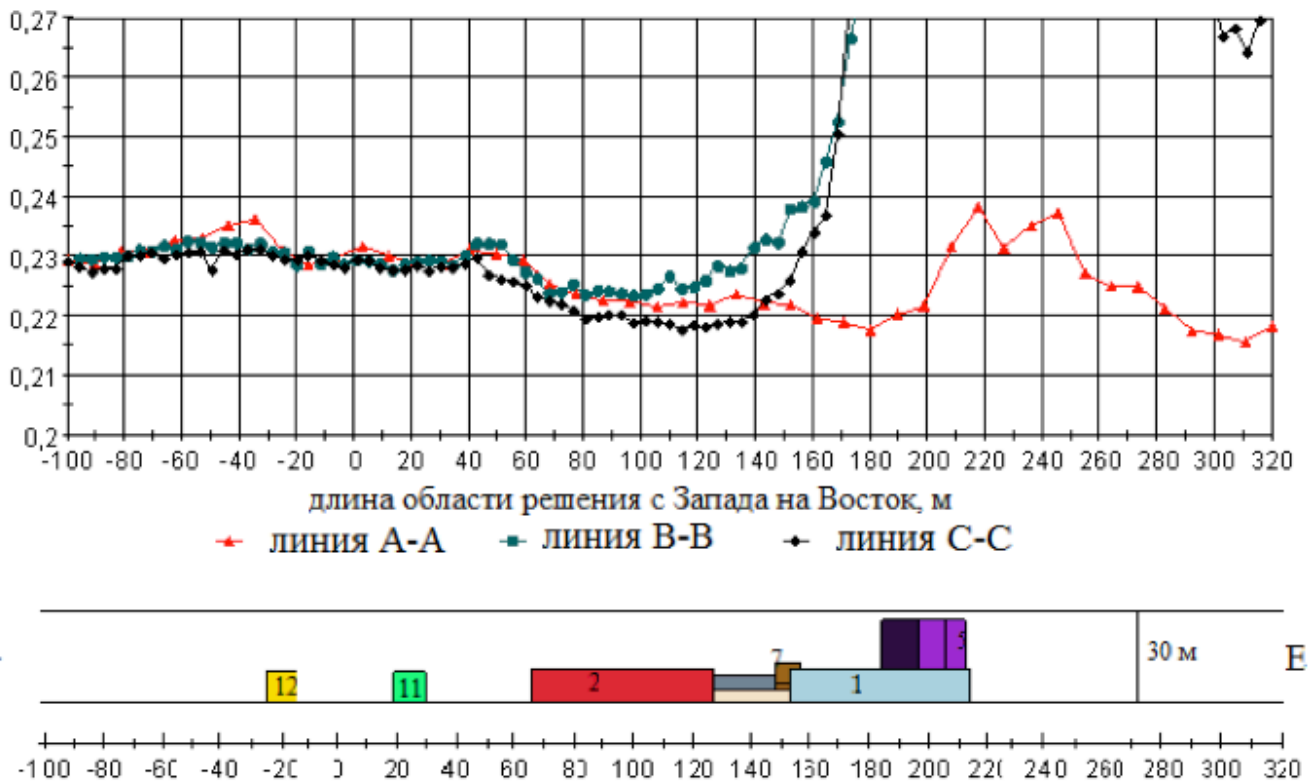


Рис. 8. Интенсивность турбулентности.

стью. Поэтому исследования гидродинамики воздушного потока в локальных застроенных зонах для целей интеграции ветровых установок имеют решающее значение. В связи с этим

была создана CFD-модель процессов переноса при взаимодействии ветрового потока в приземном слое атмосферы с комплексом зданий и сооружений ИТТФ НАН Украины.

В результате численных исследований получены трехмерные поля скоростей, удельной мощности ветра и его турбулентные характеристики в исследуемой области. Эти данные позволили провести анализ ветровых условий в рассматриваемой области и выбрать наиболее удачное место для расположения классической ветровой турбины, по оптимальному соотношению высокой скорости ветра с минимальными характеристиками турбулентности потока – вдоль линий АА, ВВ, СС до корпуса № 2 рис. 6 – 8.

Численное моделирование ветрового потока в рассматриваемой местности также указало на места возможного расположения ветровых турбин специальных конструкций, рассчитанных для работы в зонах застройки, здания и сооружения которой рассматриваются как концентраторы ветровой энергии. В таких зонах скорость ветра и соответственно его энергия обычно больше соответствующих характеристик невозмущенного строениями ветрового потока. Таких мест два (рис. 4) в районе северного и южного торцов корпуса № 5 – самого высокого здания в рассматриваемой области, на высотах до 30 м, численное моделирование показало самые высокие скорости ветра. Однако в этих же местах наблюдаются наибольшие значения турбулентных характеристик потока и его отрыв от кромок ограждающих здание конструкций именно поэтому ветровые турбины для установки в указанных местах требуют специальной конструкции.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. *Giorgio Crasto*. Numerical Simulations of the Atmospheric Boundary Layer. [http://www.windsim.com/documentation/papers\\_presentations/thesis/0702\\_Giorgio\\_Crasto.pdf](http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/thesis/0702_Giorgio_Crasto.pdf).

2. *Roger Garcia Barcelo*. Mesh sensitivity analysis on wind farms using CFD wind flow models and cfd wake models MONTREAL, AUGUST 28 2012.

3. *Stangroom Paul*. CFD-modeling of wind flow over terrain. Thesis submitted to the University of Nottingham for degree of Doctor of Philosophy, January 2004, 298 p. <http://etheses.nottingham.ac.uk/112/>

4. *Fallo Daniele*. Wind energy resource evaluation in a site of central Italy by CFD simulations Università Degli Studi di Cagliari Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea specialistica in Ingegneria Meccanica Anno Accademico 2006-2007. – 129 p.

5. *Franke Jorg, Hellsten Antti, Schlunzen Henke, Carissimo Bertrand*. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment cost action 732 quality assurance and improvement of microscale meteorological models May 2007 [www.cost.esf.org](http://www.cost.esf.org).

6. *Mertens Sander*. Wind Energy in the Built Environment. Published by: Multi-Science 5 Wates Way, Brentwood Essex, CM15 9TB, United Kingdom. 170 p.

7. *Renewables Global Futures Report* (Paris: REN21). REN21. 2013.

8. *Islam Abohela, Neveen Hamza, Steven Dudek*. Urban Wind Turbines Integration in the Built Form and Environment. FORUM Ejournal 10 (June 2011): 23-39 © 2011 by Newcastle University.

9. *Naglaa Ali Megahed*. Welcoming the wind: the potential for urban wind turbines to reshape the built environment. 2nd International Conference on Energy Systems and Technologies 18 – 21 Feb. 2013, Cairo, Egypt.

10. *Urban wind turbines-Guidelines* for small wind turbines in the built environment. [www.urbanwind.org](http://www.urbanwind.org).

11. *Басок Б.И.* Численное моделирование ветровых потоков в зоне городской застройки / Б.И. Басок, Б.В. Давыденко, В.Г. Новиков // Відновлювальна енергетика. – 2014. – №2 (37). – С. 46 – 59.

12. *Cabezon D., Sanz J., Beeck J.Van*. Sensitivity analysis on turbulence model for the ABL in complex terrain. [http://proceedings.ewea.org/ewec2007/allfiles2/134\\_Ewec2007\\_fullpaper.pdf](http://proceedings.ewea.org/ewec2007/allfiles2/134_Ewec2007_fullpaper.pdf).

13. *Иллюстрированный Справочник по Возобновляемой Энергетике: ЭНЕРГИЯ ВЕТРА*. [http://intersolar.ru/downloads/handbook/handbook3\\_5.pdf](http://intersolar.ru/downloads/handbook/handbook3_5.pdf).

14. *Cabezón D., Iniesta A., Ferrer E., Martí I.* Comparing linear and non linear wind flow models <http://proceedings.ewea.org/ewec2006/index2.php?page=searchresult&auteur=Cabazon>.

15. *Wieringa J., Davenport A.G., Grimmond B., Oke Tim R.* New revision of Davenport roughness classification. 3rd European & African Conference on Wind Engineering. Eindhoven, Netherlands, July 2001. [http://www.kcl.ac.uk/ip/suegrimmond/published\\_papers/DavenportRoughness2.pdf](http://www.kcl.ac.uk/ip/suegrimmond/published_papers/DavenportRoughness2.pdf).

16. *Blocken Bert, Stathopoulos Ted, Carmeliet Jan.* CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems Atmospheric Environment 41(2): 238 –252. © Elsevier 2007.

17. *Richards P., Hoxey R.* Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k-\epsilon$  turbulence model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46-47/1993, P.145 – 153.

18. *ANSYS FLUENT Theory Guide.* Release 14.0, November 2011.

19. *Dutton A.G., Halliday J.A., Blanch M.J.* The feasibility of building-mounted wind turbines (BUWTs): Achieving their potential for carbon emission reductions. Final report, 2005, 109 p. [http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/BUWT\\_final\\_v004\\_full.pdf](http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/BUWT_final_v004_full.pdf).

## ENERGY AND TURBULENT WIND FLOW CHARACTERISTICS IN THE BUILT ENVIRONMENT

**Novikov V.G.**

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, vul. Zhelyabova, 2a, Kyiv, 03680, Ukraine

Presented the results of numerical modeling of transport processes in the interaction of wind flow in the surface layer of the atmosphere with the buildings and structures located within the compact urban development. In the target area calculated three-dimensional velocity field of wind power density of the wind flow and turbulence characteristics in order to determine the most appropriate places of location of wind power installations for power supply pilot house passive type. References 19, tables 1, figures 8.

**Key words:** wind flow, the boundary layer of the atmosphere, CFD-model, turbulence model, three-dimensional field.

1. *Giorgio Crasto.* Numerical Simulations of the Atmospheric Boundary Layer. [http://www.windsim.com/documentation/papers\\_presentations/thesis/0702-Giorgio-Crasto.pdf](http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/thesis/0702-Giorgio-Crasto.pdf).

2. *Roger Garcia Barcelly Mesh* sensitivity analysis on wind farms using CFD wind flow models and cfd wake models MONTREAL, AUGUST 28, – 2012.

3. *Stangroom Paul.* CFD modeling of wind flow over terrain. Thesis submitted to the University of Nottingham for degree of Doctor of Philosophy, January 2004, 298 p. <http://etheses.nottingham.ac.uk/112/>

4. *Fallo Daniele.* Wind energy resource evaluation in a site of central Italy by CFD simulations Università Degli Studi di Cagliari Facoltà di Ingegneria Corso di Laurea specialistica in

Ingegneria Meccanica Anno Accademico 2006-2007/ – 129 p.

5. Franke Jorg, Hellsten Antti, Schlunzen Heinke, Carissimo Bertrand. Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment cost action 732 quality assurance and improvement of microscale meteorological models May 2007 www.cost.esf.org.

6. Mertens Sander. Wind Energy in the Built Environment. Published by: Multi-Science 5 Wates Way, Brentwood Essex, CM15 9TB, United Kingdom. 170 p.

7. Renewables Global Futures Report (Paris: REN21). REN21. 2013.

8. Islam Abohela, Neveen Hamza, Steven Dudek Urban Wind Turbines Integration in the Built Form and Environment. FORUM Ejournal 10 (June 2011): 23 – 39 © 2011 by Newcastle University.

9. Naglaa Ali Megahed Welcoming the wind: the potential for urban wind turbines to reshape the built environment. 2nd International Conference on Energy Systems and Technologies 18 – 21 Feb. 2013, Cairo, Egypt.

10. Urban wind turbines-Guidelines for small wind turbines in the built environment. www.urbanwind.org

11. Basok B.I. Chislennoe modelirovanie vetrovih potokov v zone gorodskoi zastroiki / B.I. Basok, B.V. Davidenko V.G. Novikov // Vidnovlyuvalna energetika. –2014. – №2 –37. – P. 46 – 59.

12. Cabezon D., Sanz J., Beeck J.Van. Sensitivity analysis on turbulence model for the ABL in

complex terrain. [http://proceedings.ewea.org/ewec2007/allfiles2/134\\_Ewec2007\\_fullpaper.pdf](http://proceedings.ewea.org/ewec2007/allfiles2/134_Ewec2007_fullpaper.pdf)

13. Illyustrirovannii Spravochnik po Vozobnovlyaemoi Energetike ENERGIYA VETRA. [http://intersolar.ru/downloads/handbook/handbook\\_3-5.pdf](http://intersolar.ru/downloads/handbook/handbook_3-5.pdf).

14. Cabezón D., Iniesta A., Ferrer E., Martí I. Comparing linear and non linear wind flow models <http://proceedings.ewea.org/ewec2006/index2.php?page=searchresult&auteur=Cabezon>.

15. Wieringa J., Davenport A.G., Grimond B., Oke Tim R. New revision of Davenport roughness classification. 3rd European & African Conference on Wind Engineering. Eindhoven, Netherlands, July 2001. <http://www.kcl.ac.uk/ip/suegrimmond/publishedpapers/DavenportRoughness2.pdf>.

16. Blocken Bert, Stathopoulos Ted, Carmeliet Jan. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems Atmospheric Environment 41(2): 238 – 252. © Elsevier 2007.

17. Richards P., Hoxey R., Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the  $k-\epsilon$  turbulence model. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 46-47/1993, P.145 – 153.

18. ANSYS FLUENT Theory Guide. Release 14.0, November 2011.

19. Dutton A.G., Halliday J.A., Blanch M.J. The feasibility of building-mounted wind turbines (BUWTs): Achieving their potential for carbon emission reductions. Final report, 2005, 109 p. [http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/BUWT\\_final\\_v004\\_full.pdf](http://ukerc.rl.ac.uk/pdf/BUWT_final_v004_full.pdf).

Получено 05.02.2015

Received 05.02.2015