

УДК 621.311

Б.И.Басок, чл.-корр. НАН Украины, **Б.В.Давыденко**, докт.техн.наук,
В.Г.Новиков, канд.техн.наук (Институт технической теплофизики НАН Украины, Киев)

Численное моделирование ветровых потоков в зоне городской застройки

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

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

Наведено результати чисельного моделювання процесів переносу при взаємодії вітрового потоку у приземному шарі атмосфери з будівлями та спорудами, що компактно розташовані у межах міської забудови. Розраховано тривимірні поля швидкості і тиску вітрового потоку в цільовій області з метою визначення місць найбільш доцільного розташування вітрових енергетичних установок для електрозабезпечення експериментального будинку пасивного типу.

Ключові слова: вітровий потік, граничний шар атмосфери, CFD-модель, модель турбулентності, тривимірні поля.

Вступление. Развитие технологий использования возобновляемых источников энергии, особенно энергии ветра, к настоящему времени достигло такого уровня, который позволяет им конкурировать со стандартными источниками энергии даже без помощи экономических стимулов, таких как "зеленый" тариф. Такое положение дел позволило в конце 2008 года странам Европейского Союза достичь соглашения о том, что к 2020 году доля возобновляемых источников в общем балансе потребления энергии должна составить величину до 20%. При этом значительная часть от указанной величины приходится на ветроэнергетику [1]. В Украине установленные мощности ветроэнергетики к 2030 году должны достичь уровня 3-4 ГВт.

В течение многих лет для оценки энергетического ресурса ветра использовалась компьютерная программа WasP (Wind Atlas Analysis and Application Program), разработанная в научно-исследовательском центре Riso DTU (Дания) [2]. В программе используется упрощенная модель оценки ветрового потока, позволяющая привести ветровую статистику к местным условиям возможного расположения ветроэнергетических мощностей. Однако, как показано в [2], использование WasP-модели ограничено случаями относительно ровной земной поверхности с

небольшими возвышениями и впадинами, исключая отрывы ветрового потока и возникновение возвратных течений. На данный момент для исследований энергетического потенциала ветрового потока в условиях сложного рельефа местности и, тем более, в условиях городской застройки имеет смысл использовать средства вычислительной гидродинамики – CFD-моделирования. В сравнительных исследованиях [4–6] показаны существенные преимущества CFD-моделей ветрового потока по сравнению с WasP-моделями.

В настоящее время уже существует достаточно большое количество работ, посвященных методологии и оценке энергетического потенциала ветра в условиях сложного рельефа земной поверхности и в пределах городской застройки. В частности, в работе [1] для целей ветровой энергетики подробно описывается численное моделирование атмосферного пограничного слоя (АПС), достаточно точно оптимизированы расчетные сетки для CFD-моделирования ветрового потока над сложным рельефом земной поверхности и на морском шельфе. Работа [7] посвящена вопросам интеграции ветровых турбин в городскую застройку, отдельные здания и сооружения которой рассматриваются как концентраторы ветровой энергии. В работе также указывается, что при

необходимости установки ветровых турбин в пределах городской застройки прогноз энергетического потенциала ветра необходимо проводить еще на стадии ее архитектурного планирования.

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

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

В данной работе рассмотрены результаты численного моделирования обтекания воздушным потоком комплекса рядом стоящих зданий. Основными задачами моделирования являются определение энергетических параметров ветрового потока с целью выбора участка для наиболее рационального расположения ветровых энергетических установок. В задачу исследования входит также определение внешних условий вблизи ограждающих конструкций зданий для последующего их использования в расчетах систем отопления и вентиляции, что позволит провести оценку общего потребления энергии тем или иным сооружением. В данном случае объектом исследования является комплекс зданий ИТТФ НАН Украины, расположенных по адресу: г. Киев, ул. Академика Булаховского, 2.

Моделирование динамики воздушного потока в пределах городской застройки базируется на рассмотрении достаточно большой области атмосферного пограничного слоя, высота которого в соответствии с рекомендациями [8] зависит от высоты самого высокого здания.

Для решения 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. Так же, как и при построении большинства моделей динамики воздушных потоков в пределах АПС [4, 9], в настоящей работе принимается нейтральная стратификация атмосферы над рассматриваемой местностью, что позволяет не учиты-

вать теплообмен между воздухом и подстилающей земной поверхностью.

Физическая постановка задачи.

Атмосферный пограничный слой.

Движение воздушных масс в атмосфере происходит под действием сил горизонтального барического градиента, силы Кориолиса, центробежной силы и силы трения воздуха о подстилающую поверхность Земли. Вблизи поверхности Земли сила трения воздуха о подстилающую поверхность тормозит воздушный поток, и вследствие турбулентного перемешивания эффект торможения распространяется по вертикали на некоторую область, называемую пограничным слоем атмосферы. Толщина атмосферного пограничного слоя при нейтральной стратификации атмосферы зависит от силы ветра, шероховатости подстилающей поверхности и широты местности. В пределах АПС скорость ветра возрастает с высотой и на верхней границе пограничного слоя, где силой трения воздуха о поверхность Земли можно пренебречь, достигает значения градиентной скорости [10].

Атмосферный пограничный слой, толщина которого может достигать высоты порядка 1,5-3 км [10, 12], является нижней частью тропосферы Земли, и процессы, происходящие в нем, напрямую зависят от особенностей контакта воздуха с земной поверхностью. Особенно сильно влияние поверхности Земли на ветровой поток заметно в нижней части АПС, или в так называемом приземном слое атмосферы, который обычно не превышает 200-400 м. Как показано в [13, 14], профиль скорости ветрового потока в указанной области АПС достаточно точно описывается логарифмическим законом.

$$U = U_f \frac{\ln z - \ln z_o}{\ln z_f - \ln z_o}, \quad (1)$$

где U_f – скорость ветра на высоте $z_f = 10-12$ м (высота флюгера); z_o – так называемый параметр шероховатости или высота, на которой $U = 0$. Значение z_o зависит от типа подстилающей поверхности.

На практике для описания профиля скорости ветрового потока используется также степенная зависимость вида:

$$U = U_f \left(\frac{z}{z_f} \right)^m, \quad (2)$$

где показатель степени m зависит от типа рассматриваемой местности.

Следует отметить, что логарифмический профиль скорости имеет теоретическое обоснование [11], в то время как степенной закон выражает аппроксимацию экспериментальных данных.

В работе Э.Симиу [10] показано, что толщину приземного слоя атмосферы, где скорость воздушного потока достаточно точно описывается логарифмической функцией, можно оценить по формуле:

$$z_l = b(u_*/f), \quad (3)$$

где f – параметр Кориолиса, зависящий от широты местности; b – константа ($b = 0,015-0,03$ [10]); u_* – скорость трения. Соотношение (3) выражает известный из экспериментов факт, что логарифмический слой охватывает некоторую часть (порядка 10%) толщины пограничного слоя [10].

Наиболее полные данные об аэродинамической шероховатости подстилающей поверхности z_0 – условной высоте шероховатости поверхности земли, на которой скорость ветра принимается равной нулю, можно найти в [9], а значения показателя степени m – в [10]. Для крупных городов $m = 0,33-0,4$, а $z_0 \sim 0,7-1$ м. Существует [12] определенная классификация шероховатости земной поверхности в зависимости от того, что на ней расположено. Наиболее полные данные для z_0 приведены в работе [9].

Аэродинамическая шероховатость земной поверхности – это параметр, определяемый экспериментально, и по мере увеличения чувствительности и точности приборов к настоящему времени осуществляются попытки уточнения приведенной выше классификации. Так, в работе [12] приведена несколько иная, более укрупненная классификация шероховатостей. В этой работе также приведено соответствие z_0 , которое используется в логарифмическом профиле (1), показателю степени m в степенном законе (2) распределения скорости ветра в приземном слое АПС.

Отличие атмосферного пограничного слоя от пограничного слоя на плоской пластине.

Атмосферный пограничный слой имеет ряд характерных особенностей, отличающих его от

известного турбулентного слоя на гладкой пластине. Сразу следует отметить, что и АПС, и пограничный слой на плоской пластине – это определенные физические модели, которые отражают основные характеристики той или иной физической реальности. Если исключить влияние масштаба, то главное различие в этих физических моделях заключается в сути физических процессов, которые лежат в основе этих разных моделей.

Как показано в предыдущем параграфе, при построении модели АПС рассматривается совокупность минимум трех сил, действующих на воздушные массы в атмосфере Земли и приводящих к формированию атмосферного пограничного слоя. При моделировании же пограничного слоя на плоской пластине основное внимание уделяется силе трения, которая обуславливает формирование пограничного слоя при взаимодействии плоской пластины с потенциальным безградиентным потоком жидкости.

И в том, и в другом случае скорость потока на верхней границе слоя постоянна, однако в случае АПС постоянство скорости обеспечивается равновесием сил, действующих на воздушные массы в атмосфере, а в случае плоской пластины – отсутствием каких-либо сил в потенциальном потоке жидкости. Учет только одной силы трения в модели пограничного слоя на пластине приводит к его росту вниз по потоку, в то время как при сочетании определенных факторов в атмосфере (достаточно высокая скорость ветра, большие расстояния разгона воздушных масс, нейтральная стратификация атмосферы) приводит к постоянству толщины АПС (рис. 3, 4) и существованию горизонтально-однородных атмосферных течений, которые подтверждаются наблюдениями.

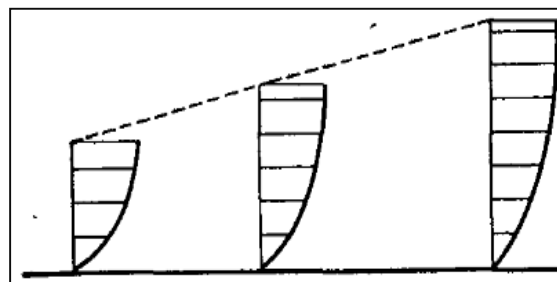


Рис. 3. Схема атмосферного пограничного слоя (АПС).

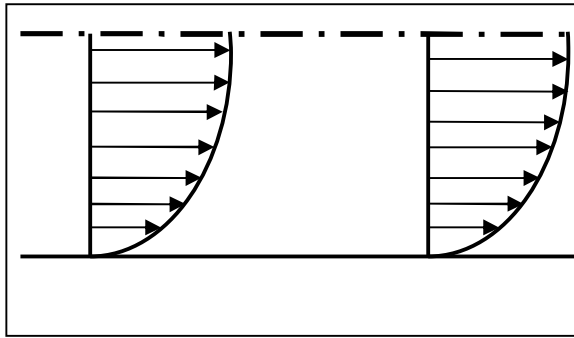


Рис. 4. Развитие пограничного слоя на пластине.

Посредством современных средств вычислительной гидромеханики (CFD-моделирования) можно получить численные модели как АПС, так и пограничного слоя на плоской пластине. На рис. 5, 6 представлены результаты расчета профилей скорости в горизонтально-однородном пограничном слое атмосферы и в пограничном слое на плоской пластине. В обоих случаях на входе в расчетную область задавался одинаковый профиль скорости, описываемый выражением (1).

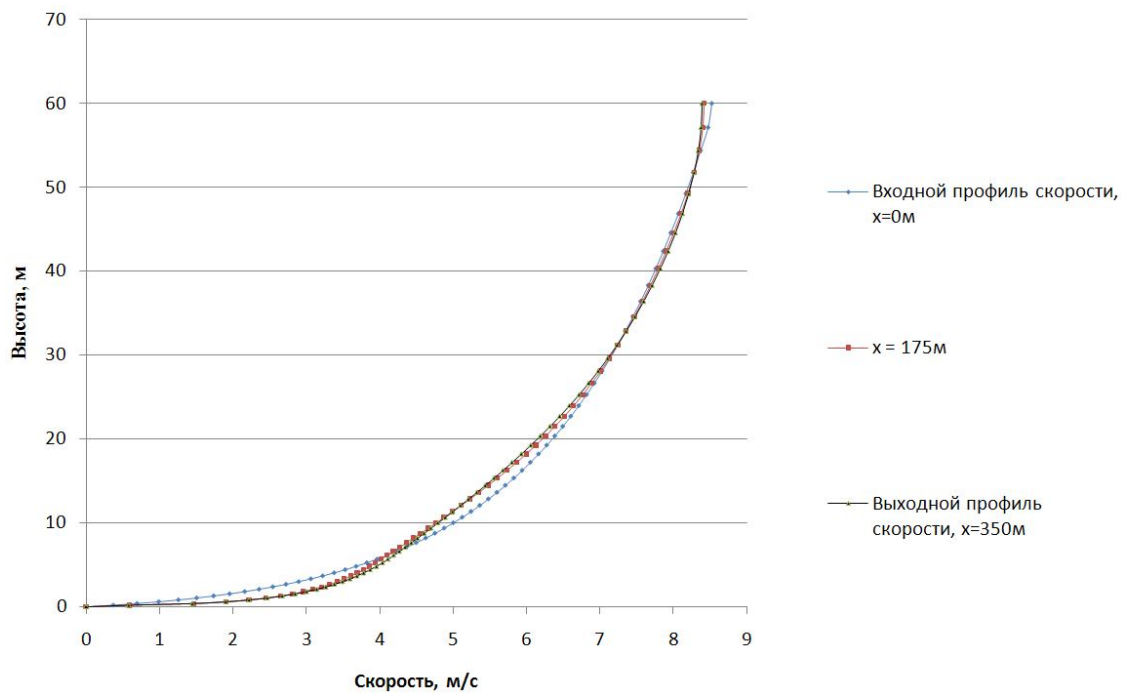


Рис. 5. Профили скорости в горизонтально-однородном пограничном слое атмосферы.

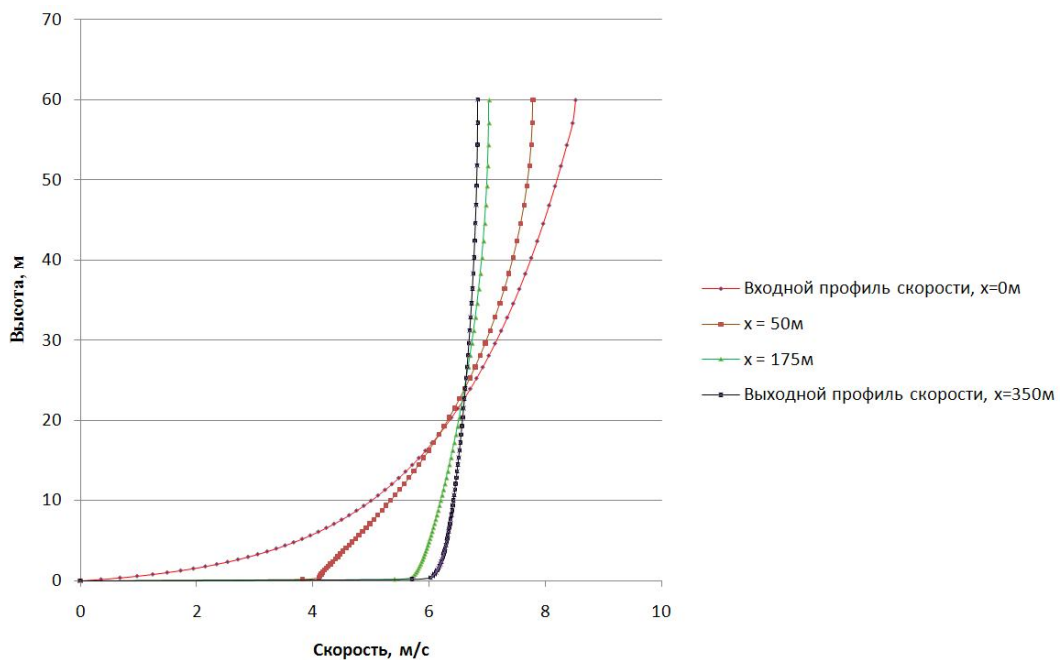


Рис. 6. Профили скорости в пограничном слое на пластине.

В АПС профили скорости на входе в область решения, в середине и на выходе из области решения практически совпадают. По сути, такая картина соответствует горизонтально-однородному атмосферному течению (рис. 5). Горизонтальная неоднородность течения в пограничном слое над плоской пластиной приводит к деформации профиля скорости в пограничном слое вниз по течению (рис. 6).

Приведенные выше данные получены в результате испытания тестовой CFD-модели "пустой" области решения с геометрическими параметрами, совпадающими с 3D CFD-моделью, построенной для оценки взаимодействия ветрового потока в приземном слое атмосферы с комплексом зданий и сооружений. Об особенностях численного моделирования горизонтально-однородных пограничных слоев речь пойдет ниже.

Ветровая статистика.

Исходные данные о силе 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 позволила построить соответствующую розу ветров (рис. 7) и определить

среднюю скорость ветра по 8 румбам на высоте флюгера $z_f = 10$ м (таблица 3).

Как видно из приведенных данных, в районе исследования преобладает западный и юго-западный ветер.

Математическая модель.

Движение воздуха в атмосфере подчиняется фундаментальным уравнениям механики сплошных сред. В данном случае это система уравнений движения вязкой жидкости Навье-Стокса [15]:

$$\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0;$$

$$\frac{\partial(u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(uv)}{\partial y} + \frac{\partial(uw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right];$$

$$\frac{\partial(vu)}{\partial x} + \frac{\partial(v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(vw)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \frac{\partial v}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right];$$

$$\frac{\partial(wu)}{\partial x} + \frac{\partial(wv)}{\partial y} + \frac{\partial(w^2)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{eff} \left(\frac{\partial w}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left[v_{eff} \frac{\partial w}{\partial z} \right].$$

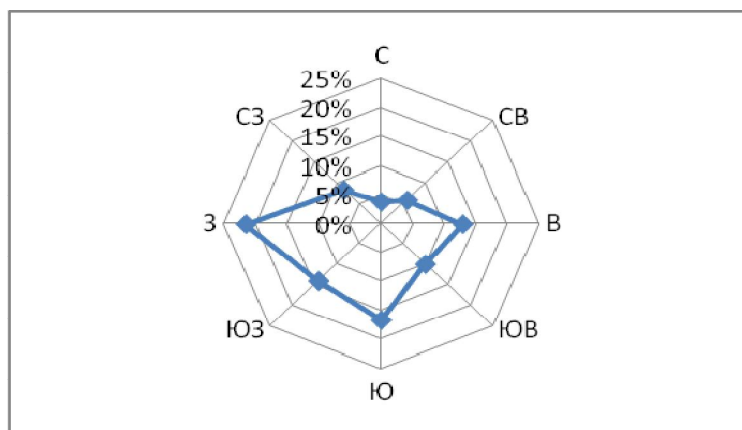


Рис. 7. Роза ветров в районе исследования.

Таблица 3. Направление и средняя скорость ветра

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

Воздушные потоки в приземном слое атмосферы традиционно моделируются посредством численного решения осредненных по Рейнольдсу системы дифференциальных уравнений Навье-Стокса, которая замыкается двумя дополнительными уравнениями для кинетической энергии турбулентности (4), и диссипации кинетической энергии турбулентности (5):

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon; \tag{4}$$

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

где G_k – генератор кинетической энергии турбулентности; μ_t – турбулентная вязкость потока, которая рассчитывается по формуле:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}, \tag{6}$$

где $C_\mu, C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, \sigma_k, \sigma_\epsilon$ – постоянные стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности, значения которых были предложены Лаундером и Сполдингом и которые по умолчанию используются в пакетах для CFD-моделирования, таких как FLUENT, Star CCM и др.:

$$C_\mu = 0,09; C_{1\epsilon} = 1,44; C_{2\epsilon} = 1,92; \sigma_k = 1; \sigma_\epsilon = 1,3. \tag{7}$$

Постоянные (7) были определены экспериментально и успешно используются при решении широкого круга технологических задач течения жидкостей и газа. Вместе с тем, как показано в [16], постоянные модели (7) не в полной мере подходят для моделирования ветрового потока в атмосферном приземном слое. Последнее подтверждается экспериментальными данными, в частности [4]. В связи с этим, начиная с 80-х

годов прошлого века, рядом исследователей были получены другие значения постоянных для стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности, которые приведены в табл. 4.

В работе [3] проведено тестирование стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности при CFD-моделировании ветрового потенциала местности Alaiz hill в провинции Наварра (север Испании) с перепадом высот земной поверхности до 1000 м над уровнем моря. Показано, что наилучшие совпадения с экспериментальными данными дает стандартная $k-\epsilon$ модель турбулентности при использовании постоянных модели, полученные Launder & Spalding 1974, Richards & Hoxey 1993 и Panofsky & Dutton 1984 (таблица 4).

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, ANSYS CFX, 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 или, если быть более точным, в приземной части АПС.

За время использования средств вычислительной гидродинамики для целей моделирования ветровых потоков над поверхностью Земли, на которой расположены различные объекты, были выработаны определенные алгоритмы построения CFD-моделей и соответствующие требования к ним [8, 17], позволяющие достаточно точно моделировать течение воздуха в приземном слое атмосферы.

Таблица 4. Значения коэффициентов для стандартной $k-\epsilon$ модели турбулентности

	Launder & Spalding 1974	Richards & Hoxey 1993	Panofsky & Dutton 1984	Detering & Etling 1985, Duynkerke 1988	Beljaars 1987	RNG $k\epsilon$ model Yakhot & Orszag 1986	Yang et al. 2009
C_μ	0,09	0,012	0,033	0,033	0,033	0,085	0,028
σ_k	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,7179	1,67
σ_ϵ	1,3	3,22	1,3	2,38	1,85	0,7179	2,51
$C_{1\epsilon}$	1,44	1,2	1,176	1,46	1,44	1,42	1,5
$C_{2\epsilon}$	1,92	1,92	1,92	1,83	1,92	1,68	1,92

При построении CFD-модели движения воздуха в приземном слое атмосферы одновременно должны быть выполнены четыре условия [8, 18]:

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) 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 (1).

Область решения и сеточная модель.

Область решения CFD-модели по оценке ветрового потенциала в зоне компактно расположенных зданий и сооружений ИТТФ НАН Украины (рис. 8) построена в соответствии с рекомендациями [8], в которых определяются геометрические размеры области решения модели в зависимости от высоты наибольшего моделируемого здания. Так, плоскость входа в область решения должна отстоять от первых целевых сооружений на расстояние 5-6 высот наибольшего здания, плоскость выхода – на 7-9 высот, верхняя граница может доходить до 4-5 высот.

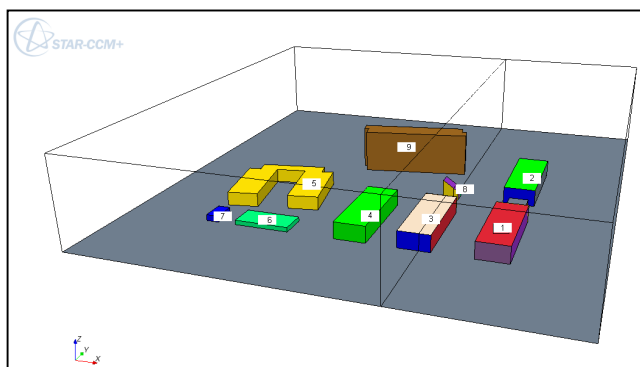


Рис. 8. Геометрическая модель комплекса зданий.

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

1-4 – лабораторные корпусы (20×60×11) м;

5 – опытное производство – здание сложной конфигурации, в плане занимает квадрат 60×60 м, высота здания 9 м, расстояние между цехами 20 м;

6 – гараж (35×17×3) м;

7 – трансформаторная подстанция (8×15×4) м;

8 – опытный дом пассивного типа (10×8×13) м;

9 – административный корпус (71×17×29) м.

Размеры области решения: $x = 295$ м; $y = 320$ м; $z = 60$ 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. Вместе с тем, по соображениям затрат машинного времени, для расчета одного варианта в CFD-моделях ветрового потока в приземном слое для больших областей решения целесообразно строить неравномерные сетки с достаточно высоким разрешением вблизи поверхности Земли. Высота первого от поверхности слоя ячеек не должна превышать 1-2 м. На рис. 9 приведен фрагмент расчетной сетки области решения задачи.

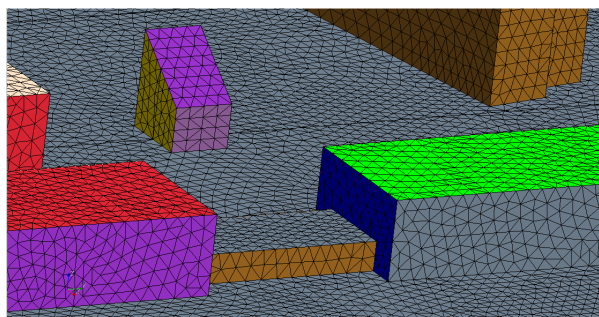


Рис. 9. Фрагмент расчетной сетки модели.

Ниже приводятся основные характеристики трехмерной расчетной сетки области решения:

- количество ячеек: 846 158;
- количество граней: 5 595 828.

Центры первого слоя ячеек расположены на расстоянии 1 м от поверхности земли.

Моделирование горизонтально однородного слоя.

Для обеспечения горизонтальной однородности ветрового потока в области решения (рис. 8) построена специальная двумерная CFD-подмодель, основные размеры, входные параметры и граничные условия которой соответствовали трехмерной модели:

1. Геометрические размеры пустой области соответствуют вертикальному сечению области решения трехмерной задачи.

2. Граничные условия и параметры турбулентности соответствуют трехмерной модели.

На входе в область решения задавались профиль скорости и параметры турбулентности полностью развитого турбулентного горизонтально-однородного ветрового потока, сформулированные Ричардом и Хоксни [19]:

- изменение средней скорости ветра по высоте:

$$U(z) = u_f / \kappa * \ln((z + z_o) / z_o); \quad (9)$$

- значение кинетической энергии турбулентности (КЭТ) на входе:

$$k(z) = u_f^2 / \text{sqrt}(C_\mu); \quad (10)$$

- значение диссипации кинетической энергии турбулентности:

$$\varepsilon(z) = u_f^3 / \kappa (z + z_o). \quad (11)$$

В формулах (9)–(11) $\kappa = 0,41$ – постоянная Кармана; z_o – параметр шероховатости поверхности; u_f – скорость трения.

В выходном сечении давление принимается равным нулю, параметры турбулентности возвратного течения задавались такие же, как и на входе в область решения. На верхней границе области принималось условие симметрии, которое исключает изменение скорости и давления по вертикали вблизи верхней границы. На нижней грани области решения использовалась стандартная пристеночная функция с песочной шероховатостью k_s .

Посредством двумерной модели была согласована песочная k_s -шероховатость области решения CFD-модели с z_o шероховатостью профиля скорости на входе в расчетную область (9). Если этого не сделать, то в пустой области решения сформируется новый пограничный слой, обусловленный трением на нижней грани области решения, которое нарушает однородность ветрового потока.

В упомянутых выше CFD-пакетах (ANSYS Fluent, ANSYS CFX, Star CCM и др.) для расчета потоков над шероховатой поверхностью заложена разработанная на основе опытов Никурадзе [15] песочная k_s -шероховатость, которая соответ-

ствует абсолютной высоте шероховатости поверхности в метрах. В этих пакетах учет k_s -шероховатости осуществляется путем введения в выражение для закона стенки функции, $\Delta B(k_s^+)$, зависящей от высоты шероховатости k_s [17]:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(z^+) + B - \Delta B(k_s^+), \quad (12)$$

где $u^+ = U/u^*$; $z^+ = u^*z/\nu$; $k_s^+ = u^*k_s/\nu$; $B = 5,2$; ν – кинематическая вязкость воздуха;

$$\Delta B = \frac{1}{\kappa} \ln(k_s^+) - 3,3. \quad (13)$$

Выражение (12) представляет собой классический закон стенки [15] с добавкой функции $\Delta B(k_s^+)$. Подставляя (13) в (12), получим:

$$u^+ = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z^+}{k_s^+}\right) + 8,5. \quad (14)$$

Если в (14) u и z заменить на значения u_p и z_p , которые соответствуют значениям скорости и высоты z в центрах первого слоя ячеек над подстилающей поверхностью, то получим закон стенки для полностью k_s -шероховатой поверхности. В CFD-пакетах (например, ANSYS Fluent) используется несколько иная функция для расчета скорости потока над полностью шероховатой стенкой [21]:

$$\frac{u_p}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{Eu^*z_p}{\nu C_s k_s^+}\right), \quad (15)$$

где $E = 9,793$ и C_s – константы. Причем в ANSYS Fluent значение C_s может изменяться в пределах от нуля до единицы, а в Star CCM таких ограничений нет.

При моделировании же ветрового потока имеет место другая, так называемая z_o -шероховатость, также вытекающая из выражения для расчета скорости ветра вблизи стенки:

$$\frac{u_p}{u^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z_p}{z_o}\right). \quad (16)$$

Выражения (15) и (16) эквивалентны, если при моделировании приземного слоя принять:

$$k_s = \frac{Ez_o}{C_s}. \quad (17)$$

Таким образом, получено соотношение между k_s -шероховатостью и z_o -шероховатостью, что необходимо в соответствии с 4-м условием построения CFD-моделей АПС. В соответствии с формулой (17) значение k_s может достигать довольно больших значений: так, например, при $z_o = 1$ и $C_s = 1$ (максимальное значение для паке-

та ANSYS Fluent) $k_s = 10$ м, что входит в противоречие с первым условием построения CFD-моделей для оценки процессов переноса в приземном слое атмосферы.

Следует отметить, что в пакете Star CCM параметр k_s можно регулировать константой C_s таким образом, чтобы значение k_s не вышло за пределы z_p , а при моделировании в пакете ANSYS Fluent для определения C_s применять пользовательскую функцию. Таким образом, параметром C_s приводится в соответствие k_s – песочная шероховатость и z_o – шероховатость ветрового потока.

На рис. 10, 11 показана деформация поля скоростей и профилей скорости ветрового потока в случае изменения шероховатости подстилающей поверхности вниз по ветровому потоку на расстоянии в 150 м от входного сечения. В данном случае на рассматриваемую область с шероховатостью $z_o = 1$ м набегают однородный ветровой поток, сформировавшийся над поверхностью с шероховатостью $z_o = 0,025$ м.

Как видно из рис. 10, 11, при изменении шероховатости подстилающей поверхности в нижней части области решения формируется новый пограничный слой, обусловленный изменением параметров трения около поверхности.

Начальные и граничные условия 3D CFD-модели.

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

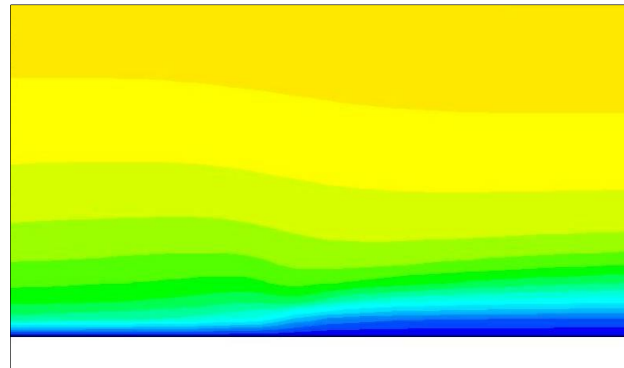


Рис. 10. Деформация поля скоростей при изменении шероховатости подстилающей поверхности.

Условия на входе в область решения.

Известно, что вертикальный профиль скорости ветра над подстилающей поверхностью в изотропном (однородном) пограничном слое атмосферы можно описать логарифмическим или степенным законами (1), (2). Причем, как показано в [20], при сравнении с экспериментальными данными какие-либо преимущества одного закона по сравнению с другим не найдены. Однако, там же [20] показано, что в нижней части АПС лучше работает логарифмический закон, а в верхней области – степенной. В рассматриваемой трехмерной модели (рис. 8, 9) использовался логарифмический закон профиля скорости.

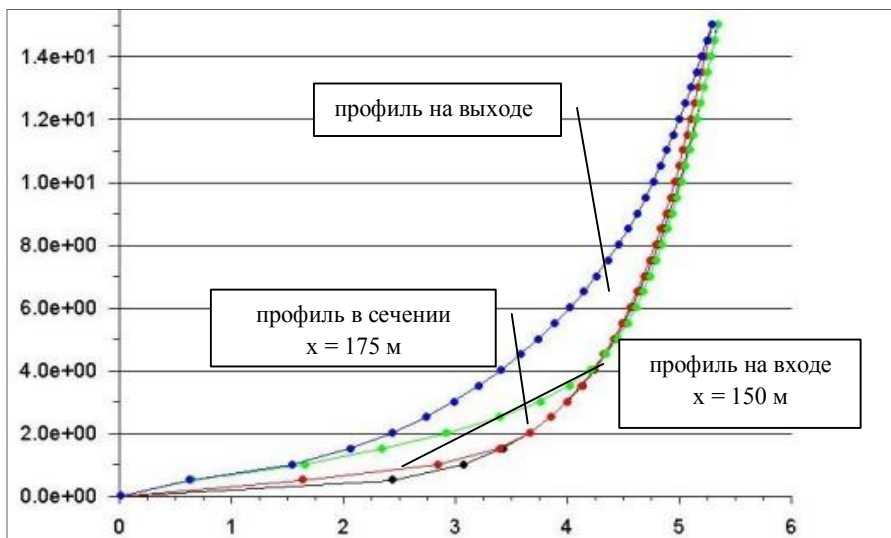


Рис. 11. Деформация профиля скорости ветрового потока.

Профиль скорости на входе, начальное поле скоростей в области решения, а также кинетическая энергия турбулентности и диссипация кинетической энергии турбулентности задавались в соответствии с формулами (9)–(11).

Условия на верхней, нижней и боковых границах области решения.

Нижняя граница области решения моделировалась как непроницаемая шероховатая стенка, верхняя и боковые границы – как плоскость симметрии. Последнее позволяет исключить вертикальную составляющую скорости ветра, что является одним из допущений модели.

Условия на выходе из области решения.

На выходе из области решения задавалось условие известного давления.

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 и энергетические параметры ветра. Приводятся основные результаты моделирования для западного направления ветра, как наиболее вероятного направления, соответствующего ветровой статистике (рис. 7). На рис. 16 показаны плоскости сечения модели, в которых строились поля основных параметров потока.

Поля давлений.

Известно, что для расчета систем вентиляции и теплоснабжения здания важными характеристиками являются поля давлений ветрового потока около ограждающих конструкций здания. Поэтому одной из основных целей создания настоящей модели было установление внешних граничных условий для проектирования систем вентиляции экспериментального дома пассивного типа и реконструкции вентиляции других зданий Института. Соответствующие поля давлений представлены на рис. 18, 19.

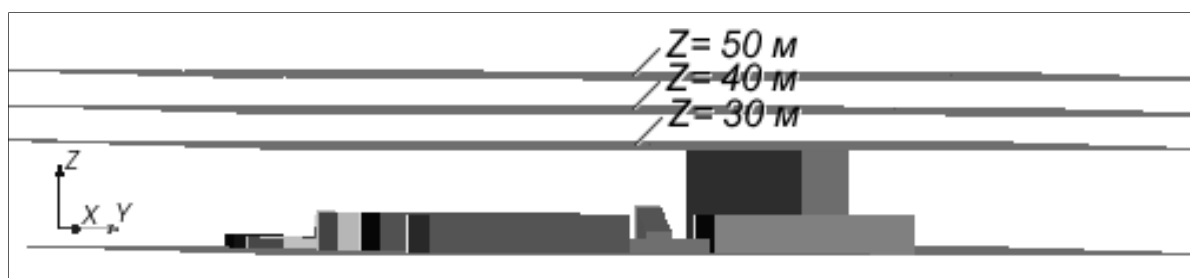
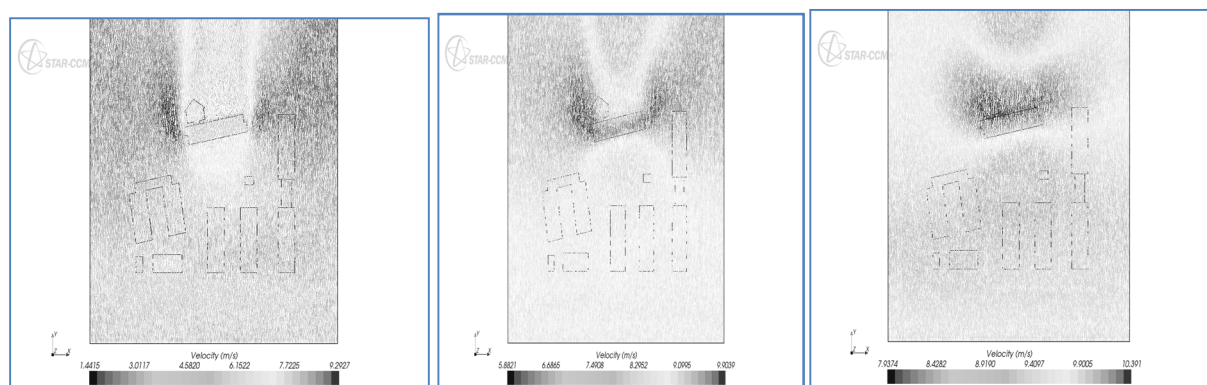


Рис. 16. Горизонтальные плоскости сечения отображения полевых данных.

Поля скоростей ветра



$Z = 30 \text{ м}; U_{max} = 9,3 \text{ м/с};$

$40 \text{ м}; U_{max} = 9,9 \text{ м/с};$

$50 \text{ м}; U_{max} = 10,4 \text{ м/с}.$

Рис. 17. Поле скоростей.

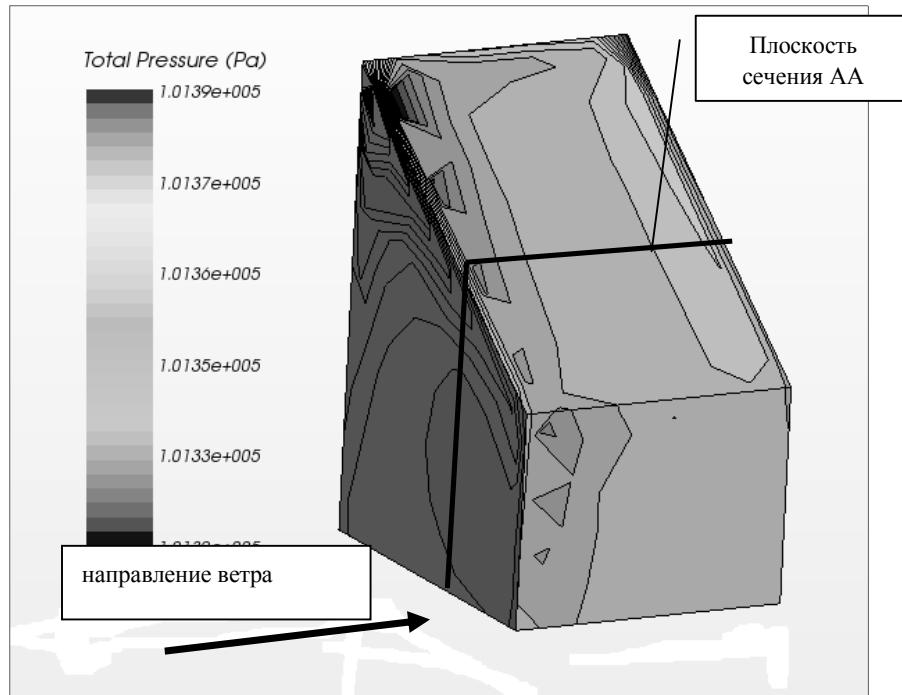
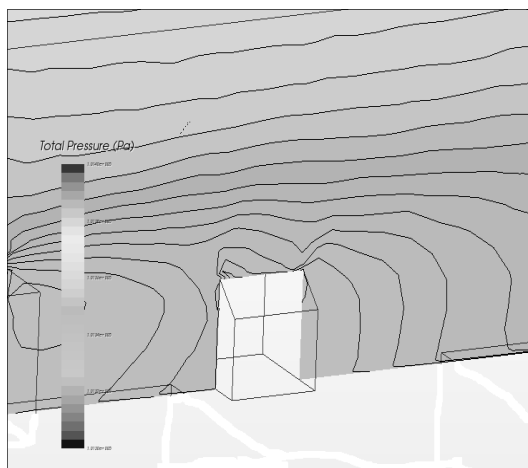
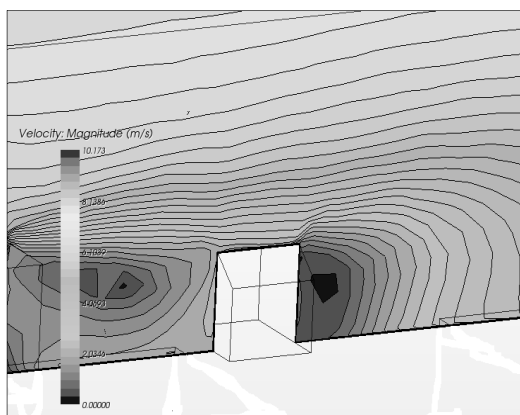


Рис. 18. Поле давлений на ограждающих конструкциях экспериментального дома пассивного типа.



a)



b)

Рис. 19: a) – поле давлений; b) – поле скоростей в сечении AA возле экспериментального дома.

Расчеты показали, что при западном ветре перепад давления между наветренной и заветре-

нной сторонами дома пассивного типа составляет $\Delta P = 20-25$ Па. Из рис. 19б видно, что циркуляционные зоны в ветровом потоке формируются не только с заветренной стороны здания, но и с наветренной стороны, что является следствием аэродинамического влияния соседних сооружений.

Оценка энергетических характеристик ветрового потока.

При оценке ветрового потока с точки зрения его эффективности для ветровых энергетических установок обычно оценивают следующие параметры [3]:

- коэффициент скорости: $K_g = \frac{U - U_{in}}{U_{in}}$;
- удельная мощность ветрового потока: $V_p = \frac{\rho U^3}{2}$;
- нормализованная кинетическая энергия турбулентности: $TKE = \frac{k}{U_{in}^2}$;
- интенсивность турбулентности: $I_t = \frac{\sqrt{2k/3}}{U}$.

Ниже на рис. 20-23 приведены поля указанных характеристик ветрового потока.

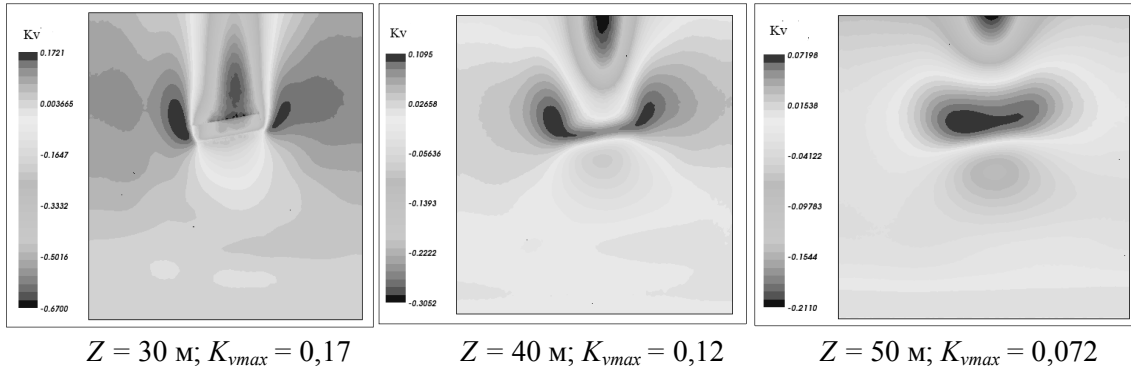


Рис. 20. Коэффициент скорости.

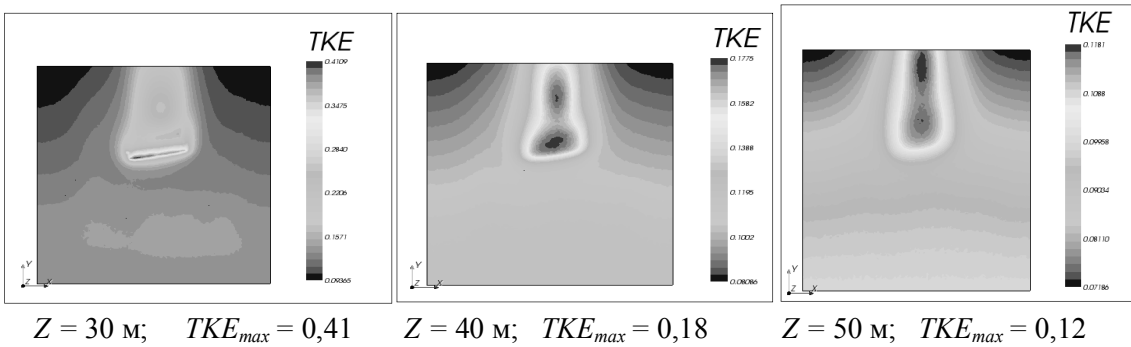
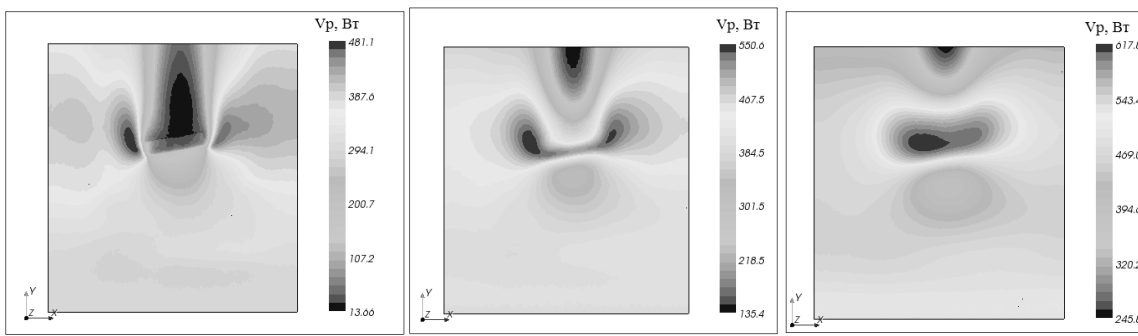
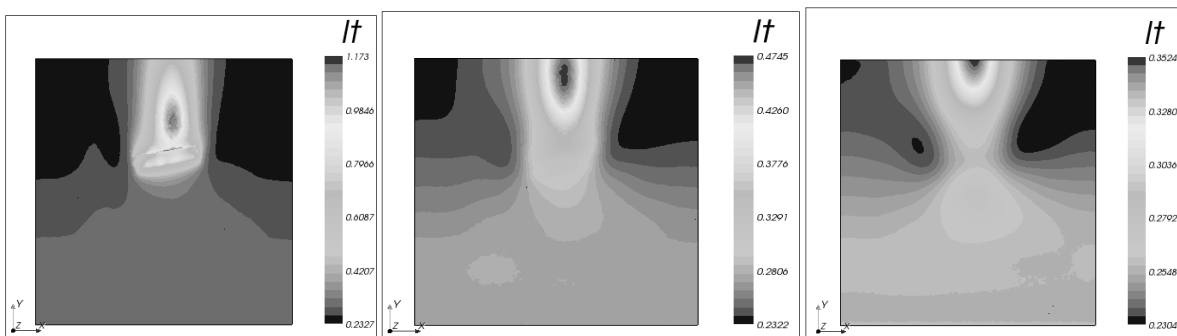


Рис. 21. Нормализованная кинетическая энергия турбулентности.



$Z = 30 \text{ м}; VP_{max} = 481 \text{ Вт}$
 $Z = 40 \text{ м}; VP_{max} = 551 \text{ Вт}$
 $Z = 50 \text{ м}; VP_{max} = 618 \text{ Вт}$

Рис. 22. Удельная мощность ветрового потока.



$Z = 30 \text{ м}; IT_{max} = 1,17$
 $Z = 40 \text{ м}; IT_{max} = 0,47$
 $Z = 50 \text{ м}; IT_{max} = 0,35$

Рис. 23. Интенсивность турбулентности.

Как видно из приведенных выше рисунков, с увеличением высоты уменьшается влияние строительных конструкций на все параметры ветрового потока. Скорость ветра увеличивается с высотой, и уже на высоте 50 метров практически совпадает с максимальной скоростью невозмущенного потока. Наибольшие значения скорости западного ветра наблюдаются у северной и южной сторон Административного корпуса №9 (рис. 20). Однако в этих же местах наибольшие значения имеет интенсивность турбулентности ветрового потока (рис. 23), которая может нарушить стабильность работы ветровой установки. С ростом скорости ветра при увеличении высоты растет удельная мощность ветрового потока (рис. 22) – наиболее важный параметр для ветровой энергетики.

Заключение и выводы. При монтаже ветровых турбин в условиях городской застройки важно учитывать тот факт, что ветровые условия вблизи зданий и сооружений будут сильно отличаться от общей ветровой обстановки в регионе. Это связано с взаимным влиянием зданий и сооружений при формировании полей скорости ветра, локальных давлений и других показателей ветрового потока в рассматриваемой области. В связи с этим была создана CFD-модель процессов переноса при взаимодействии ветрового потока в приземном слое атмосферы с комплексом зданий и сооружений, компактно расположенных в пределах городской застройки.

При создании указанной выше модели использовалась стандартная $k-\varepsilon$ модель турбулентности с коэффициентами Panofsky & Dutton 1984 (табл. 4).

В результате численных исследований получены трехмерные поля скоростей, давлений и других характеристик ветрового потока, в том числе показатели удельной мощности и турбулентности ветра в исследуемой области. Эти данные позволяют провести анализ наиболее благоприятных условий для расположения ветровой турбины, поскольку, как известно из [7], таковыми условиями являются высокая скорость ветра и минимальные показатели его турбулентных характеристик.

Приведенные выше данные на рис. 17 свидетельствуют о том, что в рассматриваемой области

максимальное значение скорости ветра при западном его направлении на высотах от 30 до 50 м наблюдается в районе северной и южной сторон корпуса 5 – самого высокого здания в рассматриваемой области. Однако в этих же местах наблюдаются наибольшие значения турбулентных характеристик потока, и его отрыв от кромок ограждающих здание конструкций – это крайне нежелательное условие для расположения ветровой турбины. Поэтому размещение ветровой турбины целесообразно в районе здания Опытного производства №5 (рис. 8) на максимально возможной высоте, определяемой техническими характеристиками ветрового турбоагрегата.

1. *Giorgio Crasto. Numerical Simulations of the Atmospheric Boundary Layer.* http://www.windsim.com/documentation/papers_presentations/thesis/0702_Giorgio_Crasto.pdf.
2. *Roger Garcia Barceley* Mesh sensitivity analysis on wind farms using cfd wind flow models and cfd wake models MONTREAL, AUGUST 28 2012
3. *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_Ewec2007fullpaper.pdf
4. *Cabezon D., Iniesta A., Ferrer E., Marti I.* Comparing linear and non linear wind flow models <http://proceedings.ewea.org/ewec2006/index2.php?page=searchresult&auteur=Cabezon>.
5. *Theodoropoulos I Petros, Deligiorgis Nick.* Validation and comparison between cfd and linear wasp model performance in vertical profile estimation using measurements from a 65m tall mast [http://www.istos-lab.gr/doc/PO129-FINAL-PAPER-THEODOROPOULOS%20\(3\).pdf](http://www.istos-lab.gr/doc/PO129-FINAL-PAPER-THEODOROPOULOS%20(3).pdf)
6. *Pereira R., Guedes R, Silva C. Santos.* Comparing WasP and CFD wind resource estimates for the "regular" user/ http://www.megajoule.pt/img_upload/Publications/Comparing%20WASP%20and%20Meteadyn%20wind%20resource%20estimates%20for%20the%20regular%20user_paper%20.
7. *Mertens Sander.* Wind Energy in the Built Environment. Published by: Multi-Science 5 Wates Way, Brentwood Essex, CM15 9TB, United Kingdom. 170 p.
8. *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.
9. *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>.

10. *Симиу Э., Сканлан Р.* Воздействие ветра на здания и сооружения. – М.: Стройиздат. 1984. 358 с.

11. *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/>

12. *Choi Edmund.* Proposal for unified terrain categories exposures and velocity profiles. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan. 9 p

13. *Hjul Jonatan, Kjemtrup Inge-Mette, Lauridsen Thomas.* Wind Conditions Around High-rise Buildings. Project: Master Thesis Master of Science in Structural and Civil Engineering. Aalborg University Editions: 5. Number of pages: 152. Completed: 4th June 2010 <http://www.bsn.aau.dk>

14. *Швень Н.И.* Зависимость скорости ветра в приземном слое от защищенности ветроизмерительных приборов Центральная геофизическая обсерватория, г. Киев

15. *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 712 с.

16. *Parente A., Benocci C.* On the RANS simulation of

neutral ABL flows. The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010) Chapel Hill, North Carolina, USA May 23-27, 2010

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

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

19. 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.

20. *Yang Yi, Gu Ming, Jin Xinyang.* New inflow boundary conditions for modeling the neutral equilibrium atmospheric boundary layer in sst $k-\omega$ model. The Seventh Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, November 8-12, 2009, Taipei, Taiwan.

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

МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БІЗНЕС-ФОРУМ З ПИТАНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

VII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2014

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ

4-7 листопада



ОРГАНІЗАТОР
Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України

СПІВОРГАНІЗАТОР
Міжнародний виставковий центр

ГАЛУЗЕВИЙ ПАРТНЕР
Українська Вітроенергетична Асоціація

Технічний партнер: 

IEC

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15
@ "Лівобережна"
☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86
e-mail: sv@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua
www.tech-expo.com.ua