

УДК 624.011

Стоянов В.В.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

Жгалли Ш.

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ВЕТРОВЫХ И СНЕГОВЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Численное моделирование аэродинамических характеристик различных зданий и сооружений является достаточно трудной и ресурсоемкой задачей из-за конструктивных особенностей строительных объектов, имеющих, как правило, сложную геометрическую форму, а также из-за сложного нестационарного течения, образующегося в результате их обтекания. Наличие розы ветров предполагает выполнение не единичного, а целого ряда расчетов. Интерференция же спектра различных вихревых структур и масштабов между различными объектами еще более усложняет поставленную задачу. Поэтому точное моделирование предполагает использование эффективного, хорошо апробированного и верифицированного математического аппарата с привлечением высокопроизводительных вычислений. В последние годы приобретает актуальность научное направление в строительной аэродинамике, связанное с компьютерным моделированием ветрового воздействия на здания. Немаловажную роль при этом играет широкое распространение в практике строительства возведения высотных зданий многопролетных оболочек, относящихся к разряду уникальных сооружений. В качестве примера можно продемонстрировать турбулентное обтекание одиночного строительного объекта, имеющего форму куба. Данная задача представляет особый интерес для тестирования современных расчетных алгоритмов вычислительной гидродинамики.

В работе проводится расчетное исследование влияния моделей турбулентности $k-\epsilon$, исправных $k-\epsilon$, $k-\omega$, $k_{kl}-\omega$, SST и LES на описание процессов обтекания зданий. Задачей исследования было сопоставление данных численного моделирования с различными моделями турбулентности между собой и с данными эксперимента. Сравнительный анализ показал, что модели турбулентности DBN и $k_{kl}-\omega$ и метод крупных вихрей LES достаточно хорошо согласуются с экспериментом в аэродинамической трубе.

Ключевые слова: аэродинамические характеристики, нестационарное течение, обтекание, вихревые структуры, ветровое воздействие, модели турбулентности, стандартная модель $k-\epsilon$, DBN, стандартная модель $k-\epsilon$, transition $k-kl$ -, transition SST, LES.

Постановка проблемы. Большинство течений, встречающихся в природе и технике, турбулентные [1]. Для моделирования турбулентных потоков используются различные модели (алгебраические, с одним уравнением конвективно-диффузионного типа, с двумя уравнениями, с семью уравнениями и др.). Особое место в теории турбулентности занимает моделирование пограничного слоя около твердой поверхности. На точность результатов моделирования влияют многие факторы, такие как алгоритмы, граничные условия и модели турбулентности [2–4].

В данной статье сравниваются результаты вычисления с использованием различных исправных моделей $k-\epsilon$ (т.е. Модели LK, модели MMK и модели $k-\epsilon$ Дурбина), модели (LES) и других путем сравнения их с ранее полученными результатами экспериментов. Моделирование было

выполнено в условиях вычислительной области и граничных условий, показанных на рис. 1. Особое внимание уделяется точности вычисления в зоне за и над зданием.

Анализ последних исследований и публикаций. Известно, что стандартная модель $k-\epsilon$ часто приводит к серьезным ошибкам в случае плохо обтекаемых тел, за счет переоценки k (турбулентной кинетической энергии) в некоторых зонах близко к поверхности тел [5–8]. Что касается усовершенствования модели $k-\epsilon$, на практике имеются четыре варианта исправленных моделей, которые приобрели популярность в аэродинамике зданий:

1. модель Kato-Launder (KL);
2. модель модифицированная Kato-Launder (MKL);
3. модель Murakami, Mochida и Kondo (MMK);
4. модель Durbin.

Модель Kato-Launder (KL). Kato и Launder в 1993 г. предложили исправленную модель k-ε (далее обозначаемую как LK-модель), которая решает проблему переоценки k путем изменения генерации k (P_k) следующим образом [9]:

$$P_k - \text{генерация } k$$

$$P_k = \nu_t S \Omega, \quad (1)$$

где

$$\Omega = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right)^2}, \quad (s^{-1}), \quad (2)$$

Однако эта модель имеет две точки, требующие пересмотра. В потоке, где $\Omega / S > 1$, выражение P_k ур-(1) переоценивает P_k по сравнению со стандартной моделью k-ε (SKE). Чтобы избежать этой переоценки уравнения (1), следует использовать модели только в области, где $\Omega / S < 1$. Таким образом, получаем модифицированную LK-модель (MLK). Другой проблемой модели LK является математическая несогласованность в моделировании Рейнольдсовых напряжений $-\overline{u_i u_j}$ и P_k .

В 1997 г. группа авторов (Murakami, Mochida, Kondo) предложили новую редакцию модели k-ε (модель ММК), которая скорректировала эти несогласованности модели LK, добавив модификацию не в выражение для генерации k (P_k), а в выражение коэффициента турбулентной кинетической вязкости.

Модель ММК. При моделировании воздушного потока вокруг здания с применением стандартной модели k-ε результат турбулентной кинетической энергии k в верхней части здания выходит слишком велик, и задача модели ММК [10–11] состоит в корректировке k путем внесения изменения в коэффициент турбулентной кинетической вязкости.

В стандартной k-ε модель, коэффициент турбулентной кинетической вязкости ν_t , равняется:

$$\overline{\nu}_t = c_\mu \frac{k^2}{\mu}, \quad (3)$$

В модели ММК, ν_t , равняется:

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\mu}, \quad \text{где } \Omega / S > 1, \quad (4)$$

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\mu} \cdot \Omega / S, \quad \text{где } \Omega / S < 1, \quad (5)$$

и P_k – генерация k

$$P_k = \nu_t S^2, \quad (6)$$

Как известно, в программном комплексе ANSYS-FLUENT отсутствует модель турбулентности ММК, что требует модифицировать модель k-ε путем разработки кода на языке C.

Модель Durbin. Тем не менее, Durbin в 1996 г. предложил другую модификацию. Коэффициент турбулентной кинетической вязкости ν_t связан с масштабом турбулентных скоростей деформации и временным масштабом T следующим образом [12]:

$-\overline{u_i u_j}$ – рейнольдсовы напряжения.

$$-\overline{u_i u_j} = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \sigma_{ij} k = 2\nu_t S_{ij} - \frac{2}{3} \sigma_{ij} k, \quad (7)$$

где S_{ij} – средняя скорость деформации,

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right), \quad (8)$$

В модели Durbin

$$\nu_t = c_\mu \overline{u^2} T^* \text{ в модели k-ε это будет } \nu_t = c_\mu k T^*, \quad (9)$$

где

$\overline{u^2}$ – масштаб турбулентных скоростей деформации и T^* временным масштабом .

$$T^* = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{2k}{3\nu^2 c_\mu} \sqrt{\frac{3}{4S^2}} \right) = \min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{\alpha}{\sqrt{3} S c_\mu} \right), \quad (10)$$

где, $0 \leq \overline{u^2} \leq 2k$

и в случае $\alpha = 1$ модель называют «первая модель дурбина», когда $\alpha = 0.5$, модель называют «вторая модель дурбина».

Постановка задания. Целью настоящей работы является исследование влияния моделей турбулентности k-ε, исправных k-ε, k-ω, k_kl_ω, SST и LES, на описание процессов обтекания зданий, а второстепенно – тестирование расчетной методики на доступных экспериментальных данных и разработка практических рекомендаций по использованию ANSYS FLUENT. Для достижения поставленных целей была разработана модель в ansys fluent, где вычислительная область представлена на рис. 1. Число Рейнольдса на H (высота здания) при $U_H = 4.45$ м/с (скорость потока при z=H) составляло 2.4×10^4 .

Для исследования несжимаемых стационарных течений в трехмерной обстановке применялись уравнения URANS при разных моделях тур-

Таблица 1

Длины закрученных струйных потоков

Модель турбулентности	Номенклатура	X_R / b	X_F / b
Стандартный k-ε	SKE или k-ε	0.31	2.48
Kato-Launder k-ε	LK	0.43	2.2
Murakami, Mochida и Kondo k-ε	ММК	0.51	2.6
RNG k-ε	RNG	0.60	2.53
Realizable k-ε	Realizable	0.30	2.7
Стандартный k-ω	SKO или k-ω	-----	2.6
Transition k-kl-ω	k-kl-ω	0.75	2.10
Transition SST	SST	0.7	2.8
Метод крупных вихрей	LES	0.58	2.05
Durbin	DBN	0.6	2.6
Испытания	Exp	0.54	1.48

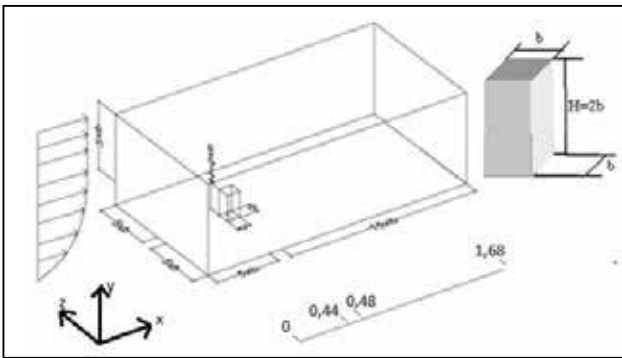


Рис. 1. Схема вычислительная область и граничные условия

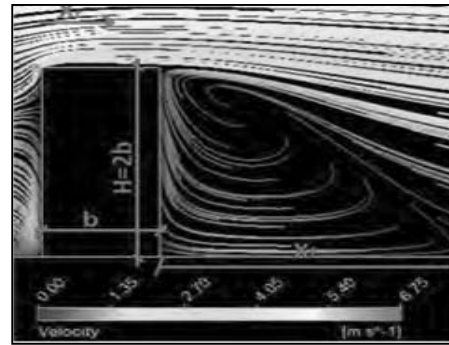


Рис. 2. Размеры закрученных струйных потоков

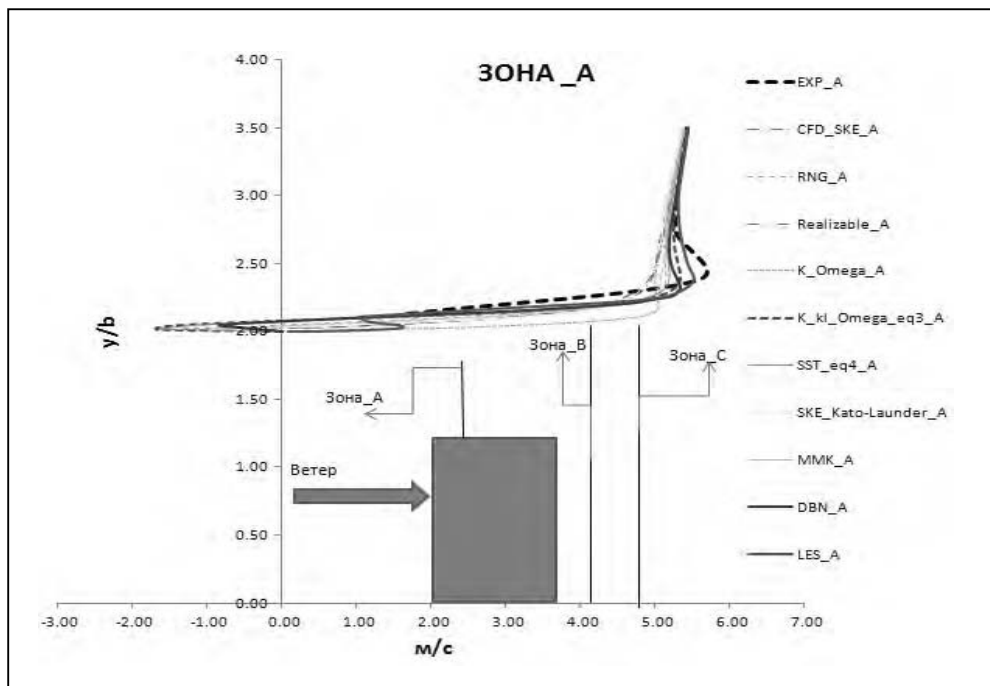


Рис. 3. Вертикальное распределение скорости ветра над зданием, зона А

булентности. Сетки построены в ANSYS ICEM CFD, общим количеством ячеек 1,3 млн ячеек. Промежуточный рост между соседними ячейками для всех сеток составляют 1.10, 1.02 и 1.10 впоследствии по x , y и z .

Изложение основного материала исследования. В таблице 1 приведены длины закрученных струйных потоков для всех случаев исследуемых моделей турбулентности в области, где наблюдаются низкое давление, на верхней грани здания (X_R) и в ближнем следе за зданием (X_F) (рис. 2).

В результате наблюдается, что длина (X_F) у всей модели турбулентности больше экспериментального значения. Следует отметить, что исправные модели $k-\varepsilon$ имеют тенденции переоценки длины (X_F) больше, чем у стандартного $k-\varepsilon$. Также длина (X_F) у MMK больше, чем у

LK. Здесь следует обратить внимание на модель Transition $k-kl-\omega$, которая предсказывает значение (X_F) точнее (табл. 1).

В случае модели LES оценивается (X_F) больше экспериментальных значений, но гораздо более близкое согласие наблюдается с экспериментальным значением, хотя оно все же немного выше, но по сравнению с другими результатами модель LES является наиболее точной в предсказании длины (X_F). На верхней грани здания длина (X_R) идеально сходится с экспериментом в случае метода крупных вихрей LES, MMK, DBN, RNG. Различия между вариантами связаны с воспроизведением отрыва вихрей позади здания.

На рис. 3 представлено распределение вертикальной составляющей скорости потока ветра u_x над зданием, где видно, как модели Durbin,

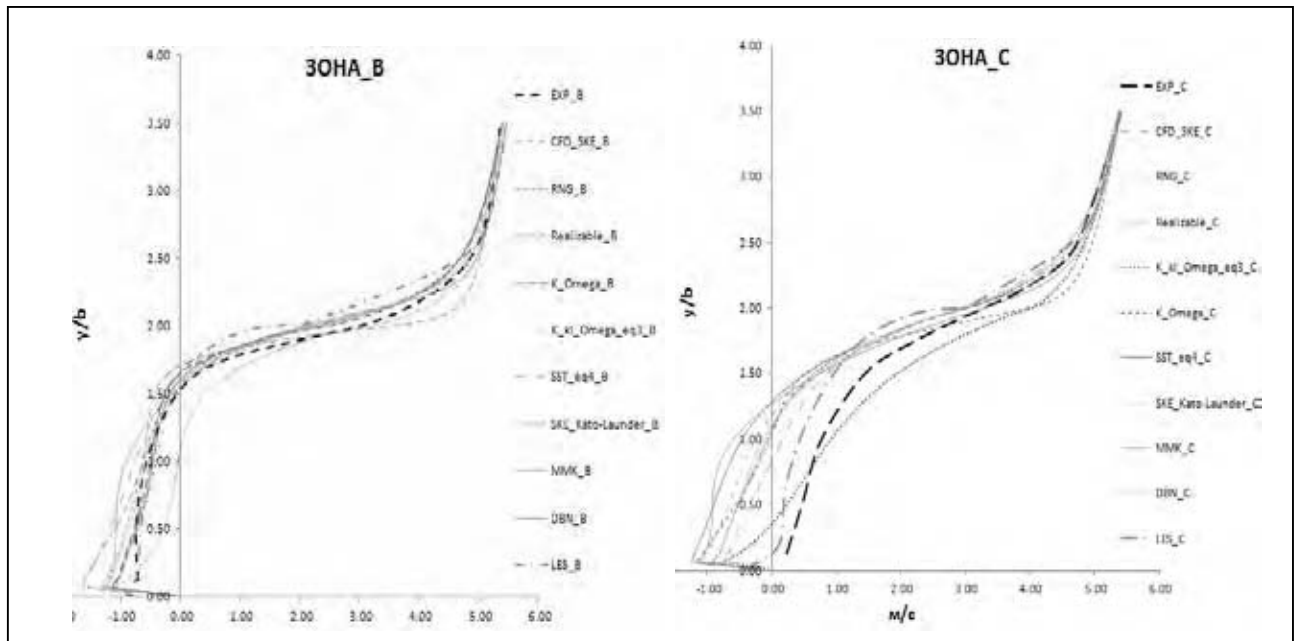


Рис. 4. Вертикальное распределение скорости ветра над зданием

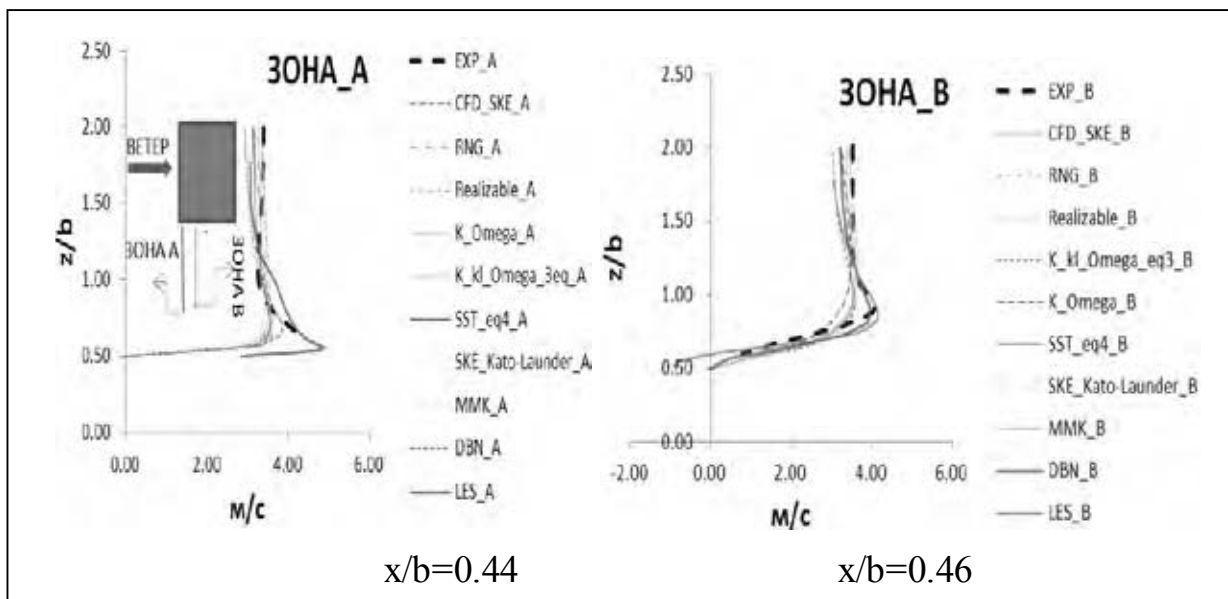


Рис. 5. Горизонтальные распределения скорости ветра близко к зданию

Transition $k\text{-}k\text{-}\omega$ и LES хорошо вычисляют пиковые значения u_x над зданием при $y/b \approx 2.4$. Нарис. 4 значения для всех моделей вышней зданием ($y/b > 2$) сходятся хорошо с экспериментальными значениями. Однако существует отличия в точности результатов по мере приближения к поверхности земли и удаления за зданием. В этой области значение скорости, полученных от исправных моделей $k\text{-}\epsilon$, имеет более отрицательный характер, чем стандартная модель $k\text{-}\epsilon$, а результаты по модели Durbin почти одинаковы с SKE.

Большие различия наблюдаются между результатами вычислений LES и $k\text{-}k\text{-}\omega$ с остальными моделями в области рециркуляции за зданием. Закрученные струйные потоки у LES сильнее, чем у других, и форма структуры потока за зданием в эксперименте хорошо совпадает с результатом по LES.

Профили скорости ветра по моделям LES и DBN довольно схожи и достаточно хорошо согласуются с экспериментом вблизи здания. Однако некоторые различия, наблюдаемые по мере удаления от здания и по мере приближения к поверхности земли, и в LES и в $k\text{-}k\text{-}\omega$ гораздо более

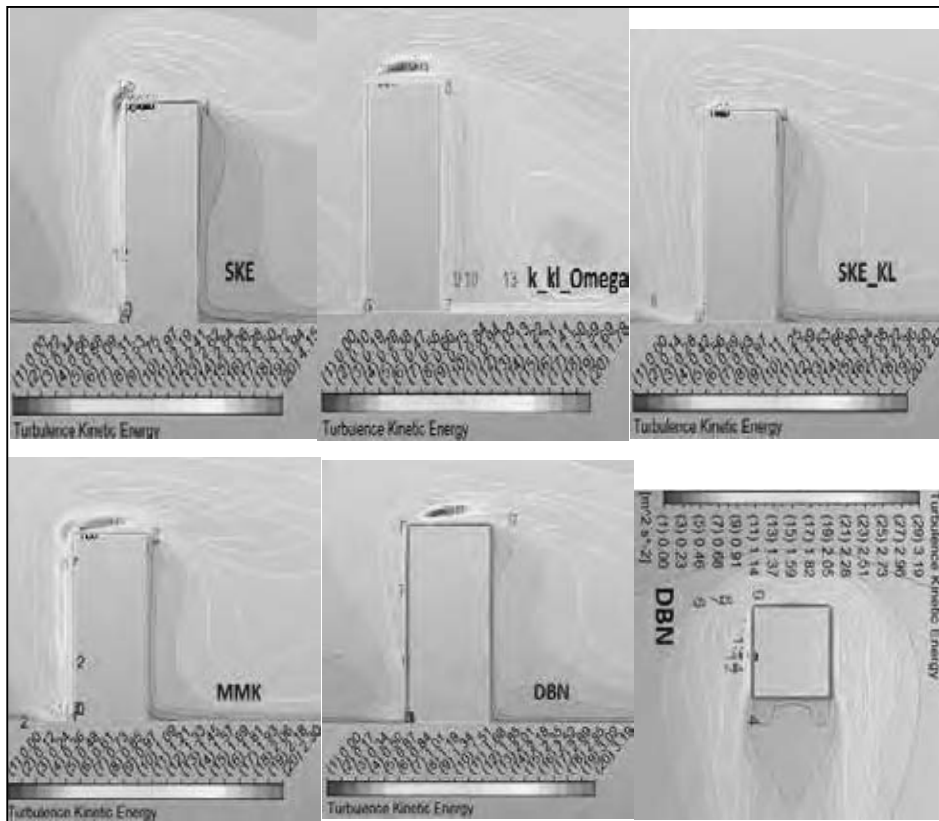


Рис. 6. Вертикальные изополя турбулентной энергии k

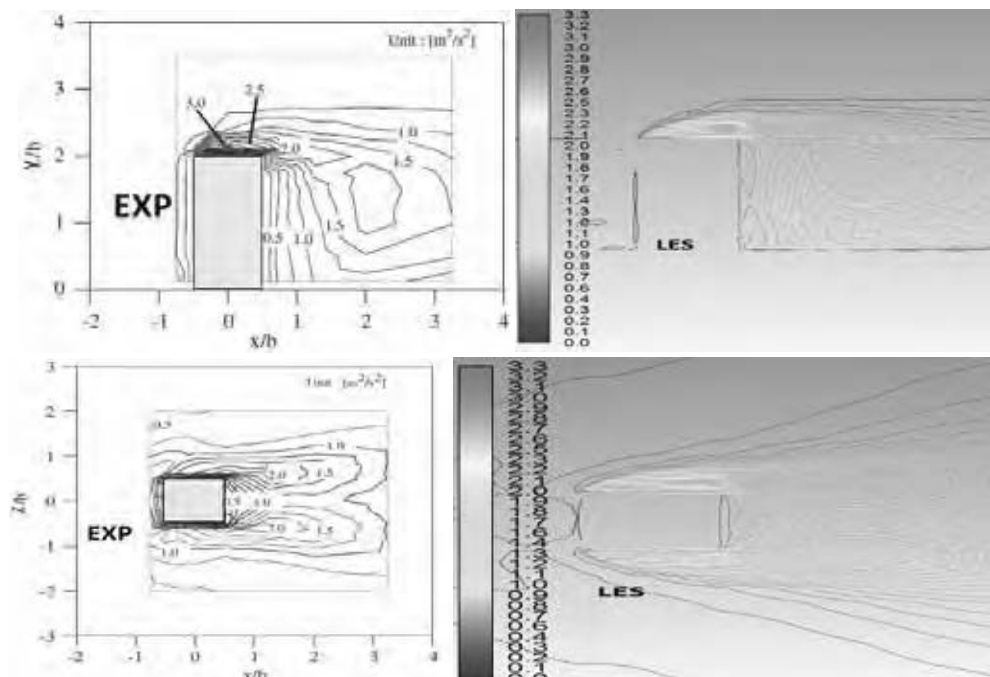


Рис. 7. Вертикальные и горизонтальные изополя турбулентной кинетической энергии k в эксперименте и при LES

согласуются с экспериментом, чем результаты по DBN, что обеспечивает очень большие значения скорости обратного потока (рис. 5).

В области, где скорость выше 4,0, модель DBN выделяется среди других моделей своей достовер-

ностью, что показано также на рис. 5, по линии $x/b=0.44$, пиковые значения скорости ветра находятся в точке $z/b \approx 0.6$, где исправные модели плохо вычисляют скорость ветра, за исключением DBN. Такие же свойства наблюдаются по линии

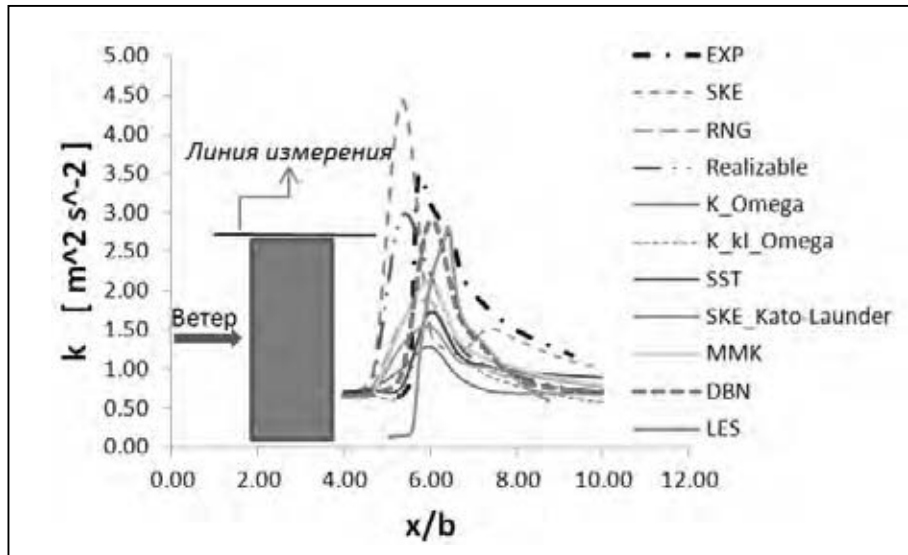


Рис. 8. Распределение турбулентной энергии над зданием вдоль потока

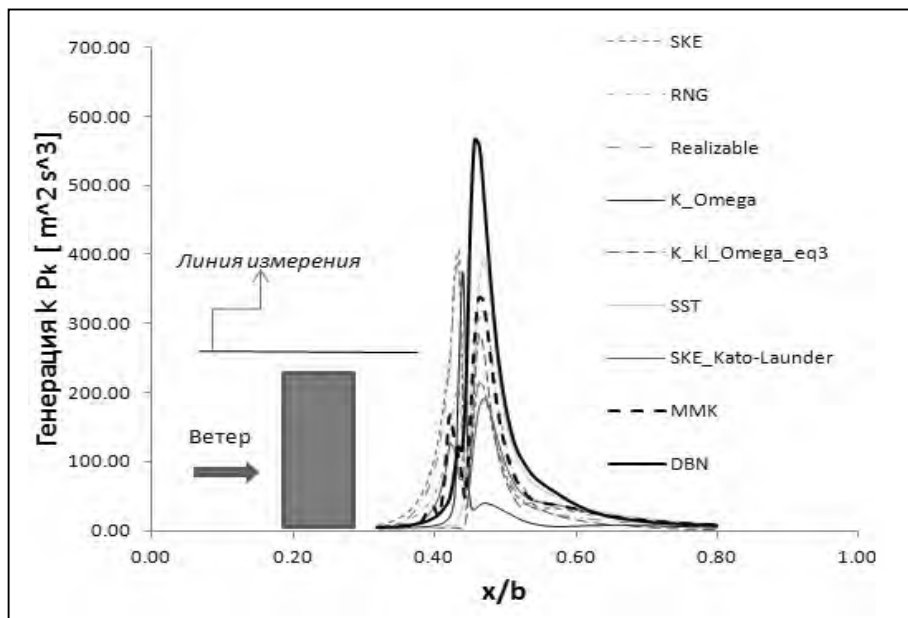


Рис. 9. Распределение генерация $k (P_k)$ над зданием вдоль потока

$x/b=0.46$, и результат по DBN, LES и k_kl_omega больше согласуются с экспериментом.

Эти различия в изополях скоростей при различных моделях турбулентности тесно связаны с точностью предсказания турбулентной кинетической энергии k и коэффициентом турбулентной кинетической вязкости ν_t , которые мы обсудим ниже.

На рис. 6 видно, как в зоне покрытий и при стандартной модели $k-\epsilon$ турбулентной энергии k переоценивается в большую сторону и дает значение больше, чем у исправных моделей. Однако значения k , распределенных за зданием, во всех моделях вычисляются меньше, чем у эксперимента, за

счет пульсации ветра из-за отрыва вихрей кроме модели k_kl_omega и LES. Эта недооценка k провоцирует создание более крупной области ближнего следа потока за зданием в отмеченных моделях, чем в эксперименте (см. Табл. 1), потому что рассеяние импульса в поперечном направлении становится малым во многих моделях.

Вертикальные и горизонтальные изополя турбулентной кинетической энергии k , представленные ниже (рис. 7), показывает, как распределение k при LES очень похоже на распределение в эксперименте. И два максимальных значения k , что наблюдаются в эксперименте, также хорошо воспроизводятся в

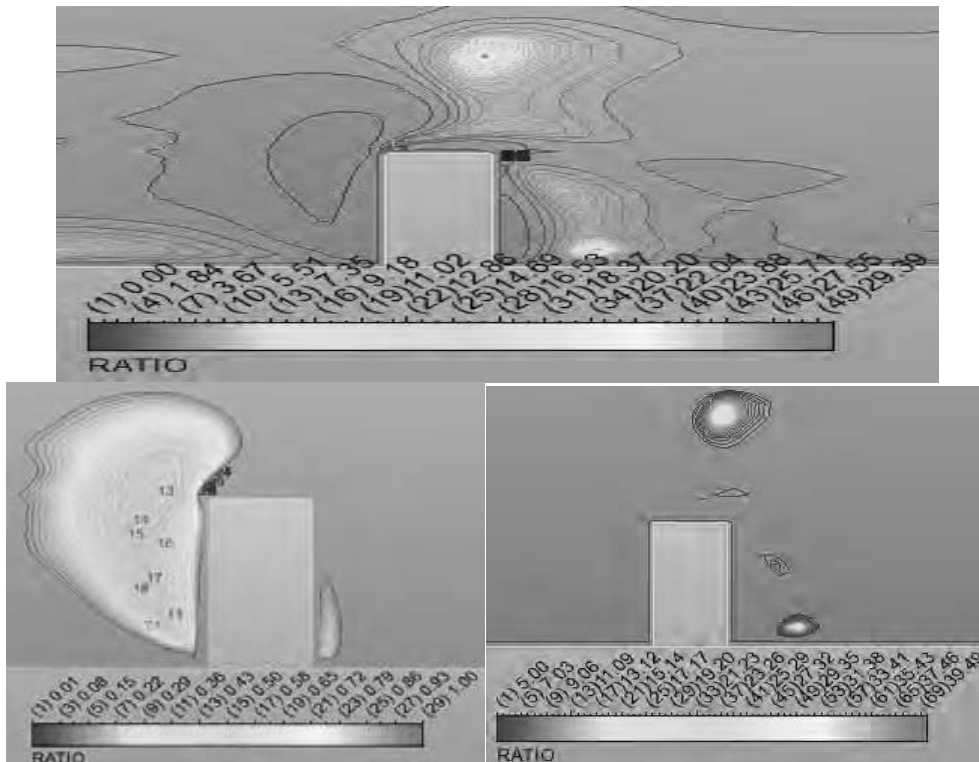


Рис. 10. Вертикальное распределение соотношения масштаба времени T_D/T_S (модель Durbin), слева область $T_D/T_S < 1$, справа $T_D/T_S > 1$

LES. Следует отметить, что улучшение точности предсказания флуктуации скорости за зданием приводит к близкому согласованию длины закрученных струйных потоков и распределении скоростей в этой области (рис. 7), и длина струйных потоков в $k-\varepsilon$ (DBN) намного больше, чем вычисления при LES, потому что в данной модели они воспроизводятся независимо от флуктуации во времени.

На рис. 8 представлено распределение k над покрытием вдоль потока, модель MMK, k_ω , Realizable и стандартной модель $k-\varepsilon$ показывают максимальные значения в зоне фасада здания, встречающегося с набегающим потоком, что не наблюдается в эксперименте. Что касается модели LK, видно, как вычисляются k вдоль потока над зданием с низшими значениями, чем в эксперименте. Эта недооценка влияет на вычисления за зданием, вследствие этого получается меньшее значение k при этих моделях. Но при DBN, LES демонстрируется более точное согласование с экспериментом в зоне над покрытием.

Распределение генерации (k) показано на рис. 9. Значение по SKE, MMK, SST, k_{kl_ω} намного больше в зоне переднего угла, чем у других моделей, кроме DBN. Эти последствия наблюдаются в модели MMK в основном из-за численной неустойчивости. Результаты других моделей

довольно схожи, хотя пиковые расположения по линии у всех моделей отличаются.

На рис. 9 показано распределение P_k над крышей вдоль потока, где видны острые пики в области верхнего угла переднего фасада здания, аналогично рис. 8 с распределением турбулентной энергии. DBN показывает намного больше значения P_k на крыше, чем другие модели. Разница P_k в этой области влияет на распределение k , как упоминалось ранее.

Для MMK значения v_t немного малы по сравнению со значениями у SKE вблизи верхнего переднего угла, но схема распределения довольно схожа. У MMK наблюдается хаотичное распределение v_t , чего не происходит в других моделях.

В этой области DBN показывает намного меньшие значения v_t . Это связано с тем, что временной масштаб T , вычисляемый по формуле (10), становится меньше из-за большого значения скорости деформации S в этой зоне.

На рис. 10 представлено вертикальное распределение соотношения масштабов времени и показаны области, где применяется временной масштаб Дурбина. Как видно, масштаб времени Дурбина используется только вокруг переднего верхнего угла фасада здания, то есть модель SKE применяется к другим регионам при DBN.

Іменно по цьому точність прогнозування потоку позади здания в DBN почти така ж, як в SKE. Область, в якій це застосовується, прямо відповідає області, де критерій «реалізує-ність» не задовольняє розподіленню u_a^2 в інших моделях.

Іншими словами, DBN забезпечує більш точні результати, ніж інші моделі k-ε, в деяких відносинах із-за покращення розподілення нормальних напружень навколо переднього кута здания.

Із приведених тут результатів застосовуваність DBN до потоку навколо здания є задовільною. Тем не менше, тенденція до перевірки довжин закручених струйних потоків позади здания все ще залишається в DBN. Цей недолік тісно пов'язаний з крахом генерації флуктуації швидкості із-за відриву вихрей, що, видно з розрахунків по LES.

Висновки.

1. Модель SKE не виробляє закручених струйних потоків на покритті. Цей недолік був виправлений правильними моделями k-ε. Однак більшість правильних моделей переоцінює довжину закручених струйних потоків позади здания порівняно з моделлю SKE.

2. Модель, запропонована Дурбином, показала більшу узгодженість з експериментом серед правильних моделей k-ε. Переоцінка довжин закручених струйних потоків в моделі k-ε Durbin була покращена при розрахунках по LES. Це покращення стало головним чином за рахунок флуктуації швидкості із-за відриву вихрей за зданием, що добре виробляється в LES.

3. Слід також зауважити, що модель k_kl_omega добре виробляє закручені струйні потоки на покритті і за зданием, тому є сенс застосувати її в подальших розрахунках.

Список літератури:

1. Волков К.Н., Емельянов В.Н., Зазимко В.А. Турбулентные струи – статические модели и моделирование крупных вихрей. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2014. 360 с.
2. Мазо А.Б. Моделирование турбулентных течений несжимаемой жидкости. Учебное пособие. Казань: КГУ, 2007. 106 с.
3. Осадчая Д.М. Математическое моделирование в задачах управления пограничным слоем при различных режимах течения: дис. Казань, 2005. 116 с.
4. Луцкий А.Е., Северин А.В. Простейшая реализация метода пристеночных функций. Препринты ИПМ им.М.В.Келдыша. 2013. No 38. 22 с.
5. Mohammadi B., Pironneau O. Analysis of the K-Epsilon turbulence model. M. John Wiley & Sons, 1994.
6. Jones W.P., Launder B.E. The prediction of laminarization with a two-equation model of turbulence. Internat. J. Heat Mass Transfer 15 (1972). no. 2. P. 301–314.
7. Chen Y.S., Kim, S.W. Computation of turbulent flows using an extended k-ε turbulence closure model: NASA CR-179204, 1987.
8. Bardina J.E., Huang P.G., Coakley T.J. Turbulence Modeling Validation, Testing and Development. NASA reports –April 1997.
9. Kato M. and Launder B.E. The Modeling of Turbulent Flow Around Stationary and Vibrating Square Cylinders. Proc. 9th Symposium on Turbulent Shear Flows. Kyoto, August 1993. Pp. 10.4.1–10.4.6.
10. Murakami S. Current status and future trends in computational wind engineering. J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 1997. 67 & 68. Pp. 3–34.
11. Tsuchiya M., Murakami S., Mochida A., Kondo K. & Ishida Y. Development of a new k-ε model for flow and pressure fields around bluff body. J. Wind Engineering & Industrial Aerodynamics. 1997. 67 & 68. Pp. 169–182.
12. Durbin P.A. Near-wall turbulence closure modeling without damping functions. Theoretical and Computational Fluid Dynamics. 1991. 3(1):1–13.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ТУРБУЛЕНТНОСТІ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВИХ І СНІГОВИХ ВПЛИВІВ НА БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ

Чисельне моделювання аеродинамічних характеристик різних будівель і споруд є досить важким і ресурсоємним завданням через конструктивні особливості будівельних об'єктів, що мають, як правило, складну геометричну форму, а також через складну нестационарну течію, що утворюється в результаті їх обтікання. Наявність рози вітрів передбачає виконання не одиничного, а цілого ряду розрахунків. Інтерференція ж спектра різних вихрових структур і масштабів між різними об'єктами ускладнює поставлену задачу. Тому точне моделювання передбачає використання ефективного, добре апробованого і верифікованого математичного апарату із залученням високопродуктивних обчис-

лень. В останні роки набуває актуальності науковий напрям у будівельній аеродинаміці, пов'язаний із комп'ютерним моделюванням вітрового впливу на будівлі. Важливу роль при цьому відіграє поширення в практиці будівництва зведення висотних будівель багатопрольотних оболонок, що належить до розряду унікальних споруд. Як приклад можна продемонструвати турбулентне обтікання одиночного будівельного об'єкта, що має форму куба. Це завдання становить особливу зацікавленість для тестування сучасних розрахункових алгоритмів обчислювальної гідродинаміки.

У роботі проводиться розрахункове дослідження впливу моделей турбулентності $k-\varepsilon$, справних $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $k_{kl}-\omega$, SST та LES на опис процесів обтікання будівель. Завданням дослідження було зіставлення даних чисельного моделювання з різними моделями турбулентності між собою і з даними експерименту. Порівняльний аналіз показав, що моделі турбулентності DBN та $k_{kl}-\omega$ та метод крупних вихрів LES досить добре узгоджуються з експериментом в аеродинамічній трубі.

Ключові слова: аеродинамічні характеристики, нестационарна течія, обтікання, вихрові структури, вітровий вплив, моделі турбулентності, стандартна модель $k-$, DBN, стандартна модель $k-$, transition $k-kl-$, transition SST, LES.

COMPARATIVE ANALYSIS OF TURBULENCE MODELS FOR SIMULATION OF WIND AND SNOW EFFECTS ON BUILDINGS AND STRUCTURES

Numerical modeling of aerodynamic characteristics of various buildings and structures is quite difficult and resource-intensive task because of the design features of building objects, which, as a rule, have a complex geometric shape, and also because of the complex unsteady flow formed as a result of their flow around. Presence of a wind rose requires execution of a number of calculations, not a single one. The interference of the spectrum of different vortex structures and scales between different objects further complicates the task posed. Therefore, accurate simulation involves the use of an effective, well-tested and verified mathematical device with the use of high-performance computing. Therefore, accurate simulation involves the use of an effective, well-tested and verified mathematical device with the use of high-performance computing. Therefore, accurate simulation involves the use of an effective, well-tested and verified mathematical device with the use of high-performance computing. In recent years, the scientific direction in construction aerodynamics, connected with computer modeling of wind impact on buildings, is becoming relevant. An important role in this is played by the wide spread in the practice of building the construction of high-rise buildings of multi-span shells belonging to the category of unique structures. As an example, one can demonstrate turbulent flow around a single building object that has the shape of a cube. This problem is of particular interest for testing modern computational algorithms of computational fluid dynamics.

In this work, a computational study of the influence of $k-\varepsilon$ turbulence models, $k-\varepsilon$, $k-\omega$, $k_{kl}-\omega$, SST and LES, which are in service, on the flow of buildings is performed. The task of the study was to compare the data of numerical simulation with different models of turbulence between each other and with the experimental data. A comparative analysis showed that the turbulence models DBN and $k_{kl}-\omega$ and the large LES vortex method are in good agreement with the experiment in the wind tunnel.

Key words: aerodynamic characteristics, unsteady flow, vortex structures, wind impact, turbulence models, standard model $k-\varepsilon$, DBN, standard model $k-\omega$, transition $k-kl-\omega$, transition SST, LES.