

Модель турбулентности k-ε Realizable в расчетах аэродинамических сил прямоугольных цилиндров с различным соотношением сторон

А.В. Гумеров

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Проведено численное моделирование поперечного обтекания высотного здания призматической формы с использованием двумерного подхода. Двумерное обтекание прямоугольных контуров выполнено с привлечением модели турбулентности k-ε с модификацией Realizable в программе ANSYS Fluent. Получены коэффициенты лобового сопротивления, поперечной силы и частоты срывов вихрей для контуров с соотношением сторон от 0.1 до 2.0 при числе Рейнольдса 2×10^5 . Исследовано влияние интенсивности турбулентности набегающего потока на обтекание этих контуров. Установлено, что при турбулентности 4% отмечается хорошее совпадение суммарных аэродинамических характеристик с имеющимися экспериментальными данными. Рассмотренная модель турбулентности в двумерной постановке способна удовлетворительно прогнозировать ветровые нагрузки необходимые для последующих расчетов элементов креплений фасадных систем.

Ключевые слова: обтекание прямоугольного цилиндра, модель турбулентности k-ε Realizable, аэродинамические характеристики прямоугольного цилиндра.

Расчёты обтекания высотных зданий необходимы, в том числе, для определения ветровых нагрузок на навесную фасадную систему. В настоящее время на практике используется методика, приведенная в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Возможности применения этих методик при проектировании современных высотных зданий со сложной геометрией оказывается несколько затруднительным. В настоящее время для расчета ветровых нагрузок можно использовать универсальные вычислительные пакеты ANSYS Fluent, ANSYS CFX, OpenFOAM, STAR-CD и др. Для применения таких программ требуется большой опыт работы с ними и высокая квалификация инженера. В программах содержится множество методов расчета с различными входными параметрами. Инженеру, прежде чем приступить к проектным расчетам, необходимо проведение тестовых расчетов на типовых сечениях с варьированием расчетных методов и

входных параметров для лучшего согласования с имеющимися экспериментальными данными [1,2].

Работы по анализу различных численных методик расчета обтекания в двумерной постановке прямоугольных призм с разным соотношением сторон остается весьма актуальной. В работе [3] исследовано течение около прямоугольных цилиндров с разным соотношением сторон ($R = b/h = 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1$). Расчеты проводились в программе OpenFOAM с решением 2D URANS (нестационарных осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса) уравнений с моделью турбулентности $k-\omega$ SST при числе Рейнольдса 21400. Похожие результаты для коэффициента сопротивления были получены в работе [4], где применялись модели турбулентности $k-\varepsilon$ Standart и $k-\varepsilon$ RNG в программе Fluent 6.3. Результаты исследований 2D URANS моделей турбулентности для прямоугольных цилиндров $R = 1 \div 10$ при $Re = 21400$ приводятся в работах [5, 6]. В работе [7] представлены результаты расчетов обтекания прямоугольных цилиндров с соотношением сторон 1, 2, 3, 4 и 5 при числе $Re = 2 \times 10^5$. Была применена двумерная URANS-модель обтекания с моделью турбулентности $k-\varepsilon$ в программе OpenFOAM. В этой работе пристеночные значения турбулентности кинетической энергии k , скорость диссипация турбулентности кинетической энергии ε и турбулентная вязкость задавались для каждого прямоугольного цилиндра. Схожие исследования по определению аэродинамических характеристик (АДХ) в зависимости от соотношения сторон прямоугольной призмы были получены ранее в работе [8] с привлечением модифицированной модели турбулентности $k-\varepsilon$ Standart.

В статье [9] приведены результаты численного моделирования течения около двумерных прямоугольных цилиндров с соотношением сторон в диапазоне от 0.1 до 4 при числе, $Re = 6.85 \times 10^5$. Решение URANS-уравнений проводилось с уравнениями для модели турбулентности $k-\varepsilon$ (Standard, RNG

и Realizable) в программе Fluent. По результатам сравнения АДХ-цилиндра квадратного сечения, модель k - ε Realizable была взята как основная для изучения всех остальных сечений. Согласно анализам влияния сгущения сетки у поверхности на точность АДХ, высота пристеночной ячейки $y_0/h = 0.002$ была взята, как базовая.

Целью настоящего исследования является тестирование модели турбулентности k - ε Realizable на примере обтекания прямоугольного цилиндра с различным соотношением сторон.

Движение турбулентной несжимаемой среды в плоскости описывается осредненными уравнениями неразрывности и Навье-Стокса. Для замыкания этих уравнений модель турбулентности k - ε Realizable использует уравнения переноса кинетической энергии k и переноса скорости диссипации ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon,$$
$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}},$$

где G_k – генерация турбулентной кинетической энергии; константы $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$ [9].

В настоящей статье исследовалось течение около прямоугольных цилиндров с соотношением сторон $b/h = 0.1, 0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$. Для каждого сечения была построена двумерная структурированная расчетная сетка. Размеры расчетной области с граничными условиями на примере квадрата показаны на рис. 1. Высота пристеночных ячеек было принято как в работе [9] равным $y_0/h = 0.002$. Количество расчетных ячеек в зависимости от соотношения сторон призмы составляло от 56330 до 90555.

Были заданы следующие граничные условия для расчетной области:

- на входе в расчетную область выбран тип граничного условия Velocity-inlet с параметрами: скорость набегающего воздуха $V_\infty = 2$ м/с, интенсивность турбулентности $I = 2\%$ (4%) и масштаб турбулентности $l = h = 2$ м,
- в выходном сечении был установлен тип граничного условия Pressure-outlet с параметрами турбулентности: $k = 0$ и $\epsilon = 0$ [9],
- верхнюю и нижнюю границы расчетной области Symmetry – условие проскальзывания и непротекания, контуры прямоугольника Wall с условием прилипания (No Slip).

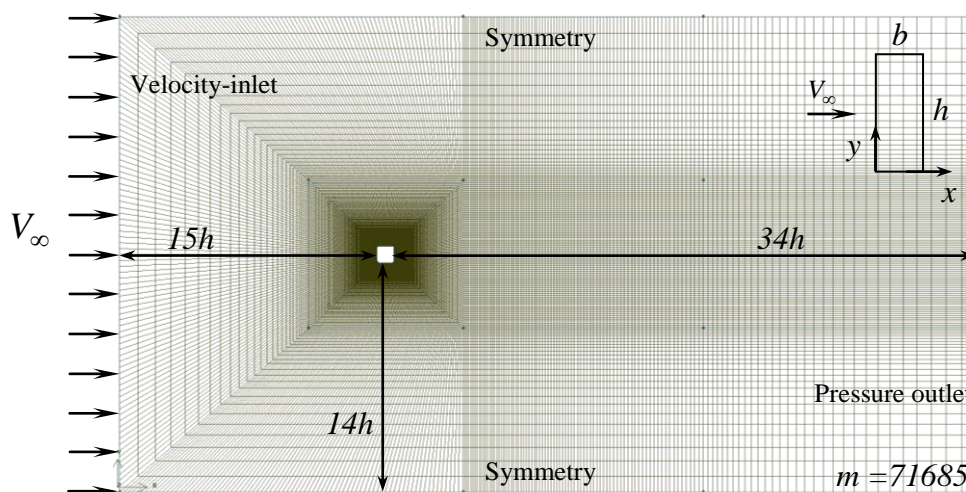


Рис. 1. – Расчетная сетка и граничные условия для квадрата

Численное моделирование двумерного нестационарного обтекания прямоугольника было проведено в программе ANSYS Fluent, который в качестве дискретизации дифференциальных уравнений (1) и (2) использует метод конечных объемов.

Для решателя Pressure-Based был выбран способ связывания давления и скорости по алгоритму SIMPLE, с привлечением противопоточной схемы второго порядка точности (Second Order Upwind) для всех уравнений. Способ оценки градиентов (Gradient) оставлен по умолчанию Least Squares Cell Based – линейная интерполяция между двумя значениями в центрах соседних ячеек. Схема вычисления градиента давления (Pressure) была

выбрана второго порядка точности. Для временной аппроксимации использовалась неявная схема первого порядка точности.

Для моделирования течения в пограничном слое использовалась расширенное пристеночное моделирование (Enhanced Wall Treatment). В этом случае выбор пристеночной функций будет происходить в зависимости от величины y^+ (безразмерное расстояние до стенки). В настоящих расчетах величина y^+ менялась в пределах от 14 до 30.

Численное интегрирование уравнений выполнено с постоянным шагом $\Delta t = 0.01$. На каждом временном шаге выполнялось до 160 итераций для получения сходимости по невязкам. Значения невязок равнялись 10^{-6} .

В ходе численных расчетов в программном комплексе ANSYS Fluent были получены коэффициенты лобового сопротивления c_x , поперечной силы c_y и число Струхала Sh для различных прямоугольных цилиндров при числе Рейнольдса $Re = V_\infty \cdot h / \nu = 2 \times 10^5$.

Согласно рис. 2, среднее значение коэффициента лобового сопротивления прямоугольной призмы для случаев турбулентности $I = 2\%$ и 4% , постепенно возрастает до некоторого максимального значения $c_x \approx 3$

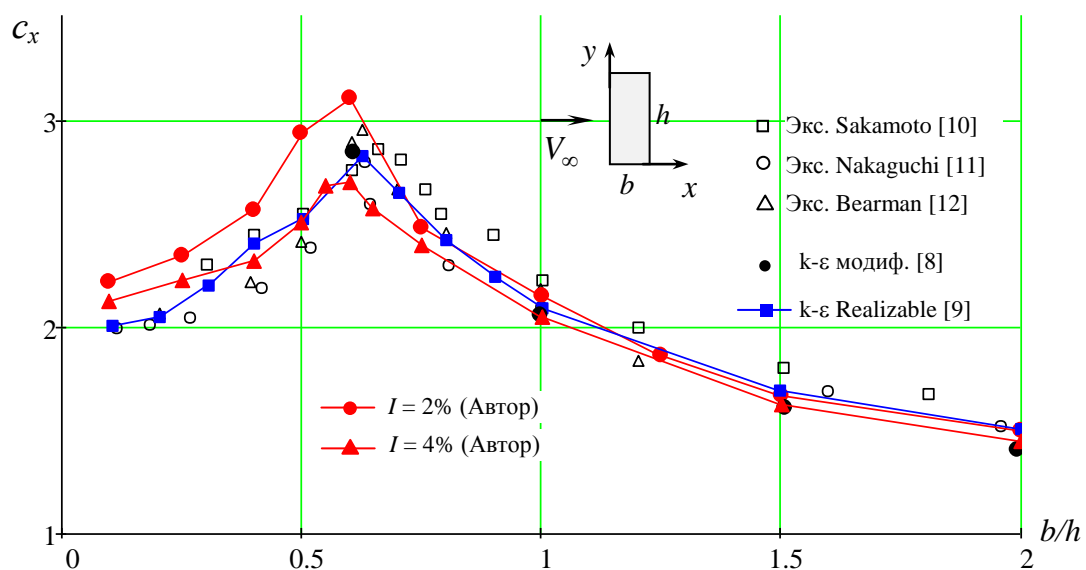


Рис. 2. – Зависимость коэффициента лобового сопротивления c_x от b/h

($b/h = 0.6$) и далее убывает до $c_x \approx 1.5$ ($b/h = 2$). Также видно, что коэффициент c_x более чувствителен к турбулентности набегающего потока до сечения 0.6 и менее чувствителен при больших сечениях. При большей турбулентности $I = 4\%$ зависимость c_x становится ближе к экспериментальным данным (рис.2).

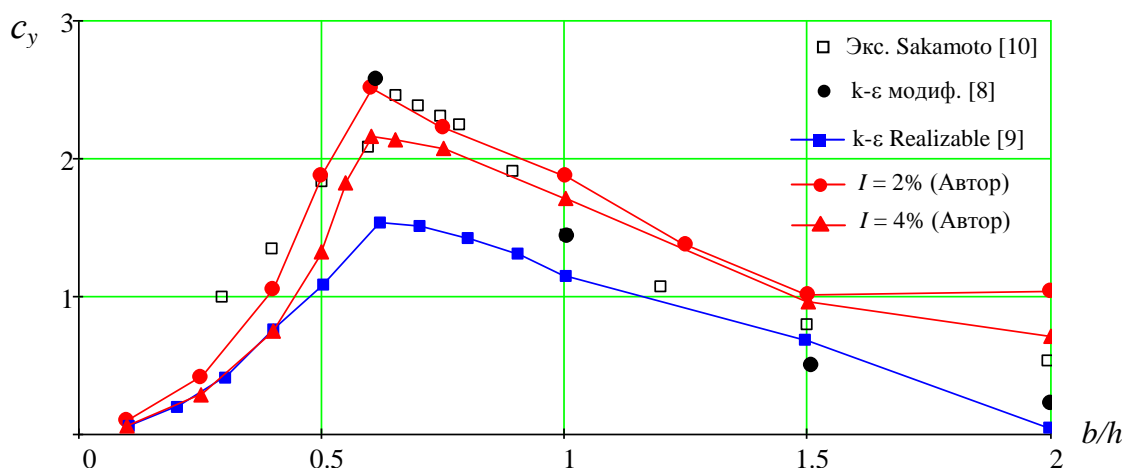


Рис. 3. – Зависимость коэффициента поперечной силы c_y от b/h

Изменение коэффициента знакопеременной поперечной силы c_y хорошо согласуется с экспериментальными данными [10] для сечений $b/h = 0.6 \div 0.75$ (рис. 3). По расчетам максимальные значения коэффициента c_y , отмечаются у призмы с $b/h = 0.6$, что также подтверждается численными расчетами, полученными в работе [8]. Заниженные значения c_y в работе [9], могли получиться путем использования в решателе алгоритма PISO или малой интенсивности турбулентности в набегающем потоке.

Начиная с $t \geq 150$ в следе за цилиндрами, устанавливалась вихревая дорожка Кармана. С этого момента времени определялось частота срыва вихрей $Sh = n \cdot h / V_\infty = N / t$, где N – число колебаний поперечной силы за время t . Частота изменения c_y равнялась частоте срывов вихрей. Расчеты показывают снижение Sh с ростом b/h , что подтверждается с экспериментальными данными (рис. 4).

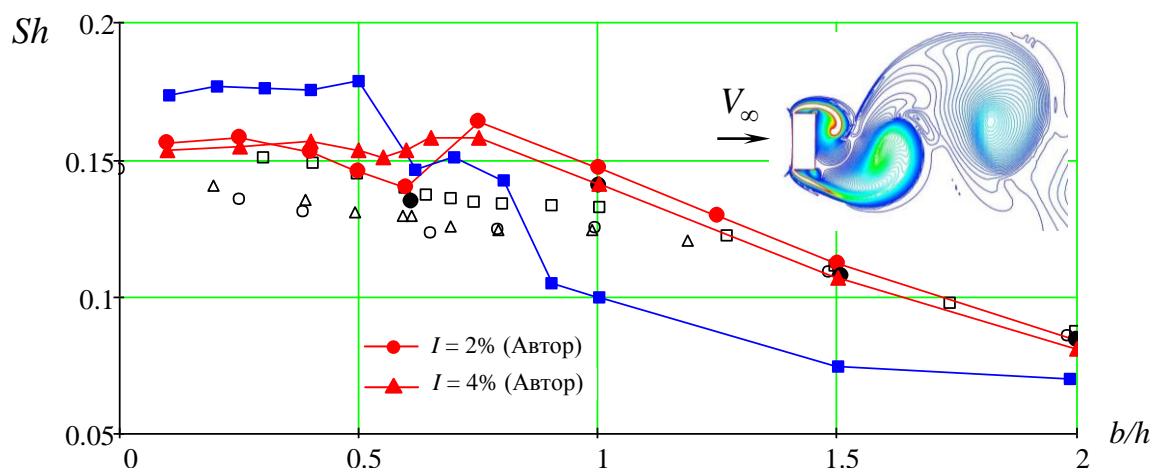


Рис. 4. – Зависимость числа Струхалия от b/h

Исследована модель турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable на примере течения около прямоугольного цилиндра с различным соотношением сторон. По результатам полученных аэродинамических характеристик можно считать, что данная модель турбулентности способна правильно прогнозировать образование вихревых структур за телами прямоугольного сечения.

Рассмотренная модель турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable с приведенными в статье настройками решателя в программе ANSYS Fluent можно использовать для расчетов ветровых нагрузок на конструкции здания и сооружения прямоугольной формы в плане. Особый интерес представляют высотные здания с сечением сторон $b/h = 0.6$, где согласно экспериментам и проведенным численным расчетам возникают максимальные ветровые нагрузки, что необходимо учитывать при расчетах элементов креплений фасадных систем.

Литература

1. Хайруллин А.Р., Хайбуллина А.И. Моделирование турбулентности при противопоточном обтекании пучка труб // Инженерный вестник Дона, 2023, №5. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2023/8503.



2. Денисихина Д.М., Иванова Ю.В., Мокро В.В. Численное моделирование истечения из современных воздухораспределительных устройств // Инженерный вестник Дона, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/4972.

3. Tian X., Ong M.C., Yang J., Myrhaug D. Unsteady RANS simulations of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios // Ocean Engineering, Vol. 58, 2013, pp. 208-216. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.013.

4. Sharma A., Gairola A. Numerical modelling for assessment of wind flow pattern and wind load on a rectangular cylinder for different aspect ratios // The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering, December 10-14, 2013, Chennai. India, pp. 158-167. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8_220.

5. Ying X., Xu F., Zhang Z. Numerical Simulation and Visualization of Flow around Rectangular Bluff Bodies. Proceedings of the 7th International Colloquium on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China, September 2-6, 2012, pp. 272-281.

6. Xu F., Ying Y., Zhang Z. Prediction of Unsteady Flow around a Square Cylinder Using RANS // Applied Mechanics and Materials, Vol. 52-54, pp. 1165-1170, 2011. DOI: 10.4028/scientific.net/AMM.52-54.1165.

7. Dahl S. M. Unsteady RANS simulation of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios at high Reynolds number (Master Thesis). Norwegian University of Science and Technology. 2014. URL: ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/238977/743697_FULLTEXT01.pdf.

8. Shimada K., Ishihara T. Application of a modified $k - \varepsilon$ model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders // Journal of Fluids and Structures, 16(4), 2002, pp. 465–485. DOI: 10.1006/jfls.2001.0433.

9. Wang S., Cheng W., Du R., Wang Y.. Unsteady RANS modeling of flow around two-dimensional rectangular cylinders with different side ratios at

Reynolds number $6.85E+5$ // *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2020, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2020/2163928.

10. Sakamoto H., Haniu H., Kobayashi, Y. Fluctuating forces acting on rectangular cylinders in uniform flow. (On rectangular cylinders with fully separated flow) // *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*. B. 1989, Vol. 55, pp. 2310-2317. DOI: 10.1299/kikaib.55.2310.

11. Nakaguchi H., Hashimoto K., Muto S. An Experimental Study on Aerodynamic Drag of Rectangular Cylinders // *Journal of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 1968, Vol. 16, pp. 1-5. DOI: 10.2322/jjsass1953.16.1.

12. Bearman P., Trueman D. An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders // *The Aeronautical Quarterly*, 1972, Vol. 23, pp. 229-237. DOI: 10.1017/S0001925900006119.

References

1. Khairullin A.R., Khaibullina A.I. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2023, №5. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n5y2023/8503.

2. Denisikhina D.M., Ivanova Yu.V., Mokro V.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*, 2018, №2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2018/4972.

3. Tian X., Ong M.C., Yang J., Myrhaug D. Unsteady RANS simulations of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios. *Ocean Engineering*, Vol. 58, 2013, pp. 208-216. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2012.10.013.

4. Sharma A., Gairola A. Numerical modelling for assessment of wind flow pattern and wind load on a rectangular cylinder for different aspect ratios. *The Eighth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering*, December 10-14, 2013, Chennai. India, pp. 158-167. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8_220.

5. Ying X., Xu F., Zhang Z. Numerical Simulation and Visualization of Flow around Rectangular Bluff Bodies. *Proceedings of the 7th International Colloquium*

on Bluff Body Aerodynamics and Applications (BBAA7), Shanghai, China, September 2-6, 2012, pp. 272-281.

6. Xu F., Ying Y., Zhang Z. Prediction of Unsteady Flow around a Square Cylinder Using RANS. Applied Mechanics and Materials, Vol. 52-54, pp. 1165-1170, 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.1165.

7. Dahl S. M. Unsteady RANS simulation of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios at high Reynolds number (Master Thesis). Norwegian University of Science and Technology. 2014. URL: ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/bitstream/handle/11250/238977/743697_FULLTEXT01.pdf.

8. Shimada K., Ishihara T. Application of a modified $k - \varepsilon$ model to the prediction of aerodynamic characteristics of rectangular cross-section cylinders. Journal of Fluids and Structures, 16(4), 2002, pp. 465–485. DOI: 10.1006/jfls.2001.0433.

9. Wang S., Cheng W., Du R., Wang Y.. Unsteady RANS modeling of flow around two-dimensional rectangular cylinders with different side ratios at Reynolds number $6.85E+5$. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2020, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2020/2163928.

10. Sakamoto H., Haniu H., Kobayashi, Y. Fluctuating forces acting on rectangular cylinders in uniform flow. (On rectangular cylinders with fully separated flow). Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B. 1989. Vol. 55. pp. 2310-2317. DOI: 10.1299/kikaib.55.2310.

11. Nakaguchi H., Hashimoto K., Muto S. An Experimental Study on Aerodynamic Drag of Rectangular Cylinders. Journal of The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences. 1968. Vol. 16. pp. 1-5. DOI: 10.2322/jjsass1953.16.1.

12. Bearman P., Trueman D. An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders. The Aeronautical Quarterly, 1972. Vol. 23. pp. 229-237. DOI: 10.1017/S0001925900006119.

Дата поступления: 30.09.2024

Дата публикации: 17.11.2024
