



УДК: 533.69.048

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.8

EDN: GWPZGZ

Численные расчеты коэффициентов сил прямоугольных цилиндров для учета ветровых нагрузок

А.В. Гумеров¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Учёт ветровых нагрузок при проектировании высотных сооружений и объектов является основной задачей в общем объеме проектных работ. Расчёт ветровых воздействий на навесные фасадные системы остается также непростой задачей и по настоящее время. Это в первую очередь касается выбора креплений для таких фасадов, где требуется правильно рассчитать ветровые нагрузки. Цель статьи – численные исследования с использованием модели турбулентности при расчетах коэффициентов лобового сопротивления, поперечной силы и частоты срывов вихрей у прямоугольных цилиндров с разным соотношением сторон. Для этого были поставлены следующие задачи: обзор опубликованных работ по этой теме, на основе анализа опубликованных работ выбор наиболее подходящей модели турбулентности, проведение численных расчетов и сравнение с имеющимися экспериментальными результатами.

Результаты. Проведены численные расчеты с использованием модели турбулентности k-ε Realizable при скоростях набегающего потока соответствующему числу Рейнольдса 2×10^5 . Получены зависимости коэффициентов лобового сопротивления, поперечной силы и числа Струхала от соотношения сторон прямоугольных цилиндров. Выполнено сравнение полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными. Для квадратного сечения приведено распределение коэффициента давления по его контуру при максимальной поперечной силе, делается сравнение осредненного коэффициента давления с имеющимися численными и экспериментальными данными. Приведена картина положения вихревых структур в следе за прямоугольником. Полученные численными расчетами аэродинамические характеристики различных прямоугольных призм показали в целом удовлетворительную сходимость с экспериментальными данными.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности применять модель турбулентности k-ε Realizable в расчетах ветровых нагрузок зданий, сооружений и элементов конструкций прямоугольного поперечного сечения.

Ключевые слова: обтекание прямоугольного цилиндра, моделирование обтекания прямоугольной призмы, модель турбулентности k-ε Realizable, ветровая нагрузка

Для цитирования: Гумеров А.В. Численные расчеты коэффициентов сил прямоугольных цилиндров для учета ветровых нагрузок // Известия КГАСУ, 2024, № 3(69), с. 77-97, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.8, EDN: GWPZGZ

Numerical calculations of force coefficients of rectangular cylinders to consider wind loads

A.V. Gumerov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement.* Taking into account wind loads in the design of high-rise structures and facilities is the main task in the total volume of design work. The calculation of wind impacts on hinged facade systems also remains a difficult task to this day. This primarily concerns the choice of fasteners for such facades, where it is required to calculate wind loads correctly. The purpose of the article is numerical studies using the turbulence model in calculating the coefficients of drag, transverse force and frequency of vortex disruptions in rectangular cylinders with different aspect ratios. To do this, the following tasks were set: a review of published works on this topic based on the analysis of published works, the selection of the most appropriate turbulence model, numerical calculations and comparison with available experimental results

Results. Numerical calculations have been performed using the k-ε Realizable turbulence model at incoming flow velocities corresponding to the Reynolds number 2×10^5 . The dependences of the coefficients of drag, transverse force and the Strouhal number on the aspect ratio of rectangular cylinders are obtained. The obtained results are compared with the available experimental data. For a square section, the distribution of the pressure coefficient along its contour at maximum transverse force is given, and the average pressure coefficient is compared with available numerical and experimental data. A picture of the position of vortex structures in the wake of rectangles is given. The aerodynamic characteristics of various rectangular prisms obtained by numerical calculations showed generally good convergence with experimental data.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the possibility of using the k-ε Realizable turbulence model in calculations of wind loads of buildings, structures and structural elements of rectangular cross-section.

Keywords: flow around a rectangular cylinder, simulation of flow around a rectangular prism, turbulence model k-ε, URANS, wind load

For citation: Gumerov A.V. Numerical calculations of force coefficients of rectangular cylinders to consider wind loads // News of KSUAE, 2024, № 3(69), с. 77-97, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.8, EDN: GWPZGZ

1. Введение

Как правило, для типовых конфигурации сечений здания ветровые нагрузки можно определить по инженерной методике с использованием норм СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Для сложных конфигурации необходимо проведение численных расчетов с привлечением современных вычислительных пакетов на примере ANSYS Fluent, ANSYS CFX, OpenFOAM, STAR-CD и др. Эти программы численно решают системы уравнений, отражающие общие законы механики жидкостей и газов и предназначены для решения широкого круга задач аэрогидродинамики.

Вычислительные пакеты содержат множества методов расчета с различными входными параметрами. Прежде чем приступить к расчетам обтекания сложных в плане сечения здания, инженеру в первую очередь необходимо провести тестовые расчеты на типовых сечениях с варьированием методов расчетов для выбора лучшего согласования с имеющимися экспериментальными данными, на что уходит немало времени.

В настоящей работе численно исследуется 2D методика моделирования нестационарного обтекания прямоугольного контура горизонтального сечения здания, с использованием одной из моделей турбулентности в программе ANSYS Fluent. Далее предполагается, согласно гибридной методике [1, 2], полученные таким образом аэродинамические характеристики (АДХ) сечения подставляются в формулы СП

20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», откуда определяются распределения средних и пиковых ветровых нагрузок по поверхности контура на различных высотах.

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 (Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes) уравнений с моделью турбулентности $k-\omega$ SST при числе Рейнольдса 21400. Расчетная область имела примерно от 70000 до 82000 элементов. Расчеты показали, что коэффициенты силы сопротивления C_d и подъемной силы C_l при $R = 1, 0.8$ и 0.6 довольно хорошо согласуются с экспериментами, однако для $R = 0.4, 0.2, 0.1$ и 0.05 коэффициенты сил показали завышенные результаты. В статье отмечено, что для прямоугольника $R = 0.6$ использовался меньший шаг интегрирования, чтобы достичь малого отклонения гидродинамических результатов. Похожие результаты для коэффициента сопротивления были получены в работе [4], где применялись модели турбулентности $k-\varepsilon$ Standart и $k-\varepsilon$ RNG (Renormalization Groups) в программе Fluent 6.3. Изменения коэффициента подъемной силы в зависимости от R оказалась более правдоподобными. Исследованием 2D URANS моделей турбулентности и 3D LES модели для прямоугольных цилиндров $R = 1 \div 10$ при Рейнольдса 21400 описывается в работе [5, 6]. В статье [6] также исследуется влияние затупления кромок прямоугольной призмы на вихреобразование и соответственно на АДХ различными 2D URANS моделями турбулентности. Отмечается, что из всех URANS моделей хорошую точность показала $k-\omega$ SST модель.

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. Шаг по времени был для всех цилиндров одним равным $\Delta t = 0.002D/V_\infty$. Расчетные коэффициенты сопротивления хорошо согласуются с экспериментами. Величина коэффициента подъемной силы при соотношении стороны 1 хорошо совпала с экспериментами равным 1.5, но при 2, 3 почти отсутствовала, а при 4 имела всплеск равной 0.75 что не похоже на экспериментальные результаты. Число Струхала колебалась в малом диапазоне в отличие от эксперимента. Число элементов в расчетной области вирировалось с 95280 до 220956. Расчеты показали, что увеличение числа элементов не значительно меняет аэродинамические характеристики прямоугольных цилиндров. Схожие результаты с изменением коэффициента подъемной силы в зависимости от соотношения сторон прямоугольной призмы были получены ранее в работе [8]. В этой статье применяется измененная модель турбулентности $k-\varepsilon$ Standart в формуле нахождения турбулентной кинетической энергии.

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 аэродинамических характеристик для квадратного цилиндра полученных тремя моделями турбулентности, модель $k-\varepsilon$ realizable взята как основная. Проведен анализ влияния сгущения сетки у поверхности квадрата на точность получаемых аэродинамических характеристик. Проведенные расчеты с высотой пристеночных ячеек $y_0/h = 0.0005, 0.001, 0.0015$ и 0.002 показали не сильное их влияние на АДХ, поэтому во всех расчетах применялся $y_0/h = 0.002$. Отмечается хорошее согласование полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Численные исследования влияния соотношения сторон прямоугольного цилиндра на АДХ и шума опубликованы в статье [10]. Двумерное обтекание прямоугольников ($R = 0.6 \div 6$) моделировалось URANS уравнениями вместе с моделью турбулентности $k-\omega$ SST при числах $Re = 5 \times 10^4$ в программе ANSYS Fluent. Отмечено, что с увеличением соотношения сторон R коэффициенты аэродинамических сил уменьшались. При $R > 1$

отмечалось уменьшение интенсивности срывов вихрей с цилиндра. Было установлено, что плотность сетки в 70000 ячеек оказалось приемлемым для проведения расчетов.

Стоит отметить работы, где численно исследуется обтекание только квадратной призмы. В статье [11] моделируется течение вокруг прямоугольной призмы при числах Re с 6×10^3 до 8×10^4 моделями турбулентности $k-\omega$ standard, $k-\epsilon$ realizable и $k-\epsilon$ RNG. Исследуется влияние модели турбулентности на развитие вихрей за прямоугольной призмой при различных числах Рейнольдса. Также показано влияние на АДХ число ячеек в расчетной области. В работе [12] численно с применением 2D URANS моделей турбулентности и гибридных моделей 3D LES/RANS исследуется поле скоростей около квадратной призмы, распределение давления по поверхности квадрата. В статьях [13, 14] также исследуется обтекание прямоугольного цилиндра различными моделями турбулентности. Единственное, что следует отметить в статье [13] численные расчеты проводятся при малых числах Рейнольдса.

На основе анализа вышерассмотренных работ, в особенности работы [9], аэродинамические характеристики прямоугольных цилиндров адекватно прогнозируются с применением модели турбулентности $k-\epsilon$ с новой модификацией Realizable.

Целью статьи является численные исследования с использованием модели турбулентности при расчетах коэффициентов лобового сопротивления, поперечной силы и частоты срывов вихрей у прямоугольных цилиндров с разным соотношением сторон.

Для ее достижения было необходимо выполнить следующие задачи:

- построить расчетные области со структурированной сеткой для прямоугольников с различным соотношением сторон;
- для каждого прямоугольника провести численные расчеты с привлечением модели турбулентности $k-\epsilon$ Realizable;
- результаты расчетов сопоставить с имеющимися экспериментальными данными.

2. Материалы и методы

Движение несжимаемой жидкости или газа в плоскости описывается уравнением неразрывности и уравнениями Навье – Стокса:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2}.$$

Ввиду сложности решения этих уравнений для турбулентных течений используют осреднение по Рейнольдсу, согласно которой параметры потока раскладывают на осредненную и пульсационную составляющие. В результате получают следующие уравнения осредненного турбулентного движения (уравнения Рейнольдса):

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0; \quad (2)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{u_i' u_j'}}{\partial x_j},$$

где x_i – декартовы координаты ($i, j = 1, 2$), u_i – компонента осредненной скорости в направлении x_i , u_i' – компонента пульсационной скорости, p – осредненное давление, ρ – плотность, t – время, $\nu = \mu/\rho$ – кинематическая вязкость жидкости.

Уравнения (2) отличаются от уравнений (1) содержанием неизвестных Рейнольдсовых напряжений $\overline{u_i' u_j'}$, как результат уравнения оказываются не замкнутыми.

Один из методов замыкания, это применение гипотезы Буссинеска [15]:

$$-\overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij},$$

где μ_t – турбулентная динамическая вязкость, $k = 0.5\overline{u'_i u'_i}$ – кинетическая энергия турбулентности, δ_{ij} – дельта Кронекера. Турбулентная вязкость μ_t может быть получена решением дополнительных транспортных уравнений, количество которых зависти от выбранной модели турбулентности.

Для замыкания системы уравнений (2) в данной работе выбрана модель турбулентности k - ε Realizable, включающая два уравнения переноса: для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε .

Уравнение переноса турбулентной кинетической энергии k получается из уравнения Рейнольдса путем алгебраических преобразований с некоторыми допущениями, после чего принимает вид [16]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon. \quad (3)$$

где $G_k = \mu_t S^2$ – генерация турбулентной кинетической энергии, определяется из вихревой вязкости Колмогорова $\mu_t = C_\mu \rho k^2 / \varepsilon$. $\sigma_k = 1$ – параметр, обеспечивающий нужную размерность. Функциональная зависимость C_μ корректирует определение турбулентной вязкости:

$$C_\mu = 1 / (A_0 + (A_S k U^* / \varepsilon) \varepsilon),$$

где $U^* = \sqrt{S_{ij} S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij} \tilde{\Omega}_{ij}}$, $\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\varepsilon_{ijk} \omega_k$, $\Omega_{ij} = \overline{\Omega}_{ij} - \varepsilon_{ijk} \omega_k$, $\overline{\Omega}_{ij}$ – тензор средних скоростей вращения; ω_k – угловая скорость; $A_0 = 4.04$ – константа. Выражение $A_S = \sqrt{6} \cos \varphi$, определяется через следующие соотношения:

$$\varphi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6}W), \quad W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{\tilde{S}^3}, \quad \tilde{S} = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}, \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right).$$

Уравнение переноса скорости диссипации ε основано на динамическом уравнении среднеквадратичных колебаний завихренности имеет следующий вид:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}}, \quad (4)$$

где $C_1 = \max[0.43, \eta / (\eta + 5)]$, $\eta = S(k / \varepsilon)$; константы $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$.

Для каждого прямоугольного цилиндра с соотношением сторон $R = b/h = 0.1, 0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$ была построена двумерная структурированная многоблочная расчетная сетка со сгущением к поверхности цилиндра. Построение сетки проводилось в программе Gambit 2.4.6. Размеры расчетной области с граничными условиями на примере квадратной призмы показаны на рис. 1. Для обеспечения достаточной точности расчетов, высота пристеночных ячеек было принято как в работе [9] равным $y_0/h = 0.002$. Количество расчетных ячеек в зависимости от соотношения сторон призм варьировалась в диапазоне $N = 56330 \div 90555$. Для ускорения расчетов с выходом на колебательный режим течения, разница в разбиении одной из боковых сторон прямоугольника была в одну или две ячейки.

Были заданы следующие граничные условия для расчетной области:

- на входе в расчетную область выбран тип граничного условия Velocity-inlet со следующими параметрами: скорость набегающего потока $V_\infty = 2$ м/с, интенсивность турбулентности набегающего потока (Turbulent Intensity) $I = 2$ % и масштаб турбулентности (Turbulent Length Scale) $l = h = 2$ м [17].

- в выходном сечении установлен тип граничного условия Pressure-outlet с внесением изменений в параметры турбулентности: (Turbulent Kinetic Energy) $k = 0$ и (Turbulent Dissipation Rate) $\varepsilon = 0$ [9], остальные параметры оставляем без изменений.

- верхнюю и нижнюю границы расчетной области определяем как Symmetry – условие проскальзывания и непротекания.

- контуры прямоугольника определяем как Wall с условием прилипания (No Slip).

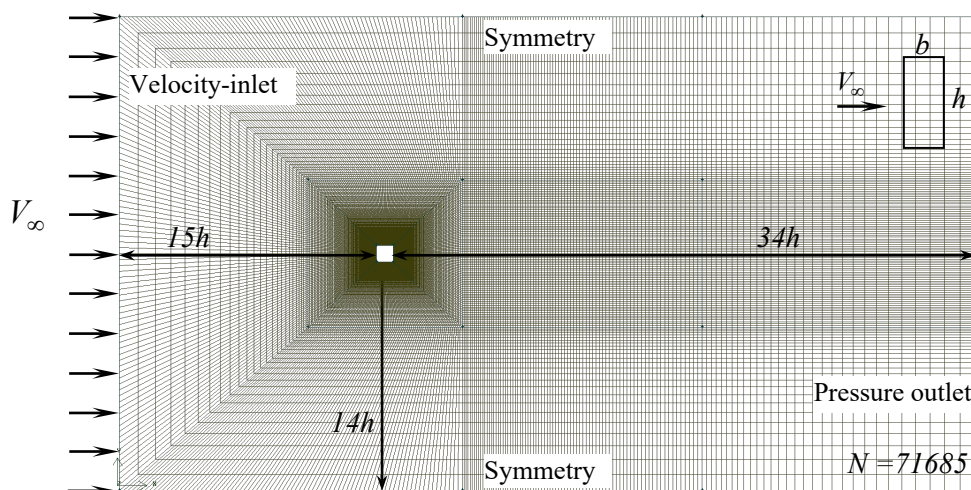


Рис. 1. Расчетная сетка и граничные условия для квадрата (иллюстрация автора)
 Fig. 1. Computational grid and boundary conditions for a square prism (illustration by the author)

В граничных условиях по умолчанию рабочее давление установлено Operation Pressure = 101325 Па, которое используется для определения абсолютного давления путем прибавления к нему избыточного давления, последнее рассчитывается при решении задачи на каждой итерации. Поэтому на входе и на выходе расчетной области значение избыточного давления оставляем без изменения (Gauge Pressure = 0).

Численное моделирование двумерного нестационарного обтекания прямоугольника было проведено в программе ANSYS Fluent, который в качестве дискретизации дифференциальных уравнений (2)-(4) использует метод конечных объемов (МКО). Из двух типов решателей Pressure-Based и Density-Based использовался решатель Pressure-Based, разработанный для несжимаемых и слабо сжимаемых течений. Рассматривалась нестационарная задача (Transient). Использовалась неподвижная система координат (Absolute).

Для решателя Pressure-Based был выбран способ связывания давления и скорости по алгоритму SIMPLE. Далее необходимо указать способ пространственной дискретизации конвективных членов для всех уравнений. По умолчанию для уравнения движения (Momentum) установлен способ Second Order Upwind – противопотоковая аппроксимация второго порядка точности. Для уравнения кинетической турбулентной энергии и уравнения диссипации турбулентной энергии также выбираем Second Order Upwind. Способ оценки градиентов (Gradient) установлен по умолчанию Least Squares Cell Based – линейная интерполяция между двумя значениями в центрах соседних ячеек, что является достаточно точным способом. Схема вычисления градиента давления (Pressure) была выбрана второго порядка точности (Second Order). Для временной аппроксимации использовалась опция, установленная по умолчанию First Order Implicit – неявная схема первого порядка.

При выборе модели турбулентности $k-\varepsilon$ с модификацией *Realizable* для моделирования течения в пограничном слое использовалась расширенное пристеночное моделирование (Enhanced Wall Treatment). В этом случае выбор пристеночной функции будет происходить в зависимости от величины y^+ (безразмерное расстояние до стенки). Будут использованы либо стандартные пристеночные функции ($30 < y^+ < 100$), либо функции соответствующие двухслойной модели ($y^+ < 30$). В настоящих расчетах величина y^+ менялась в пределах от 14 до 30.

Численное интегрирование уравнений выполнено во временном интервале $0 \leq t = t^* V_\infty / h \leq 250$ с постоянным шагом $\Delta t = 0.01$. На каждом временном шаге выполнялись до 120 итерации для получения сходимости по невязкам. Значения невязок для уравнений неразрывности (Continuity) и движения (x-velocity, y-velocity) были установлены равным 10^{-6} , а остальные невязки оставлены без изменений, установленные по умолчанию 10^{-3} . В настоящих расчетах было замечено, что увеличение точности расчетов путем понижением невязок до 10^{-6} ведет к повышению аэродинамических коэффициентов.

Как показали численные расчеты, решение задачи выходит на стабилизированный периодический режим течения при достижении $t \geq 120$. Другими словами, отмечалось совпадение коэффициентов аэродинамических сил c_x и c_y в моменты времени, соответствующие одной и той же фазе периодического течения. С этого момента времени определялось частота срыва вихрей (число Струхала) $Sh = n \cdot h / V_\infty = N/t$, где N – число колебаний коэффициента поперечной силы за безразмерное время t .

Численные расчеты начинались с моделирования обтекания квадратной призмы с вышеперечисленными настройками в программе ANSYS Fluent. Если задача сходилась и полученные аэродинамические коэффициенты согласовывались с экспериментальными данными, то расчеты проводились и для других прямоугольных призм.

3. Результаты и обсуждения

По результатам выполненных численных расчетов в программе ANSYS Fluent были получены коэффициенты лобового сопротивления c_x , поперечной силы c_y и число Струхала Sh для прямоугольных призм с соотношением сторон $b/h = 0.1, 0.25, 0.4, 0.5, 0.6, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$ при числе Рейнольдса $Re = V_\infty \cdot h / \nu = 2 \times 10^5$.

Как показали проведенные расчеты, среднее значение коэффициента лобового сопротивления прямоугольной призмы, начиная со значения $c_x = 2.22$ (при $b/h = 0.1$) постепенно возрастает до максимального значения 3.10 ($b/h = 0.6$) и далее убывает до $c_x = 1.50$ ($b/h = 2$). Программе при указанных настройках удается корректно смоделировать поведение c_x в зависимости от размеров поперечного сечения призмы (рис. 2). Следует заметить некоторое завышение c_x в промежутке $b/h = 0.1 \div 0.6$ включительно, что требует дальнейшего изучения. Коэффициент c_x при $b/h = 0.6$ удалось понизить со значения 3.3 до 3.1 уменьшением шага интегрирования с $\Delta t = 0.01$ до 0.005, такой прием был использован в работе [3]. Уменьшение шага $\Delta t = 0.005$ не повлияло на значения c_x и c_y при остальных b/h . Было замечено, что повышение турбулентности I ведет к снижению c_x и c_y .

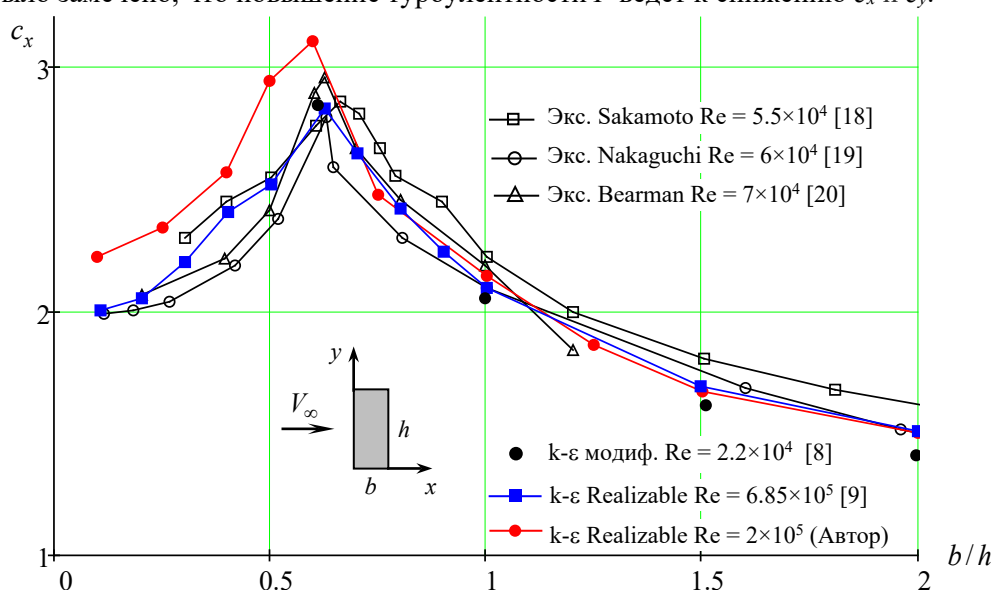


Рис. 2. Зависимость коэффициента лобового сопротивления c_x от b/h (иллюстрация автора)
Fig. 2. Dependence of the drag coefficient c_x on b/h (illustration by the author)

Изменение коэффициента знакопеременной поперечной силы хорошо согласуется с экспериментальными данными Sakamoto [18] (рис. 3б). Согласно численным расчетам максимальное значение коэффициента $c_y = 2.51$ как и $c_x = 3.10$, получается у призмы с соотношением сторон $b/h = 0.6$. Максимальный c_y также подтверждается численными расчетами с привлечением модифицированной k-ε модели в работе Shimada [8]. Заниженные значения поперечной силы в работе [9], по-видимому, связаны из-за применения в решателе алгоритма PISO и турбулентности набегающего потока $I = 2\%$.

На рисунке 3б показана зависимость числа Струхала Sh от b/h . Численные расчеты показывают снижение Sh с ростом b/h , что подтверждается с приведенными

экспериментальными данными. Коэффициент поперечной силы c_y совершает колебания возле нулевого значения с частотой равной частоте срыва вихрей, при этом частота изменения c_x около среднего значения равнялась удвоенной частоте срыва вихрей.

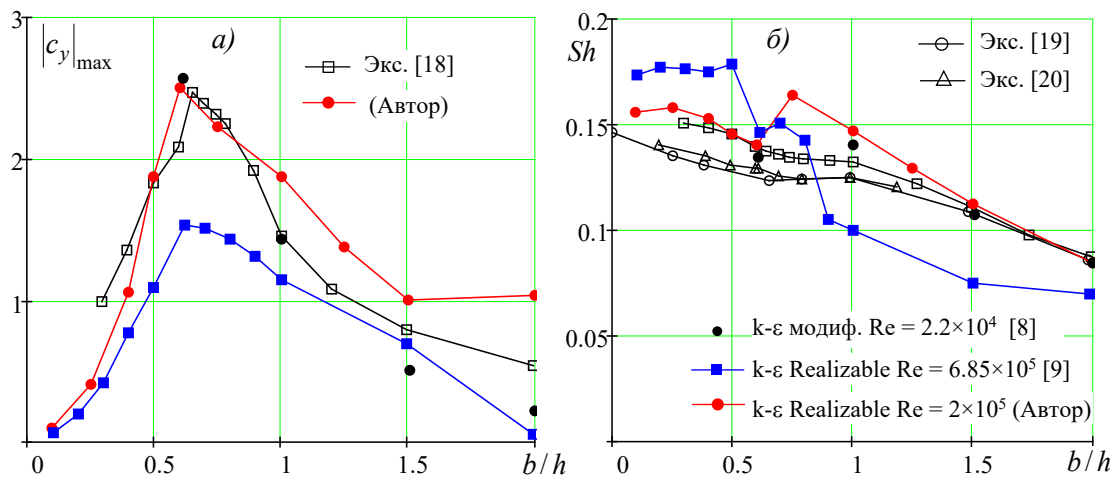


Рис. 3. Зависимости коэффициента поперечной силы c_y и числа Sh от b/h (иллюстрация автора)
 Fig. 3. Dependence of transverse force coefficient c_y and Strouhal number Sh on b/h ratio (illustration by the author)

Сравнение полученного численными расчетами распределения давления по поверхности квадратной призмы с экспериментальными данными показано на рисунке 4. На рисунке также показаны распределение коэффициента давления c_p в моменте достижения поперечной силы максимального значения, а жирными цветными линиями показаны их осредненные значения c_p . Из рисунка видно, что распределение среднего по времени коэффициента давления c_p удовлетворительно согласуется с известными экспериментальными данными [21,22].

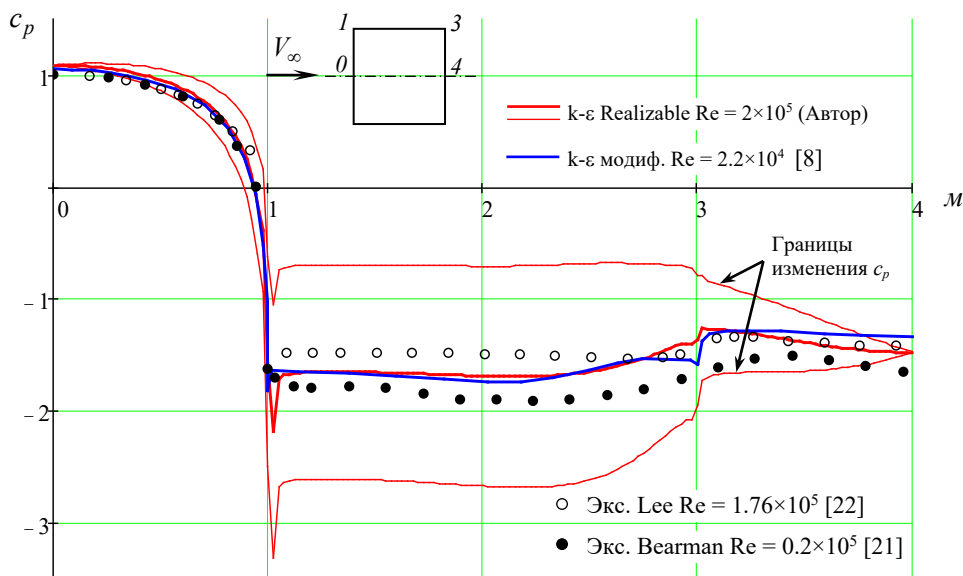


Рис. 4. Распределение коэффициента давления c_p по поверхности цилиндра квадратного сечения (иллюстрация автора)

Fig. 4. Distribution of the pressure coefficient c_p around square cylinder (illustration by the author)

На рисунке 5 показаны контуры завихренности в следе за призмами $b/h = 0.1, 0.4, 0.6, 0.75, 1.0, 1.25, 1.5, 2.0$ в моменте, когда поперечная сила достигает максимального значения. Как видно из рисунков, набегающий поток воздуха отрывается от передних кромок призмы в виде вихревых пелен и затем образует вихри у задней стороны стенки. Для призмы с $b/h = 0.6$ растущие вихри наиболее близки к донной части тела и поэтому

достигается максимальное значение коэффициента сопротивления $c_x = 3.10$. По обе стороны от значения $b/h = 0.6$ коэффициент сопротивления резко падает. Этот эффект связан с тем, что призма с $b/h = 0.6$ обладает минимальной длиной хвостовой части, необходимой для возникновения взаимодействия между вихрями у задней кромки призмы [23,24]. В результате которой, полностью развитый вихрь с одной стороны прижимает развивающийся вихрь с другой стороны призмы. Дымовая визуализация течения, проведенная в работе [25] для призмы с «золотым сечением» $b/h = 0.62$ хорошо согласуется полученной расчетной картиной течения (рис.5).

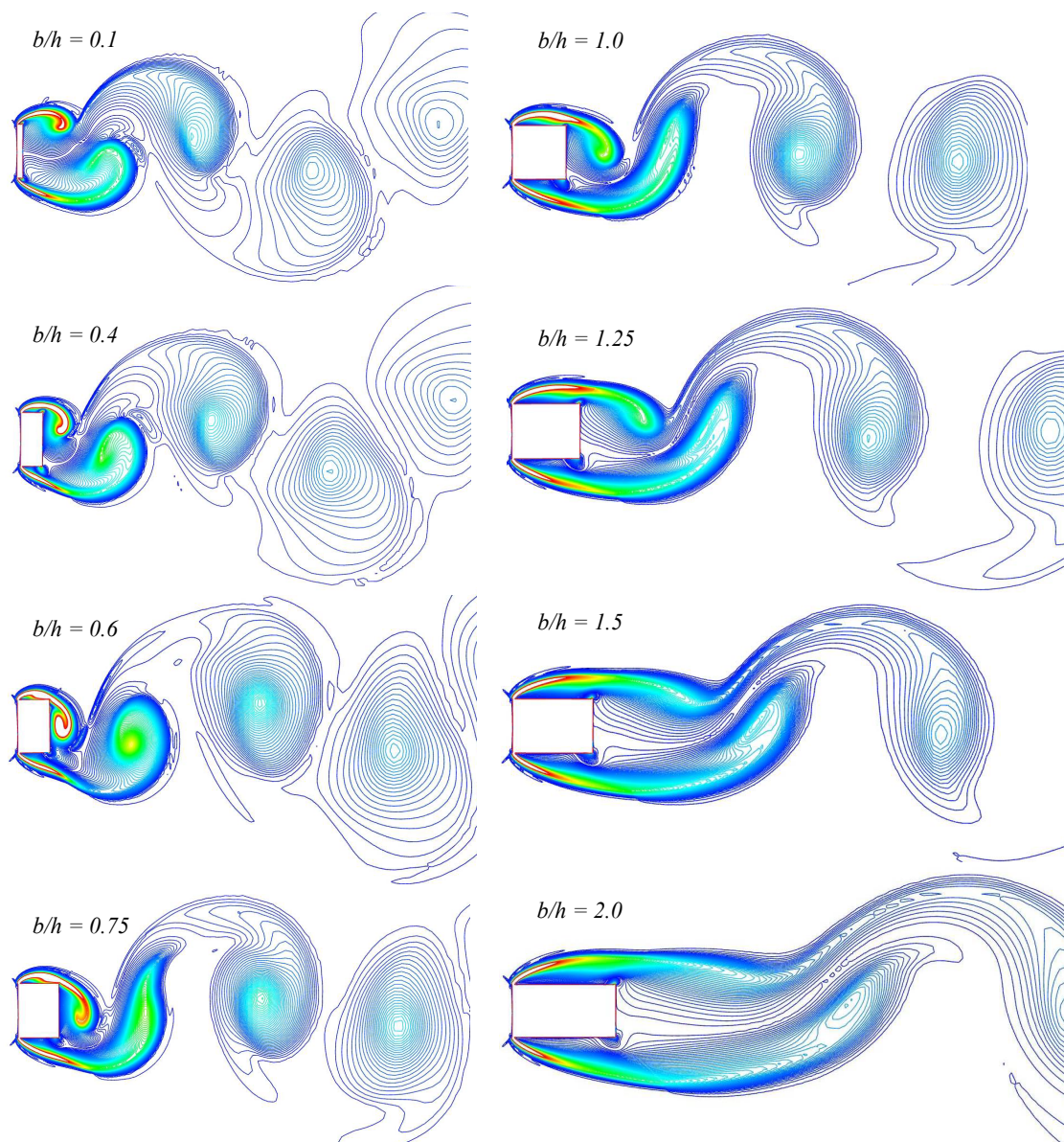


Рис. 5. Распределение завихренности потока за прямоугольной призмой в зависимости от изменения b/h при максимальной поперечной силе (иллюстрация автора)

Fig. 5. Vorticity contours with different side ratios when transverse force is maximum (illustration by the author)

4. Заключение

По результатам проведенных численных исследований можно сделать следующие выводы:

1. модель турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable способна правильно прогнозировать коэффициенты лобового сопротивления, поперечной силы и частоту срывов вихрей для различных призм прямоугольного сечения. Численные значения коэффициентов лобового сопротивления c_x примерно на 10% больше экспериментальных для сечений от

$b/h = 0.1$ до 0.6 . Коэффициенты поперечной силы c_y получаются завышенными с $b/h = 0.6$ до 2 примерно на 25% от экспериментальных значений. Наблюдается увеличение числа Струхала для сечения $b/h = 0.75$ на 20% от эксперимента;

2. рассмотренная модель турбулентности с приведенными в статье настройками решателя в программе ANSYS Fluent можно будет использовать для расчетов ветровых нагрузок здания и сооружения сложной формы в плане, ветровых воздействий на навесные фасадные системы многоэтажных жилых домов;

3. необходимо проведение численных исследований с привлечением других моделей турбулентностей.

Список литературы/References

1. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на высотное здание. Москва: АВОК, 2006. №8. С. 18-24. [Guvernyuk S.V., Gagarin V.G. Computer modeling of aerodynamic effects on a high-rise building. Moscow: AVOC, 2006. №8. P. 18-24].
2. Низамеев В.Г., Башаров Ф.Ф. Определение ветровой нагрузки на фасад многоэтажного здания прямоугольного очертания в плане // Наука и бизнес: пути развития. №12(138), 2022, С. 12 – 16. [Nizameev V.G., Basharov F.F. Determination of the wind load on the hinged facade system of a slab block building // Science and business: development ways. №12(138), 2022, P. 12 – 16].
3. Xinliang Tian, Muk Chen Ong, Jianmin Yang, Dag Myrhaug. Unsteady RANS simulations of flow around rectangular cylinders with different aspect ratios // Ocean Engineering. Vol. 58. 2013. P. 208-216. DOI:10.1016/j.oceaneng.2012.10.013.
4. Ashutosh Sharma, Ajay Gairola. 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. DOI: 10.3850/978-981-07-8012-8_220.
5. Xuyong Ying, Fuyou Xu, Zhe Zhang. Numerical Simulation and Visualization of Flow around Rectangular Bluff Bodies // The Seventh International Colloquium on Bluff Body. Aerodynamics and Applications. Shanghai. China. September 2-6. 2012.
6. Fuyou Xu, Xuyong Ying, Zhe Zhang. Prediction of Unsteady Flow around a Square Cylinder Using RANS // Applied Mechanics and Materials. Vol. 52-54. P. 1165-1170. 2011. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.52-54.1165.
7. Dahl Sindre Misund. Unsteady RANS Simulation of Flow around Rectangular Cylinders with different Aspect Ratios at High Reynolds Number. Norwegian University of Science and Technology. Department of Marine Technology. June 2014.
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, 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. 2020. Vol. 2020. P. 1-13. DOI:10.1155/2020/2163928.
10. S. Abbasi. Numerical simulation of aspect ratio effect of the rectangular cylinder on the aerodynamic noise // J. Comput. Appl. Res. Mech. Eng. Vol. 12. No. 2. P. 263 -274. 2023. DOI: 10.22061/jcarme.2022.7906.2056.
11. N. Nordin, E. Benard. Prediction of flow pattern behavior behind square cylinder using computational fluid dynamic (CFD) approach // International Journal of Engineering and Techology. Vol. 7. 2018. P. 401 – 405. DOI:10.14419/ijet.v7i4.33.26086.
12. Jianghua Ke. RANS and hybrid LES/RANS simulations of flow over a square cylinder // Adv. Aerodyn. Vol. 1. № 10. P. 1 – 24. 2019. DOI:10.1186/s42774-019-0012-9.
13. Вальгер С.А., Федоров А.В. и Федорова Н.Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. 2013. Том 18, № 5. С. 27 – 40. [Valger S.A., Fedorov A.V. and Fedorova N.N. Modeling of incompressible turbulent

- flows in the vicinity of poorly streamlined bodies using ANSYS Fluent // Computing technologies. 2013, Vol. 18, №5. P. 27 – 40].
14. Субботина П.Н., Шишаева А.С. Применение различных моделей турбулентности для задач внешнего обтекания в программном комплексе FlowVision. ООО «Тесис» // Современные технологии – в промышленность. https://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es08_turbul.pdf. [Subbotina P.N., Shishaeva A.S. Application of various turbulence models for external flow problems in the FlowVision software package. LLC “Tesis”].
 15. Baranov, P. & Guvernyuk, S. & Zubin, Mikhail & Isaev, S. & Usachov, A.S. Application of various models of turbulence for calculation of incompressible internal flows // TsAGI Science Journal. Vol. 48. 2017. DOI:10.1615/TsAGISciJ.2017020750.
 16. Коркодинов Я.А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности // Вестник ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. Том 15. № 2. 2013. С 5-16. [Korkodinov Y. A. Review of a family of k-ε models for turbulence modeling // Bulletin of PNIPU. Mechanical engineering, materials science. Vol.15. №2. 2013. P. 5-16].
 17. Li Y.C., Chung C.Y., Fang F.M. Effect of Turbulent Uniform Flow past a Two-Dimensional Square Cylinder // Journal of Applied Fluid Mechanics. 2018. Vol. 11. № 5. P. 1185 – 1192. DOI: 10.29252/jafm.11.05.28067
 18. 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. P. 2310-2317. DOI:10.1299/kikaib.55.2310.
 19. 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. P. 1-5. DOI: 10.2322/jjsass1953.16.1.
 20. Bearman P., Trueman D. An Investigation of the Flow around Rectangular Cylinders // The Aeronautical Quarterly, 1972. Vol. 23. P. 229-237. DOI: 10.1017/S0001925900006119.
 21. Bearman, P. W., Obasaju, E. D. An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders // Journal of Fluid Mechanics. 1982. Vol. 119. P. 297 – 321. DOI:10.1017/S0022112082001360.
 22. Lee B.E. The effect of turbulence on the surface pressure field of a square prism // Journal of Fluid Mechanics. 1975. Vol. 69. P. 263-282. DOI: 10.1017/S0022112075001437.
 23. Sarpkaya T., Ihrig C.J. Impulsively started steady flow about rectangular prisms: experiments and discrete vortex analysis // J. Fluids Eng. 1986. Vol. 108. №1. P. 47–54. DOI: 10.1115/1.3242542.
 24. Logachev, K. I., Ziganshin, A. M., Averkova, O. A. A study of separated flows at inlets of flanged slotted hoods // Journal of Building Engineering. – 2020. – Vol. 29. – P. 101159. – DOI 10.1016/j.jobee.2019.101159.
 25. Norberg C. Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. Vol. 49. P. 187-196. 1993. DOI:10.1016/0167-6105(93)90014-F.

Информация об авторах

Гумеров Анвар Васильевич, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация.

E-mail: anvar_gumerov@list.ru, ORCID: 0000-0002-4547-8839

Information about the authors

Anvar V. Gumerov, candidate of technical sciences, associate professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

E-mail: anvar_gumerov@list.ru, ORCID: 0000-0002-4547-8839