



УДК: 533.69.048

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.9

EDN: JYMOLF

Численный расчет максимальной пиковой ветровой нагрузки для прямоугольного в плане здания

А.В. Гумеров¹

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

Аннотация. *Постановка задачи.* Известно, что на угловых участках прямоугольного в плане здания возникает ветровой отсос. Согласно нормативным нормам, для всех профилей здания коэффициент отрицательного давления рекомендуется принимать равным 2.2. Целью работы является определение максимальной пиковой ветровой нагрузки на угловых участках контура горизонтального сечения высотного здания численным путем. Задачи исследования: проведение двумерных численных расчетов обтекания квадратной и прямоугольных призм, проведение численного расчета на примере прямоугольного в плане высотного здания, сравнение интегральных и распределенных аэродинамических характеристик с имеющимися экспериментальными данными, сравнение численных результатов с нормативными данными.

Результаты. На основе численного решения в программе ANSYS Fluent двумерной задачи обтекания отдельно квадратной и прямоугольной призмы с соотношением сторон 0.6 были получены коэффициенты лобового сопротивления, поперечной силы, распределения коэффициента давления по контуру этих профилей. Также получены интегральные и распределенные характеристики для прямоугольного профиля высотного здания, с соотношением сторон близким к 0.6. Согласно результатам расчетов отмечается значительный ветровой отсос на угловых участках прямоугольных профилей. Отрицательный коэффициент давления на кромках прямоугольной призмы и прямоугольного в плане здания примерно на 30% больше квадратной призмы. Отмечается хорошее согласование пикового значения коэффициента отрицательного давления для квадратной призмы и нормативным значением.

Выводы. Значимость полученных результатов для строительной отрасли состоит в возможности использовать коэффициент давления на угловых участках прямоугольных в плане зданий с соотношением сторон близки к 0.6 при расчете пиковой ветровой нагрузки для элементов ограждения и узлов их крепления.

Ключевые слова: ветровые воздействия, пиковая ветровая нагрузка, ветровой отсос, прямоугольные в плане здания, пиковое значение отрицательного коэффициента давления.

Для цитирования: Гумеров А.В. Численный расчет максимальной пиковой ветровой нагрузки для прямоугольного в плане здания // Известия КГАСУ, 2025, № 4 (74), с. 98-108, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.9, EDN: JYMOLF

Numerical calculation of the maximum peak wind load for a rectangular building

Anvar V. Gumerov¹

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

Abstract. *Problem statement.* It is known that wind suction occurs at the corners of a rectangular building. According to regulatory standards, the negative pressure coefficient for all

building profiles is recommended to be equal to 2.2. The purpose of this article is to determine the maximum wind load on the angular sections of the horizontal section of a high-rise building by numerical calculations. The tasks of the study include conducting two-dimensional numerical calculations of the flow around a square and rectangular prism, conducting a numerical calculation using a rectangular high-rise building as an example, comparing integral and distributed aerodynamic characteristics with available experimental data, and comparing numerical results with regulatory data.

Results. Based on the numerical solution in the ANSYS Fluent program of a two-dimensional problem of flow around a separate square and rectangular prism with an aspect ratio of 0.6, the coefficients of drag, lateral force, distribution of the pressure coefficient along the contour of these profiles were obtained. Integral and distributed characteristics were also obtained for a rectangular profile of a high-rise building with an aspect ratio close to 0.6. According to the results of calculations, a significant wind suction is noted on the angular sections of rectangular profiles. The negative pressure coefficient on the edges of a rectangular prism and a rectangular building is approximately 30% greater than that of a square prism. There is a good agreement between the peak value of the negative pressure coefficient for a square prism and the standard value.

Conclusions. The significance of the results obtained for the construction industry lies in the possibility of using the pressure coefficient on the corner sections of rectangular buildings with an aspect ratio close to 0.6 when calculating the peak wind load for fencing elements and their fastening points.

Keywords: wind effects, peak wind load, wind suction, rectangular buildings, peak negative pressure coefficient value.

For citation: Gumerov A.V. Numerical calculation of the maximum peak wind load for a rectangular building // News of KSUAE, 2025, № 4 (74), p. 98-108, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/74.9, EDN: JYMOLF

1. Введение

В строительстве многоэтажных зданий и сооружений широко применяют различные виды навесных фасадов [1]. Навесные фасады представляют собой комбинацию облицовки, утеплителя, ветрозащитной мембраны и несущей подсистемы. Несущая подсистема — это набор профилей и крепежных элементов, которая крепится к каркасу здания. К профилям фиксируется облицовка, образуя наружную оболочку здания. В качестве облицовки используются различные материалы: плиты из керамогранита, различные композиты и др.

Долговечность и надежность вентилируемых фасадов зависит от правильного выбора крепежа для утеплителя, профиля, кронштейнов и облицовки. Для этого при проектировании фасадных конструкций необходимо правильно составить расчетную схему, провести сбор нагрузок на конструкцию, расчет усилий в элементах конструкций и т.д. [2, 3]. Основной интерес представляет расчет пиковой ветровой нагрузки на элементы ограждения и узлов их крепления [4]. В статье [5] отмечается, что на фасадах в окрестности острых выступов среднее значение указанного коэффициента может достигать $c_p = -2.5$ и ниже.

Для определения аэродинамических коэффициентов давления на угловых участках прямоугольных в плане зданий, рекомендуется использовать нормативные значения из СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Для нестандартных в плане зданий, для которых отсутствуют соответствующие значения, рекомендуется использовать результаты продувок масштабных моделей в дозвуковых аэродинамических трубах. Изготовление масштабных моделей с размещением в них многочисленных датчиков давления и последующее проведение экспериментов в аэродинамических трубах является долгим и дорогостоящим занятием. Следует отметить, не все аэродинамические трубы имеют возможность вместить детальную модель здания в рабочую часть. Малоразмерные модели не способны в полной мере воспроизвести все натурные условия обтекания [6,7].

В последнее время актуальным становится проведение расчетов обтекания зданий и сооружений в современных вычислительных пакетах. Инженерами в строительной области наработано немало работ по расчету сложных объектов в таких пакетах как ANSYS Fluent [8, 9], ANSYS CFX, STAR-CD [10], др. Расчетные программы позволяют более детально изучить некоторые особенности обтекания сложных тел, но для этого требуются опытные специалисты для получения правдоподобных результатов. Поэтому эти расчетные комплексы не способны стать тотальной альтернативой методам физического моделирования и традиционным нормативным методикам [11].

Для элементов ограждения и узлов их крепления, согласно требованиям СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия», необходимо учитывать пиковые положительные и отрицательные воздействия ветровой нагрузки. Где пиковые значения аэродинамических коэффициентов отрицательного давления для стен на угловых зонах рекомендуется принимать равным $c_p = -2.2$. В настоящей работе численными расчетами показано, что осредненный коэффициент отрицательного давления может принимать по величине больше нормативного значения $c_p = -2.2$. Этот коэффициент, прежде всего, зависит от соотношения сторон прямоугольного профиля.

Целью настоящего исследования является определение максимальной пиковой ветровой нагрузки на угловых участках контура горизонтального сечения высотного здания с соотношением сторон близким к 0.6 численным путем.

Для ее достижения было необходимо выполнить следующие задачи:

- построить расчетную область обтекания конкретного профиля здания с соотношением сторон близким к 0.6;
- провести численные расчеты двумерного нестационарного обтекания ветровым потоком профиля жилого дома в программе ANSYS Fluent;
- провести проверочные численные расчеты обтекания квадрата ($b/d = 1.0$) и нескольких прямоугольников, в том числе с сечением $b/d = 0.6$;
- провести сравнение полученных численных результатов с имеющимися экспериментальными данными,
- сравнить полученный численным путем пиковый коэффициент отсоса обтекаемых сечений с нормативным значением.

2. Материалы и методы

Движение вязкой среды в декартовой системе координат описывается уравнениями Навье – Стокса, осредненные по Рейнольдсу.

Согласно гипотезе Буссинеска [13], напряжения $\overline{u'_i u'_j}$ моделируются как:

$$-\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \left(\rho k + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right) \delta_{ij}, \quad (1)$$

где x_i – декартовы координаты ($i, j = 1, 2$), u_i – компонента осредненной скорости в направлении x_i , u'_i – компонента пульсационной скорости, ρ – плотность, μ_t – динамический коэффициент турбулентной вязкости, $k = 0.5 \overline{u'_i u'_i}$ – кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Турбулентная вязкость μ_t может быть получена решением дополнительных транспортных уравнений, количество которых зависит от выбранной модели турбулентности.

Осредненные уравнения движения Навье – Стокса можно решить только с дополнительными уравнениями, описывающими различные модели турбулентности. В работе [14] численные исследования по обтеканию прямоугольников с различным соотношением сторон с использованием модели турбулентности k - ε Realizable показали хорошее согласование с имеющимися экспериментальными данными. Поэтому в настоящей работе для замыкания уравнений движения использовалась модель турбулентности k - ε Realizable, которая содержит уравнение переноса кинетической энергии турбулентности k и модифицированное уравнение переноса для скорости диссипации энергий турбулентности ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon, \quad (2)$$

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

где G_k – генерация турбулентной кинетической энергии, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.2$, $C_2 = 1.9$.

Численное моделирование двумерного нестационарного обтекания профиля здания проводилось в программе ANSYS Fluent с помощью решателя Pressure-Based. Для расчета связи поля скорости и давления использовался алгоритм SIMPLE с привлечением противопоточной схемы второго порядка точности (Second Order Upwind) для конвективных членов в уравнении сохранения импульса (Momentum), для уравнения кинетической турбулентной энергии и уравнения диссипации турбулентной энергии. Способ оценки градиентов (Gradient) установлен по умолчанию Least Squares Cell Based. Схема вычисления градиента давления была выбрана второго порядка точности. Для временной аппроксимации использовалась неявная схема первого порядка.

Для качественного моделирования течения в пограничном слое использовался расширенное пристеночное моделирование (Enhanced Wall Treatment). Это позволяет снять ограничения на величину первого пристеночного шага сетки.

В программе Gambit 2.4.6 были построены расчетные области для обтекания квадрата ($b/d = 1.0$) и прямоугольника ($b/d = 0.6$) с числом ячеек 71685 и 64285 соответственно. Также были построены дополнительные расчетные сетки для прямоугольников $b/d = 0.1$ (с числом ячеек 56.330 и 106.072) и 0.4 (с числом ячеек 60.770 и 128.094). Было замечено отсутствие значительного влияния количества ячеек на результаты расчетов.

Для моделирования обтекания среза многоэтажного здания использовался конкретный 19-этажный жилой дом № 9 по улице разведчика Ахмерова в г. Казани с размерами сечения близкими к 0.6. Расчетная сетка для профиля здания имела ячеек 144272 (Рис.1,а). Расчетные области, состояли из блочно-структурированных частей сопрягающимися поверхностями. Внешняя граница расчетной области и число ячеек были оптимально подобраны, чтобы минимизировать их влияние на результаты расчетов и для уменьшения времени расчетов. На подветренной стороне профиля было предусмотрено плавное увеличение размера ячеек для корректного развития, отрывов и движения оторвавшихся вихрей вниз по потоку.

На рис. 1,б и 1,в показаны фрагменты расчетной сетки около всего контура профиля дома и углового участка, где отмечается максимальный ветровой отсос. Весь контур сечения был разбит на ячейки длиной примерно по 20 см со сгущениями по краям для каждой прямолинейной участка. На четырех углах профиля здания использовались Quad-элементы сетки, чтобы исключить влияние мелкой пристеночной разбивки на развитие вихревого следа.

В качестве граничных условий на входе в расчетную область (рис. 1) был задан равномерный поток несжимаемого воздуха $V_\infty = 20$ м/с. При такой скорости ветра у многоэтажного здания на верхних этажах у кромок произошёл отрыв композитных панелей от витражной системы фасада. Интенсивность турбулентности потока в аэродинамических трубах колеблется пределах $I = 0.1 \div 2\%$, поэтому на входе и выходе в расчетную область были приняты значения характеристик турбулентности потока: интенсивность турбулентности $I = 2\%$, масштаб турбулентности $l = 37.4$ м. На боковых границах расчетной области выполнялись условия проскальзывания и непротекания (Symmetry). Контуры профиля заданы как Wall.

Для большей точности расчетов значения всех невязок были установлены 10^{-6} . Интегрирование уравнений по времени проводилось с постоянным шагом 0.1. Максимальное число итераций внутри каждого временного шага было установлено 120. Сходимость решения считалось достигнутой, когда колебания интегральных аэродинамических характеристик принимали устойчивый характер.

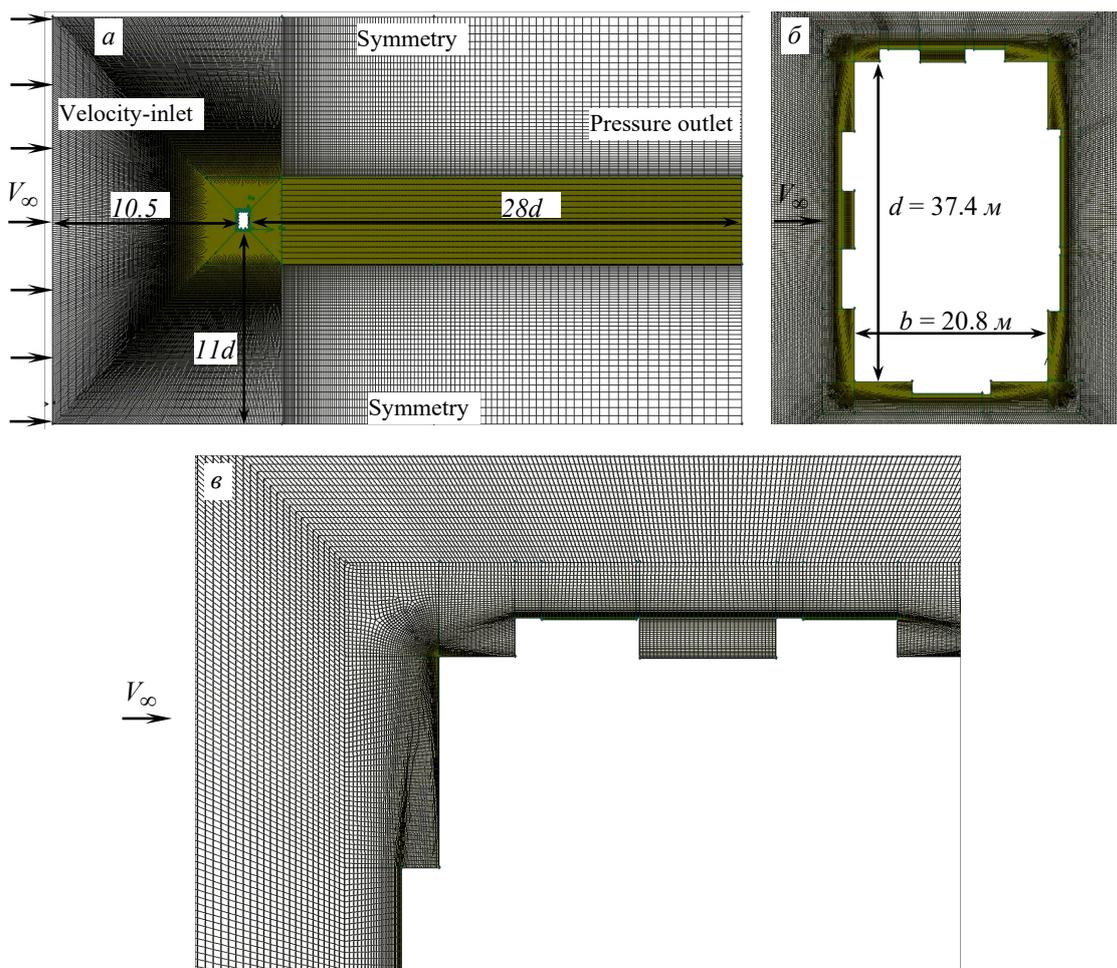


Рис. 1. Расчетная сетка: а – расчетная область и граничные условия для профиля здания, б и в – фрагменты расчетной сетки около профиля здания (иллюстрация автора)
 Fig. 1. Computational grid: a – computational grid and boundary conditions for the building profile, b and c – fragments of the calculated grid near the building profile (illustration by the author)

3. Результаты и обсуждения

Численными расчетами, проведенными в программе ANSYS Fluent, были получены: среднее значение коэффициента лобового сопротивления c_x , коэффициент максимальной поперечной силы c_y и безразмерная частота срывов вихрей Sh для призмы квадратного сечения ($b/d = 1.0$), прямоугольного сечения ($b/d = 0.6$) и для профиля многоэтажного жилого здания рис. 2.

Использованная в расчетах модель турбулентности $k-\varepsilon$ *Realizable* способна спрогнозировать аэродинамические характеристики для прямоугольных сечений в диапазоне $b/d = 0.1 \div 2.0$ [14]. Проведенные расчеты для $b/d = 0.1, 0.4, 0.6$ и 1.0 подтверждают это удовлетворительной сходимостью с известными экспериментальными результатами (рис. 2).

Как показали расчеты для профиля здания с соотношением сторон близким к 0.6 среднее значение коэффициента лобового сопротивления $c_x = 2.71$, что очень хорошо согласуется с экспериментальными данными [15,16]. Коэффициент поперечной силы профиля здания, совершает гармонические колебания, с амплитудой равной $c_y = 2.25$, что на 7 % превышает экспериментальное значение Sakamoto [15] $c_y = 2.1$. Согласно расчетам, число Струхала для сечения здания $Sh = 0.167$, что на 19 % больше от экспериментального значения $Sh = 0.14$ [15]. По-видимому, на вихреобразование и их последующий срыв сказывается наличие у профиля здания выступающие элементы, в виде балконов.

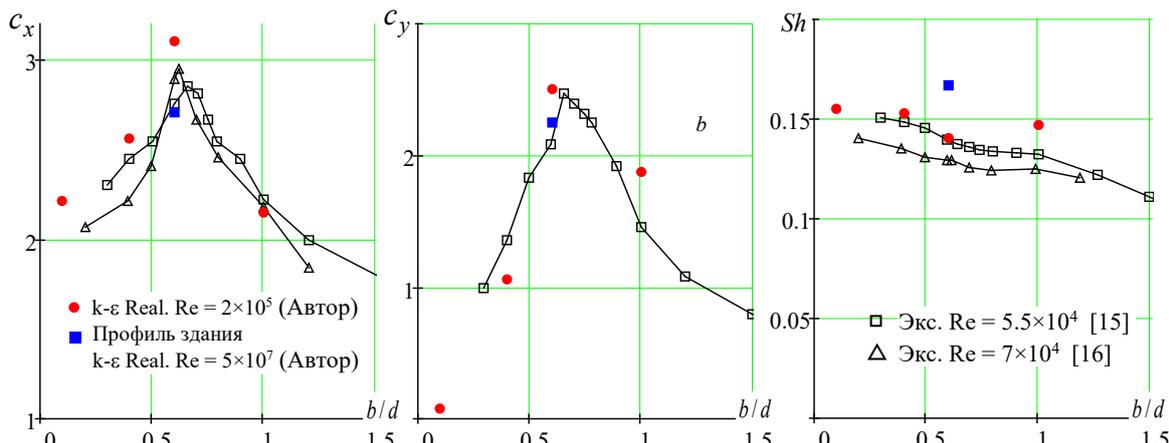


Рис. 2. Аэродинамические характеристики различных профилей (иллюстрация автора)
 Fig. 2. Aerodynamic characteristics of various profiles (illustration by the author)

Согласно экспериментальным данным (рис. 2), именно у призмы с соотношением сторон $b/d = 0.6$ возникают мощные вихри и как следствие появляются максимальные коэффициенты аэродинамических сил c_x и c_y . При этом соответственно возникают экстремальные пиковые отрицательные коэффициенты давления на передних кромках профиля.

Максимальное отрицательное давление на контуре профиля здания возникает при максимальных значениях коэффициента поперечной силы. В особенности на передних кромках профиля здания возникают пиковые отрицательные давления с правой и левой стороны (рис. 3,а и рис. 3,б). Это происходит, когда, например (рис. 3,б), полностью развитый вихрь с левой стороны втягивает и прижимает развивающийся вихрь с правой стороны к подветренной стороне профиля. Питающая пелена большой интенсивности развивающегося вихря проходит близко к правому краю профиля, что вызывает сильное разрежение на этой стороне. Спустя некоторое время развивающийся вихрь справа достигает максимального размера и втягивает развивающийся вихрь слева в подветренную зону, вызывая сильное разрежение с левой стороны профиля (рис. 4,б).

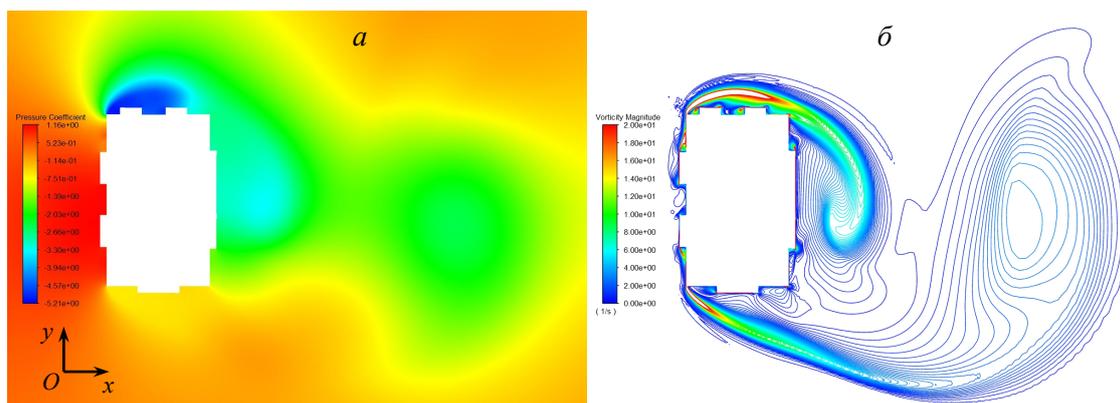


Рис. 3. Картина течения около профиля при максимальном c_y : а – поле коэффициента давления, б – завихренность потока (иллюстрация автора)

Fig. 3. Flow pattern near a profile at maximum c_y : a – pressure coefficient field, b – flow vorticity (illustration by the author)

Согласно картине давления на рис. 3,а максимальное разрежение наблюдается на боковой стороне здания с двумя балконами и достигает на угловом участке значения $c_p \approx -5.21$. При формировании противоположной конфигурации вихрей на этом же участке кромки отмечается минимальное разрежение равное примерно $c_p \approx -0.65$ (рис. 4,а). Тогда среднее пиковое разрежение на кромке $c_p \approx -0.65 - (5.21 - 0.65)/2 = -2.93$. Это хорошо согласуется с пиковым значением осредненного по времени коэффициента давления возле кромки $c_p = -3.18$ для прямоугольника $b/d = 0.6$ (рис. 5). На этом рисунке тонкими

линиями показаны распределения c_p при максимальной и минимальной поперечной силе, т.е. границы изменения c_p . Жирными линиями показаны осредненные значения c_p , полученные в численных расчетах для квадрата и прямоугольника. Коэффициент отрицательного давления на угловом участке для прямоугольника ($c_p = -5.7$) оказался несколько больше по величине (на 10%) значения для профиля здания ($c_p = -5.21$). Это можно объяснить близким расположением балкона к кромке, что затупляет угловую часть здания, тем самым уменьшая ветровой отсос.

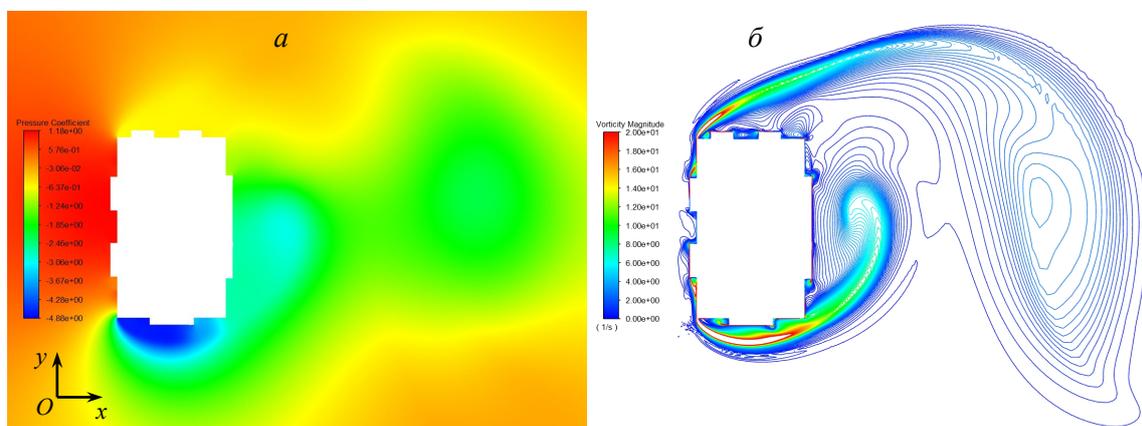


Рис. 4. Картина течения около профиля при минимальном c_p : *a* – поле коэффициента давления, *б* – завихренность потока (иллюстрация автора)
 Fig. 4. Flow pattern near a profile at minimal c_p : *a* – pressure coefficient field, *b* – flow vorticity (illustration by the author)

В дополнение к интегральным характеристикам рис. 2 для контроля правильности численных расчетов на рис. 5 приведено распределение среднего коэффициента давления c_p для квадрата $b/d = 1.0$, полученное численным путем. Как видно из рис. 5, кривая c_p находится в диапазоне осредненных экспериментальных зависимостей Lee [17], Bearman [18] и хорошо согласуется с численными расчетами Shimada [19]. Осредненное значение пикового коэффициента давления у кромки квадрата совпала с численными расчетами Wang [14].

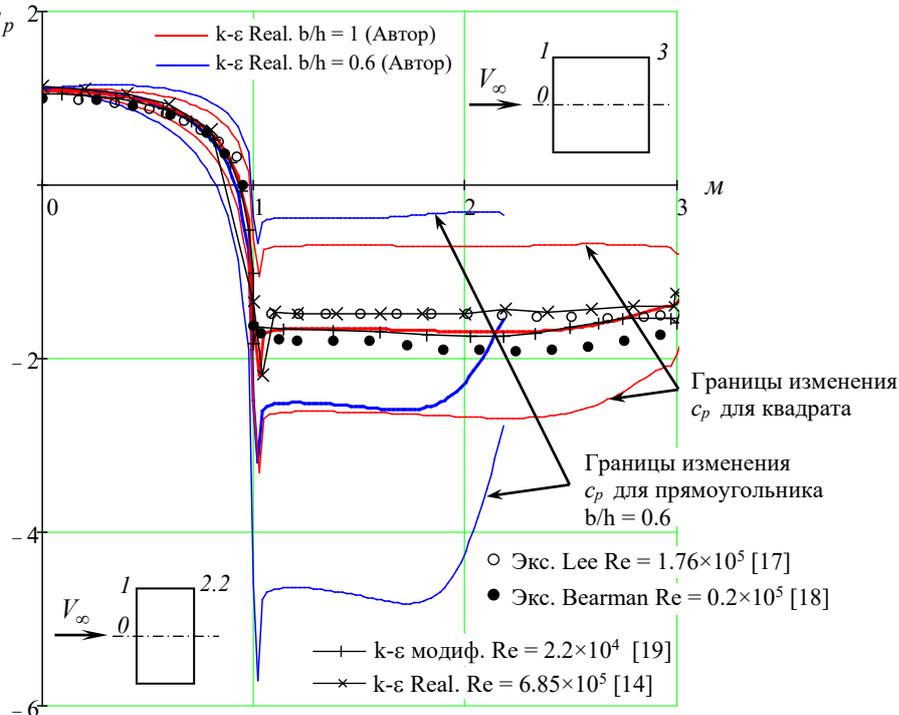


Рис. 5. Распределение коэффициента давления c_p по наветренной и боковой поверхности квадратной и прямоугольной призмы (иллюстрация автора)
 Fig. 5. Distribution pressure coefficient c_p around square and rectangular prisms (illustration by the author)

Рассчитаем ветровую нагрузку на облицовку вентфасада на высоте 30 м для жилого 19 этажного дома расположенного в г. Казань (ул. разведчика Ахмерова, д. 9). Соотношение размеров профиля этого многоэтажного здания без учета балконов равнялся $b/d = 0.556$. Согласно СП 20.13330.2016 для расчета элементов ограждения и узлов их крепления необходимо учитывать пиковые положительные w_+ и отрицательные w_- воздействия ветровой нагрузки, нормативные значения которых определяются по формуле:

$$w_{+(-)} = w_0 \cdot k(z_e) \cdot [1 + \zeta(z_e)] \cdot c_{p+(-)} \cdot v_{+(-)},$$

где w_0 – нормативное значение давления ветра, зависит от принадлежности объекта к ветровому району (для Казани (II район) $w_0 = 0.3$ кПа = 30 кгс/м²);

z_e – эквивалентная высота (согласно п. 11.1.5 СП для зданий $d < h < 2d$ или $34.7 < 60 < 69.4$ следует принимать $z_e = h$, где d – поперечный размер здания, h – высота здания, тогда в нашем случае $z_e = 60$ м – высота 19 этажного здания);

$k(z_e)$ и $\zeta(z_e)$ – коэффициенты, учитывающие, соответственно, изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e (согласно п. 11.1.6 и 11.1.6 СП и учитывая тип местности В – городские территории, лесные массивы и другие местности, равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м, $k(60) = 1.3$, $\zeta(60) = 0.74$);

$c_{p+(-)}$ – пиковые значения аэродинамических коэффициентов положительного давления (+) или отсоса (–), (по приложению В.1.17 пиковые значения отрицательного аэродинамического коэффициента давления в угловой зоне $c_{p(-)} = 2.2$);

$v_{+(-)}$ – коэффициент корреляции ветровой нагрузки, соответствующие положительному давлению (+) и отсосу (–) в зависимости от площади ограждения A , с которой собирается ветровая нагрузка (для нашего дома площадь ограждения фасадной панели не более 2 м², то коэффициент корреляции $v_{+(-)} = 1.0$).

Окончательно получаем ветровой отсос у торца здания на высоте 30 м:

$$w_- = 30 \cdot 1.3 \cdot [1 + 0.74] \cdot 2.2 \cdot 1 = 149.3 \text{ кгс/м}^2.$$

В последнем выражений коэффициент пикового давления с учетом пульсации составит

$$c_{p(-)} = [1 + 0.74] \cdot 2.2 = 3.828.$$

Для прямоугольника $b/d = 0.6$ согласно численным расчетам на кромке пиковый отсос равен $c_{p(-)} = 5.7$, что превышает нормативное значение $c_{p(-)} = 3.828$ на 49%. В численных расчетах (рис. 5) для квадрата $b/d = 1.0$ максимальный коэффициент отрицательного давления равен 3.3, что меньше нормативного значения 3.828.

Если использовать гибридную методику расчета [6, 12], вместо пикового отрицательного коэффициента давления по СП $c_{p(-)} = 2.2$ взять среднее пиковое значение $c_p = -2.93$, полученное численным расчетами на ANSYS Fluent для конкретного профиля здания с $b/d \approx 0.6$, имеем следующую пиковую отрицательную ветровую нагрузку (отсос)

$$w_- = 30 \cdot 1.3 \cdot [1 + 0.74] \cdot 2.93 \cdot 1 = 198.8 \text{ кгс/м}^2,$$

В последнем выражении коэффициент пикового давления с учетом пульсации из СП

$$c_{p(-)} = [1 + 0.74] \cdot 2.93 = 5.089,$$

что примерно на 33 % превышает нормативный коэффициент $c_{p(-)} = 3.828$. Гибридный коэффициент с учетом пульсации $c_{p(-)} = 5.089$ меньше численного значения на кромке для профиля здания $c_p = -5.21$, поскольку пульсационная составляющая для профиля здания равна 0.778, что достаточно близка к значению $\zeta(60) = 0.74$ согласно СП.

Можно предположить, что коэффициент пикового отрицательного давления $c_{p(-)} = 2.2$ в СП был принят для призмы квадратного сечения. Поскольку согласно (рис. 5) распределению среднего коэффициента давления c_p полученного численным путем для квадрата, у кромки максимальное отрицательное давление достигает $c_p = -2.18$.

Таким образом, можно заключить, что численные расчеты прямоугольника с соотношением сторон $b/d = 0.6$ и реального профиля здания с соотношением сторон близким к $b/d \approx 0.6$ имеют максимальный отрицательный коэффициент давления (ветровой отсос) на кромках достигающий соответственно $c_p = -5.7$ и -5.21 . Такое экстремальное разрежение на одной из сторон кромок и максимальные коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы вызвано формой прямоугольника и

положением вихрей. Из-за определенной длины хвостовой части (глубины здания) один из развивающихся вихрей оказывается максимально близким к подветренной стороне обтекаемого прямоугольника [19,20], что приводит к максимальным нагрузкам на профиль.

По результатам расчетов пикового ветрового давления по СП на примере реального профиля здания можно установить, что не учитываются соотношение сторон профиля. Значение пикового коэффициента давления $c_{p(+)}$ (по приложению В.1.17 в угловой зоне $c_{p(-)} = 2.2$) принимается одинаковым для всех профилей прямоугольной формы. Сравнивая численное осредненное пиковое давление $c_p = -2.18$ для квадрата $b/d = 1.0$ с пиковым значением отрицательного аэродинамического коэффициента давления в угловой зоне $c_{p(-)} = 2.2$ взятым из СП, можно предположить, что это осредненный пиковый коэффициент давления для квадратной призмы.

4. Заключение

В данной работе проведены расчеты по определению пиковой отрицательной ветровой нагрузки на высоте 30 м на примере конкретного многоэтажного жилого здания. Расчеты проведены по методике СП 20.13330.2016 и гибридным методом, где коэффициент давления c_p на угловых участках определялся численным путем – решением задачи двумерного обтекания профиля здания с привлечением программы ANSYS Fluent.

По результатам проведенных вычислений можно сделать следующие выводы:

1. у прямоугольника с соотношением сторон $b/d = 0.6$ на угловых его участках пиковый коэффициент отрицательного давления может достигать $c_p = -5.7$ (среднее пиковое значение $c_p = -3.18$, что отличается от нормативного коэффициента $c_{p(-)} = 2.2$ из СП на 44%).

2. для реального профиля здания с соотношением сторон близким $b/d \approx 0.6$ на кромках пиковый коэффициент давления достигает $c_p = -5.21$ (среднее пиковое значение $c_p = -2.93$, что отличается от нормативного коэффициента $c_{p(-)} = 2.2$ из СП на 33%).

3. прямоугольный профиль здания $b/d \approx 0.6$ имеет максимальные коэффициенты лобового сопротивления и подъемной силы.

4. для прямоугольных в плане зданий с соотношением сторон близким к $b/d = 0.6$ пиковое значение аэродинамического коэффициента определять либо экспериментально, либо численно или гибридным способом.

5. необходимо провести численные расчеты обтекания здания ветровым потоком в трехмерной постановке и сравнить с нормативной пиковой ветровой нагрузкой.

Учет полученных результатов при проектировании навесных фасадов для зданий прямоугольной формы в плане с соотношением сторон 0.6 позволит подобрать более надежные узлы крепления панелей фасада к профилям фасадной системы. Что в свою очередь предотвратит возможный срыв панелей с кромок высотных зданий, особенно на верхних этажах при сильных ветрах.

Список литературы/References

1. Ли С.В., Гамаюнова О.С. Фасадные системы в высотном строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 4(4). С. 3–14.
Li S.V., Gamayunova O.S. Facade systems in high-rise construction // Engineering studies. 2021, No. 4(4), P. 3–14
2. Галямичев А.В. Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. №9 (60). С. 44–57.
Galyamichev A.V. Wind load and its effect on façade structures // Construction of Unique Buildings and Structures. 2017, No. 9(60), P. 44–57.
3. Галямичев А.В. Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции и её влияние на результаты их статического расчета // Интернет-журнал «Науковедение». Т. 7. №2. 2015. DOI: 10.15862/54TVN215.
Galyamichev A.V. The specifics of determining loads on enclosing structures and their impact on the results of their static calculation // Internet journal “Science Studies”. 2015, No. 7(2). DOI: 10.15862/54TVN215.

4. 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 wind load on the facade of a multi-story building with a rectangular outline in plan // Science and business: development ways. 2022, No. 12(138), P. 12 – 16.
5. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В., Леденев П.В. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции // Жилищное строительство. №1. 2010. С. 7–11.
Gagarin V.G., Guvernyuk S.V., Ledenev P.V. Aerodynamic characteristics of buildings for calculating wind impact on enclosing structures // Housing construction. No. 1. 2010. P. 7–11.
6. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на высотное здание // АВОК. 2006. №8. С. 18–24.
Guvernyuk S.V., Gagarin V.G. Computer modeling of aerodynamic effects on a high-rise building // AVOK. 2006, No. 8, P. 18–24.
7. Сатанов А.А., Поздеев М.Л., Симонов А.В., Помазов А.П., Хазов П.А. Экспериментальное исследование распределения аэродинамических коэффициентов на высотное здание // Приволжский научный журнал. 2022. №3. С. 43–51.
Satanov A.A., Pozdeev M.L., Simonov A.V., Pomazov A.P., Khazov P.A. Experimental Study of the Distribution of Aerodynamic Coefficients on a High-Rise Building // Volga Region Scientific Journal. 2022, No. 3. P. 43–51.
8. 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. Т. 18. № 5. С. 27–40
Valger S.A., Fedorov A.V., Fedorova N.N. Modeling of Incompressible Turbulent Flows in the Vicinity of Poorly Streamlined Bodies Using the ANSYS Fluent PC // Computational Technologies. 2013, Vol. 18, No. 5. P. 27–40.
9. Саиян С.Г., Маркова С.А. Расчетные исследования мер снижения ветровых воздействий на высотные здания и сооружения // Системные технологии. № 4 (53). 2024. С. 122–134. DOI: 10.48612/dnitii/2024_53_122-134.
Saiyan S.G., Markova S.A. Computational studies of measures to reduce wind impacts on high-rise buildings and structures // System Technologies. 2024, No. 4(53), P. 122–134. DOI: 10.48612/dnitii/2024_53_122-134.
10. Иванова Ю.В., Куц Е.В., Кадокова С.Ю. Моделирование ветрового воздействия на здание общественного назначения // Инженерный вестник Дона. 2022. №12(96). С. 602–612
Ivanova Yu.V., Kuts E.V., Kadokova S.Yu. Modeling of Wind Impact on a Public Building // Engineering Bulletin of the Don. 2022, No. 12(96), P. 602–612.
11. Гагарин В.Г., Гувернюк С.В. О достоверности компьютерных прогнозов при определении ветровых воздействий на здания и комплексы // Жилищное строительство. №7. 2014. С. 3–8.
Gagarin V.G., Guvernyuk S.V. On the Reliability of Computer Forecasts in Determining Wind Effects on Buildings and Complexes // Housing Construction. 2014, No. 7, P. 3–8.
12. Гувернюк С.В., Гагарин В.Г. Компьютерное моделирование аэродинамических воздействий на элементы ограждений высотных зданий // АВОК. 2007. №1. С. 16–22.
Guvernyuk S.V., Gagarin V.G. Computer modeling of aerodynamic effects on the elements of high-rise building enclosures // AVOK. 2007. No. 1, P. 16–22.
13. Деев Равад, Колотвин А. В., Сиденков Д. В. Оценка моделей турбулентности для моделирования теплообмена и гидродинамики труб каплевидной формы // Вестник Международной академии холода. 2022. № 2. С. 61–69. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-61-69.

- Deeb Rawad, Kolotvin A. V., Sidenkov D. V. Evaluation of turbulence models for flow and heat transfer of drop-shaped tubes // Journal of International Academy of Refrigeration. 2022. No 2. P. 61–69. DOI: 10.17586/1606-4313-2022-21-2-61-69.
14. 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. P. 1-13. DOI:10.1155/2020/2163928.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Shimada K., Ishihara T. Application of a modified k- ϵ 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.
20. Кареева Ю.Р., Чухлова М.Б., Зиганшин А.М. Течение в узле «решетка-колени» систем вытяжной вентиляции // Известия КГАСУ, 2025, № 2 (72), с. 55-64. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.5, EDN: CJZREC.
Kareeva Yu.R., Chukhlova M.B., Ziganshin A.M. Flow in the “grille-elbow” unit of the exhaust ventilation systems // News of KSUAE, 2025, P. 55-64, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.5, EDN: CJZREC.

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.

Дата поступления: 15.10.2025

Дата принятия: 25.12.2025