

Расчет пиковой ветровой нагрузки у кромок прямоугольных в плане зданий

А.В. Гумеров

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Аннотация: Расчет ветровых воздействий на навесные фасады и элементы их крепления для высотных зданий и сооружений по инженерной методике и различными численными методами остается актуальной задачей и по настоящее время. Особый интерес представляют угловые участки здания, где возникает наибольшее отрицательное ветровое давление. Неправильный расчет ветрового отсоса может привести к отрыву панелей при сильном ветре. В статье проводится расчет пиковой ветровой нагрузки численным способом для прямоугольного в плане здания с соотношением сторон 0.6. В ходе численных расчетов двумерного обтекания профиля здания в программе ANSYS Fluent с использованием модели турбулентности k-ε Realizable были получены коэффициенты лобового сопротивления, поперечной силы и распределение коэффициента давления при максимальной поперечной силе. Расчеты показали, что ветровой отсос на кромке исследуемого здания превышает нормативное значение примерно на 30 %. Учет полученных в статье результатов при проектировании фасадных систем, для зданий прямоугольного в плане сечения с соотношением сторон 0.6, позволит выбрать более надежные элементы крепления.

Ключевые слова: пиковая ветровая нагрузка, ветровой отсос, прямоугольные в плане здания, пиковый отрицательный аэродинамический коэффициент давления.

При строительстве современных зданий широко применяются навесные фасады [1]. Фасады играют роль отделки и утепления зданий и сооружений различного назначения. Для крепления элементов облицовки фасадов используют вертикальные направляющие несущие ветровую нагрузку, нагрузку от собственного веса облицовки и гололёдную нагрузку. Вертикальные направляющие закрепляются кронштейнами на торцы межэтажных плит перекрытия [2, 3].

Расчет ветровых нагрузок для элементов ограждения и узлов их крепления ведутся в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции приведены в статьях [4, 5]. На угловых участках прямоугольных в плане зданий рекомендуется пиковое значение аэродинамического коэффициента отрицательного давления принимать $C_p (-)$

= – 2.2. В настоящей статье показывается, что пиковое отрицательное давление по величине может превосходить нормативное значение. Это происходит для зданий прямоугольного сечения с определенным соотношением сторон, а именно когда отношение глубины здания к поперечному размеру равно 0.6. При таких соотношениях сторон прямоугольника его аэродинамические характеристики достигают максимальных значений. Анализ ветрового воздействия на здания различных форм обсуждается в статьях [6,7].

Целью настоящего исследования является численный расчет в двумерной постановке максимальной отрицательной ветровой нагрузки на угловые участки прямоугольного в плане здания. Для этого были проведены расчеты обтекания горизонтального сечения многоэтажного жилого дома с соотношением сторон близким к 0.6. Также проведены расчеты ветровой нагрузки по инженерной методике согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Обнаружено, что ветровая нагрузка, полученная численным путем, примерно на 30 % превышает нормативное значение.

В настоящей работе движение турбулентной несжимаемой среды в двумерной постановке описывается известными уравнениями Рейнольдса:

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

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \overline{\rho u'_i u'_j}}{\partial x_j}. \quad (2)$$

В вышеприведенных уравнениях (1) и (2) напряжения $\overline{u'_i u'_j}$ моделируются по гипотезе Буссинеска:

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

где μ_t – динамический коэффициент турбулентной вязкости, $k = 0.5\overline{u'_i u'_i}$ – кинетическая энергия турбулентных пульсаций. Для замыкания осредненных уравнений (1) и (2) в данной работе применяется модель турбулентности k - ε Realizable состоящая из двух уравнений [8]:

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

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

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

Для моделирования обтекания горизонтального среза дома была построена расчетная область прямоугольной формы с числом ячеек 189.926. Внешние границы были расположены на удалении от наветренной стороны контура здания на $10.5d$, от боковых сторон на $11d$ и граница на выходе от подветренной стороны составляла $28d$ (d – поперечный размер сечения). На рис. 1 показаны фрагменты расчетной сетки около всего контура и вблизи

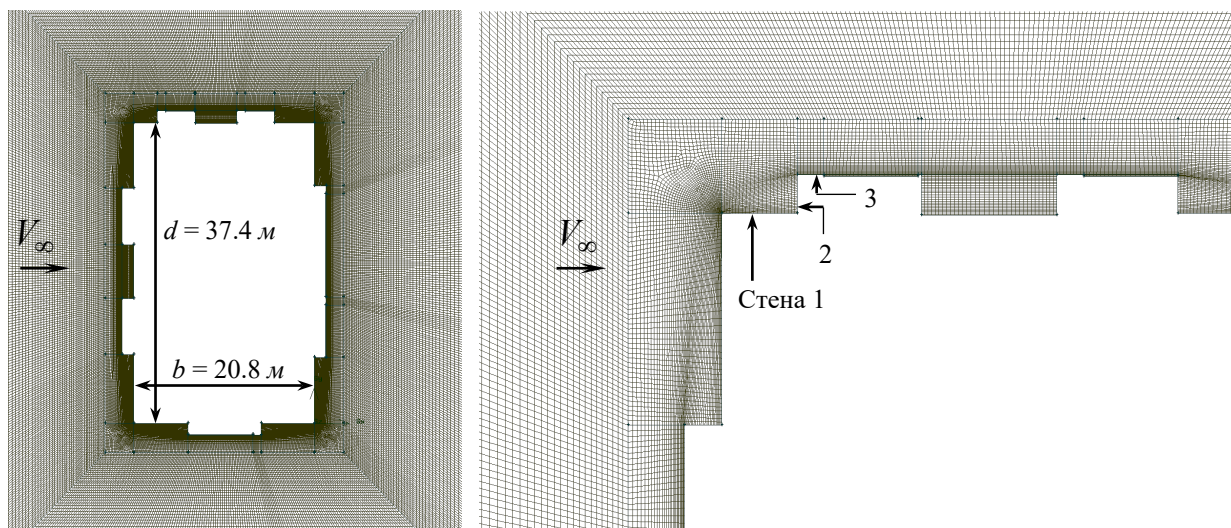


Рис. 1. – Фрагменты расчетной сетки для профиля здания поверхности верхнего левого угла профиля здания (стены 1, 2 и 3), где как предполагается, будет максимальные ветровой отсос. Для лучшей

сходимости расчетная область состояла из структурированных боков со сгущением к поверхности профиля.

Решение задачи проводилось в программе ANSYS Fluent при скорости набегающего потока $V_\infty = 20$ м/с, с турбулентной интенсивностью $I = 2$ % и масштабе турбулентности равном d . Все настройки в решателе были приняты как в работе [8].

На рис. 2 показаны изменения аэродинамических коэффициентов лобового сопротивления c_x и поперечной силы c_y для горизонтального сечения здания по времени при числе Рейнольдса $Re = V_\infty \cdot d / \nu = 5 \times 10^7$ (рис. 2).

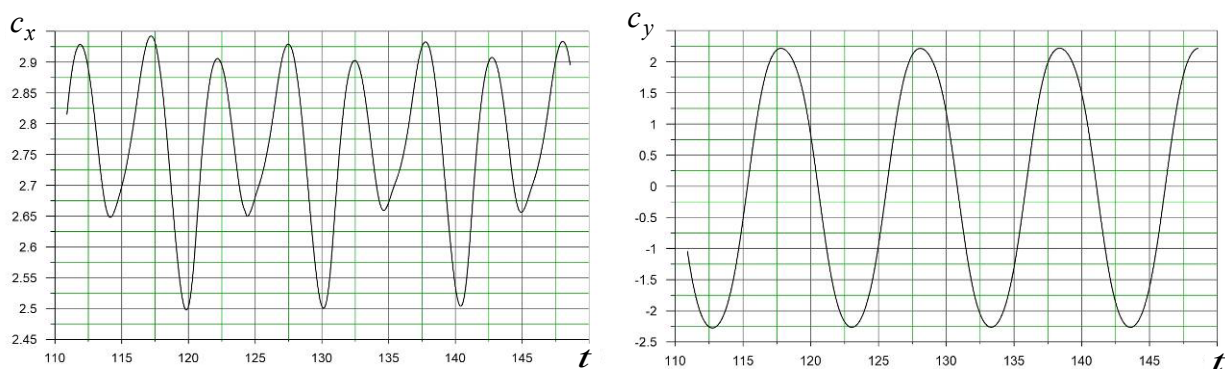


Рис. 2. Зависимость коэффициентов лобового сопротивления c_x и поперечной силы c_y от t

Периодическое изменение коэффициентов c_x и c_y достигалось после достаточно продолжительного времени расчетов. Начиная с времени $t = 110$ с программа моделировала устойчивый колебательный режим течения. Среднее значение коэффициента лобового сопротивления получается $c_x \approx 2.71$ (рис. 2), что очень хорошо согласуется с экспериментальными данными Sakamoto $c_x \approx 2.75$ для прямоугольного цилиндра $b/d = 0.6$ при числах Рейнольдса 5.5×10^4 [9]. Коэффициент поперечной силы имеет колебательный характер (рис. 2), амплитуда которой достигает $c_y = 2.25$, не превышающим экспериментального значения Sakamoto [9] $c_y = 2.4$. Из полученных зависимостей (рис. 2) можно определить безразмерную частоту отрывов

вихрей – число Струхала $Sh = n \cdot d / V_\infty$, где n – частота срыва вихрей или число колебаний c_y за промежуток времени t . Таким образом, $Sh = n \cdot d / V_\infty = (3 / (143.6 - 112.5)) \cdot 34.7 / 20 = 0.167$, что примерно на 20 % больше экспериментального значения [9]. Можно предположить, что на частоту срывов вихрей влияют балконы, расположенные по торцам здания.

Максимальное разряжение образуется на передних кромках профиля при максимальных поперечных силах. Положения вихрей и картина поля коэффициента давления около профиля показаны на рис. 3 при максимальном c_y .

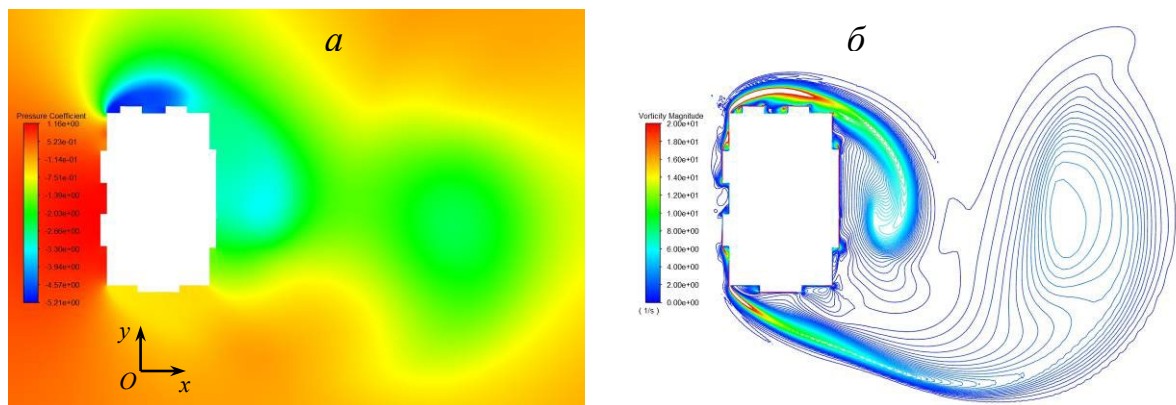


Рис. 3. Картина течения около профиля при максимальном c_y : *а* – поле коэффициента давления, *б* – завихренность потока

На рис. 4 приведено распределения отрицательного коэффициента давления на стенках за угловым участком профиля здания соответствующей максимальной поперечной силе. Примерно такая же картина течения наблюдается с противоположной стороны профиля при минимальном коэффициенте поперечной силы $c_y = -2.25$.

Следует отметить, согласно многочисленным экспериментальным данным обтекания прямоугольников с соотношением сторон от 0.1 до 2.0 [9, 10], именно у прямоугольного цилиндра с соотношением сторон $b/d = 0.6$ на подветренной стороне возникают мощные вихри и как следствие приводящие к максимальной поперечной силе и максимальной осредненной силе

лобового сопротивления. Используемая в расчетах модель турбулентности $k-\varepsilon$ Realizable достаточно точно прогнозирует аэродинамические характеристики прямоугольников во всем этом диапазоне [8,11].

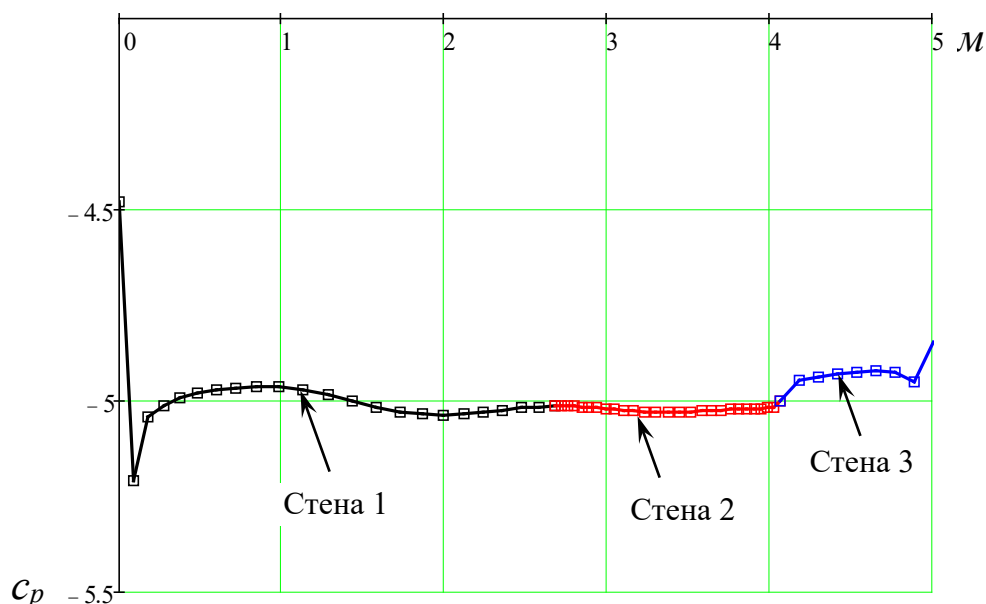


Рис. 4. Распределение коэффициента давления c_p на угловом участке здания при максимальной поперечной силе

Пиковая ветровая нагрузка определяется согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» по формуле

$$w_{+(-)} = w_0 \cdot k(z_e) \cdot [1 + \zeta(z_e)] \cdot c_{p+(-)} \cdot v_{+(-)}, \quad (5)$$

где w_0 – нормативное значение давления ветра, зависит от ветрового района, для Казани (II район) $w_0 = 0.3 \text{ кПа} = 30 \text{ кгс/м}^2$;

z_e – эквивалентная высота, в нашем случае $z_e = 60 \text{ м}$;

$k(z_e)$ и $\zeta(z_e)$ – коэффициенты, учитывающие изменение давления и пульсаций давления ветра на высоте z_e ($k(60) = 1.3$, $\zeta(60) = 0.74$);

$c_{p+(-)}$ – 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 (если площадь ограждения фасадной панели не более 2 м^2 , то $v_{+(-)} = 1.0$).

Тогда ветровой отсос у торца здания на высоте 30 м по формуле (5):

$$w_- = 30 \cdot 1.3 \cdot [1 + 0.74] \cdot (-2.2) \cdot 1 = -149.3 \text{ кгс/м}^2. \quad (6)$$

В последнем выражений (6) коэффициент пикового давления с учетом пульсации составит

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

В численных расчетах (рис. 4) максимальный отрицательный коэффициент давления за углом профиля у стены 1 получается приблизительно равным $c_p = -5$, что на 30 % превышает нормативное значение $c_{p(-)} = -3.828$.

Нормативное значение коэффициента пикового отрицательного давления в угловой зоне $c_{p(-)} = -2.2$ (СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия») практически совпадает с осредненным коэффициентом пикового отрицательного давления для квадрата, который получен численными расчетами в работе [12].

В настоящей работе для профиля здания с соотношением сторон $b/d \approx 0.6$ среднее значение пикового давления получается примерно равным $c_p = -2.9$, что на 32 % больше рекомендуемого нормативного значения $c_{p(-)} = -2.2$.

По результатам проведенных численных расчетов коэффициента давления на кромке прямоугольного профиля здания с соотношением сторон близким к $b/d = 0.6$ на угловых его участках может возникнуть ветровой отсос, превышающий нормативное значение на 30%.

Привлечение полученных в статье результатов, при расчетах элементов крепления навесных фасадных систем, для высотных зданий прямоугольной формы в плане с соотношением сторон 0.6, предотвратит возможный срыв панелей с кромок высотных зданий при сильных ветрах.

Литература

1. Ли С.В., Гамаюнова О.С. Фасадные системы в высотном строительстве // Инженерные исследования. 2021. № 4(4). URL: eng-res.ru/archive/2021/4/3-14.pdf.
2. Шмелев Г.Н., Файзуллина З.З. Соединение облицовки с направляющими вентилируемой фасадной системы с применением обшивки // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 4(9). URL: structures-kgasu.ru/files/N9-3.-SHmelev_v-nomer.pdf.
3. Шмелев Г.Н., Файзуллина З.З. Соединение облицовки с направляющими вентилируемой фасадной системы // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 3(8). URL: structures-kgasu.ru/files/N8-Soedinenie_oblicovki_s_napravlyayuschimi_ventiliruemyy_fasadnoy_sistemy-_3__v-nomer.pdf.
4. Галямичев А.В. Специфика определения нагрузок на ограждающие конструкции и её влияние на результаты их статического расчета // Интернет-журнал «Науковедение», 2015, Том 7, №2. URL: naukovedenie.ru/PDF/54TVN215.pdf. DOI: 10.15862/54TVN215.
5. Галямичев А.В. Ветровая нагрузка и её действие на фасадные конструкции // Строительство уникальных зданий и сооружений, 2017, №9 (60). С. 44–57.
6. Ким Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения // Инженерный вестник Дона, 2020, №12. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n12y2020/6699.
7. Ким Д.А., Зueva М.К. Анализ ветрового на здания различных форм // Инженерный вестник Дона, 2022, №10. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n10y2022/7946.
8. Гумеров А.В. Модель турбулентности k-ε Realizable в расчетах аэродинамических сил прямоугольных цилиндров с различным

соотношением сторон // Инженерный вестник Дона, 2024, №11. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2024/9612.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

References

1. Li S.V., Gamayunova O.S. Inzhenernye issledovaniya, 2021, № 4(4). URL: eng-res.ru/archive/2021/4/3-14.pdf.

2. Shmelev G.N., Faizullina Z.Z. Stroitel'ny'e konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya, 2024, № 4(9). URL: structures-kgasu.ru/files/N9-3.-SHmelev_v-nomer.pdf.

3. Shmelev G.N., Faizullina Z.Z. Stroitel'ny'e konstrukcii, zdaniya i sooruzheniya, 2024, № 3(8). URL: structures-kgasu.ru/files/N8-Soedinenie_oblicovki_s_napravlyayuschimi_ventiliruemoy_fasadnoy_sistemy-_3__v-nomer.pdf.

4. Galyamichev A.V. Internet-zhurnal «Naukovedenie», 2015, № 7(2). URL: naukovedenie.ru/PDF/54TVN215.pdf. DOI: 10.15862/54TVN215.

5. Galyamichev A.V. Wind load and its action on facade structures. Construction of Unique Buildings and Structures, 2017, № 9(60), pp. 44–57.



6. Kim D.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №12. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n12y2020/6699.
7. Kim D.A., Zueva M.K. Inzhenernyj vestnik Dona, 2022, №10. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n10y2022/7946.
8. Gumerov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2024, №11. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n11y2024/9612.
9. Sakamoto H., Haniu H., Kobayashi, Y. Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. B. 1989, Vol. 55, pp. 2310-2317. DOI: 10.1299/kikaib.55.2310.
10. Bearman P., Trueman D. The Aeronautical Quarterly, 1972, Vol. 23, pp. 229-237. DOI: 10.1017/S0001925900006119.
11. Wang S., Cheng W., Du R., Wang Y. Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2020, pp. 1-13. DOI: 10.1155/2020/2163928.
12. Gumerov A.V. Izvestiya KGASU, 2024, № 3(69), pp. 77-97, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/69.8.

Дата поступления: 17.10.2025

Дата публикации: 26.11.2025