

УДК 69.07

УТОЧНЕНИЕ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДАНИЯ АРОЧНОГО ТИПА С ПОМОЩЬЮ CFD АНАЛИЗА

С.Ф. Дьяков, А.М. Васильева

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В данной статье рассматривается вопрос уточнения ветрового воздействия с помощью численного моделирования ветрового потока в программном комплексе «Ansys CFX». В настоящее время проектировщики стараются всесторонне рассматривать воздействие на здание. Современные программные комплексы способствуют этому, например, с их помощью можно уточнять действующие на конструкции нагрузки для конкретного здания, что способствует определению наиболее опасных участков здания или наоборот ненагруженных зон и позволяет более грамотно оптимизировать сечения конструкций. В работе исследуется ветровое воздействие на здание арочного типа. В рамках исследования было уточнено ветровое давление, действующее на арочное здание, и проведено сравнение уточненных с помощью CFD анализа значений ветровой нагрузки и значений, определенных согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». В результате работы было определено ветровое воздействие на здание двумя способами, а также определены наиболее опасные зоны воздействия и выявлены расхождения в распределении ветрового давления по покрытию арочного здания согласно CFD анализа и нормативному документу.

Ключевые слова: численное моделирование, ветровое воздействие, арочные здания, климатические нагрузки, CFD анализа, вычислительная гидрогазодинамика, Ansys CFX.

Ссылка для цитирования: Дьяков С.Ф., Васильева А.М. Уточнение ветрового воздействия на здания арочного типа с помощью CFD анализа // Инженерные исследования. 2024. №3(18). С. 12-19. EDN: EZVBQR

CLARIFICATION OF WIND EFFECTS ON ARCHED BUILDINGS USING CFD ANALYSIS

S.F. Dyakov, A.M. Vasileva

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. This article discusses the issue of clarifying the wind impact using numerical simulation of wind flow in the Ansys CFX software package. Currently, designers are trying to comprehensively consider the impact on the building. Modern software systems contribute to this, for example, they can be used to refine the loads acting on the structure for a particular building, which helps to identify the most dangerous areas of the building or, conversely, unloaded zones and allows you to more competently optimize the sections of structures. The paper examines the wind effect on an arched building. As part of the study, the wind pressure acting on the arched building was clarified and a comparison was made between the wind load values specified using CFD analysis and the values determined according to SP 20.13330.2016 "Loads and actions". As a result of the work, the wind impact on the building was determined in two ways, as well as the most dangerous impact zones were identified and discrepancies in the distribution of wind pressure over the arched building coating were revealed according to the CFD analysis and the regulatory document.

Keywords: numerical modeling, wind impact, arched buildings, climatic loads, CFD analysis, computational fluid dynamics, Ansys CFX.

For citation: Dyakov S.F., Vasileva A.M. Clarification of wind effects on arched buildings using cfd analysis // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2024. No.3(18). Pp. 12-19. EDN: EZVBQR

ВВЕДЕНИЕ

Нагрузка от ветра является основным горизонтальным воздействием на здание, поэтому точное определение этого воздействия важно. Наиболее точно определить ветровое давление на конкретное здание позволяет «обдув» здания. С развитием программных комплексов появился альтернативный физическому моделированию способ уточнения климатических нагрузок на здание – это численное моделирование. В настоящее время метод вычислительной гидрогазодинамики (CFD, от англ. Control Fluid Dynamic) широко применяется для определения аэродинамических коэффициентов, а также процессов снегопереноса [1], [2].

В работах [3–5] проводилось исследование сходимости результатов численного и физического моделирования. По результатам экспериментов снеговая и ветровая нагрузки имели одинаковый характер распределения нагрузки, а разность значений составила менее 10%, что говорит о корректности результатов численного моделирования.

Наиболее актуально проводить CFD анализ уникальных, ответственных зданий и сооружений или зданий сложной формы. Авторы работ [6–9] утверждают, что численное моделирование ветровой нагрузки позволяет определять аэродинамические коэффициенты для зданий сложных форм, схемы которых не представлены в нормативных документах. Кроме того, данный метод способствует выявлению неточности при применении схем, представленных в нормативных документах, для здания сложной формы. Так, в работе [10] было обнаружено, что для здания V-образной формы в месте, где по нормативам должно возникать только отрицательное давление, может возникать и положительное. Данный вывод был доказан в результате численного и физического экспериментов. Автор работы [11] также пишет о расхождениях значений, полученных в результате численного моделирования и значений из нормативных документов. По результатам исследования в некоторых частях здания ветровое давление, полученное в программном комплексе, значительно превышает давление, вычисленное по рекомендациям нормативов, что подтверждает необходимость уточнения ветровых нагрузок для уникальных зданий.

Цель работы – уточнить значения ветровой нагрузки, действующей на здание арочного типа, и сравнить их со значениями, определяемыми согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие задачи:

- определить ветровое давление на арочное здание путем проведения CFD анализа;
- сравнить значения ветровой нагрузки на здание арочного типа, уточненных CFD анализом и определенных по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В настоящей статье рассматривается ветровое воздействие на одноэтажное арочное здание с пролетом 20 м (рис.1). Длина здания – 30 м, стрела подъема арки – 10 м. Для расчета был принят VII ветровой район, тип местности – В.

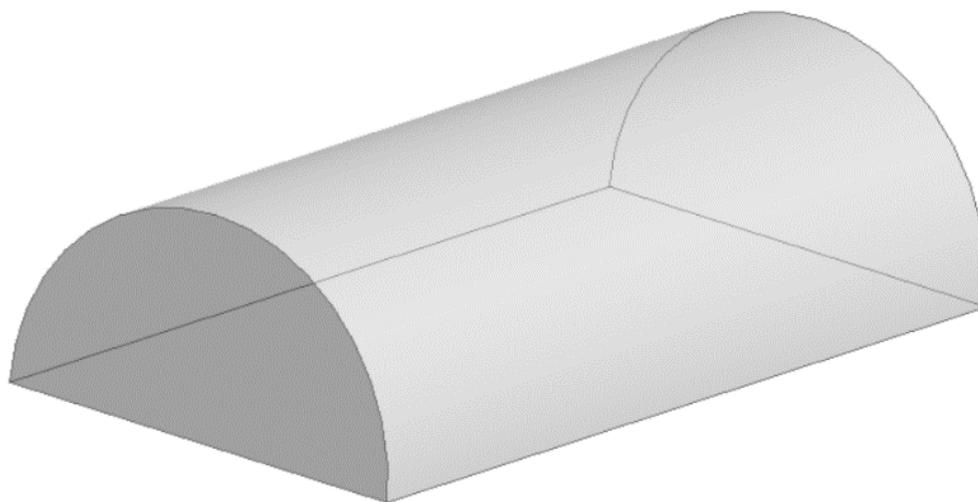


Рис. 1. Общий вид здания
Fig. 1. General view of the building

Для определения ветрового воздействия с помощью численного моделирования, в модуле Geometry Ansys CFX была создана 3D-модель здания с расчетной областью. Габариты расчетной области подобраны таким образом, чтобы ветровой поток, набегающий на здание, и вихри, которые образуются за зданием, полностью помещались в расчетную область и не выходили за ее пределы. Таким образом, в соответствии с рекомендациями для расчетной области воздуха в форме параллелепипеда были приняты следующие размеры для здания высотой H : перед зданием $6H$, по бокам $6H$, позади него $10H$ и высота $10H$. Далее в Mesh Ansys CFX расчетная область была разбита на сетку конечных элементов с размером ячеек 2 м и сгущением сетки до 0,5 м вблизи здания.

Для расчёта была выбрана SST (Shear Stress Transport) модель турбулентного потока. На границе «выхода» (OUTLET) было назначено нулевое относительное давление. На верхней и боковых границах расчетной области были заданы условия симметрии потока. Для нижней границы и всех поверхностей здания задано условие «стенки с прилипанием» (без проскальзывания), которое исключает проникновение вещества через поверхность. На границе «входа» (INLET) был задан профиль скорости ветра в соответствии с ГОСТ Р 56728 – 2015 по формуле (1) и характеристики турбулентности.

$$U(z) = U_0(z/z_0)^\alpha \quad (1)$$

где:

U_0 – начальная скорость, определяемая по формуле (2);

z – высота на уровне земли;

z_0 – линейный масштаб нормального ветра, определяемый по табл. 4 ГОСТ Р 56728 – 2015;

α – коэффициент, принимаемый по табл. 4 ГОСТ Р 56728 – 2015.

$$U_0 = (2w_0/\rho)^{0,5} \quad (2)$$

где:

w_0 – нормативное ветровое давление;

ρ – плотность воздуха.

Модель турбулентности была задана с помощью таких параметров, как интенсивность турбулентности и разрешенный масштаб вихрей по формулам (3) и (4) соответственно.

$$I_v(z) = \frac{k_i}{c_0(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \text{ для } z_{min} \leq z \leq z_{max} \quad (3)$$
$$I_v(z) = I_v(z_{min}) \text{ для } z < z_{min}$$

где:

I_v – интенсивность турбулентности;

k_i – коэффициент турбулентности. Рекомендуемое значение $k_i = 1,0$;

c_0 – орографический коэффициент, принимаемый по п. 4.3.3 ТКП EN 1991-1-4-2009 (02250);

z – высота на уровне земли;

z_0 – параметр шероховатости, принимаемый по табл. 4.1 ТКП EN 1991-1-4-2009 (02250).

$$L(z) = L_t \cdot \left(\frac{z}{z_t}\right)^\alpha \text{ при } z \geq z_{min} \quad (4)$$
$$L(z) = L(z_{min}) \text{ при } z < z_{min}$$

где:

$L(z)$ – масштаб длины турбулентности;

L_t – базовый масштаб длины, $L_t = 300$ м;

z_t – базовая высота, $z_t = 200$ м;

z_{min} – минимальная высота, принимаемая по табл. 4.1 ТКП EN 1991-1-4-2009 (02250);

α – величина, зависящая от параметра шероховатости и определяемая по формуле (5).

$$\alpha = 0,67 + 0,05\ln(z_0) \quad (5)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчета ветрового воздействия с помощью CFD анализа представлен на рис. 2 – 5.

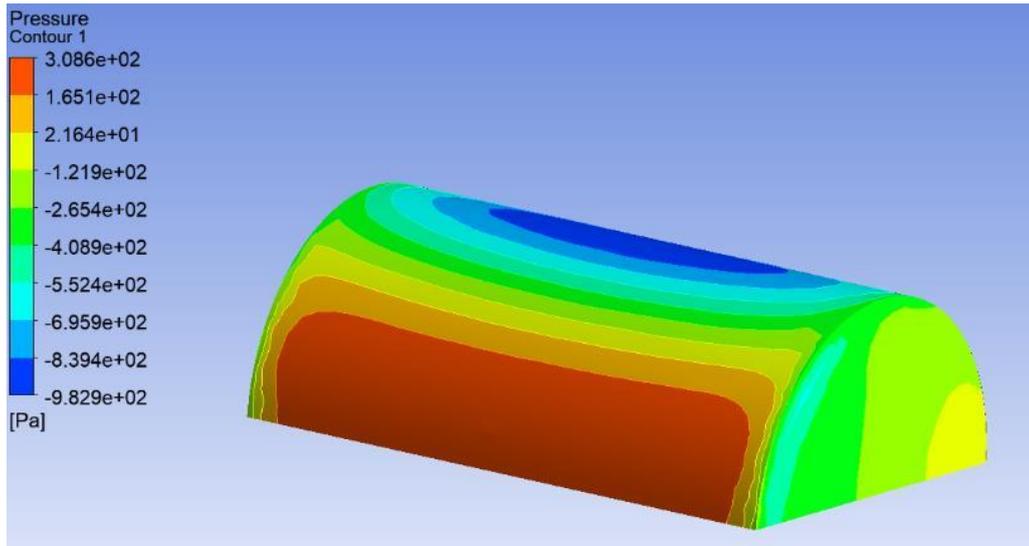


Рис. 2. Ветер перпендикулярно большей стороне. Навстренная сторона
Fig. 2. The wind is perpendicular to the larger side. Windward side

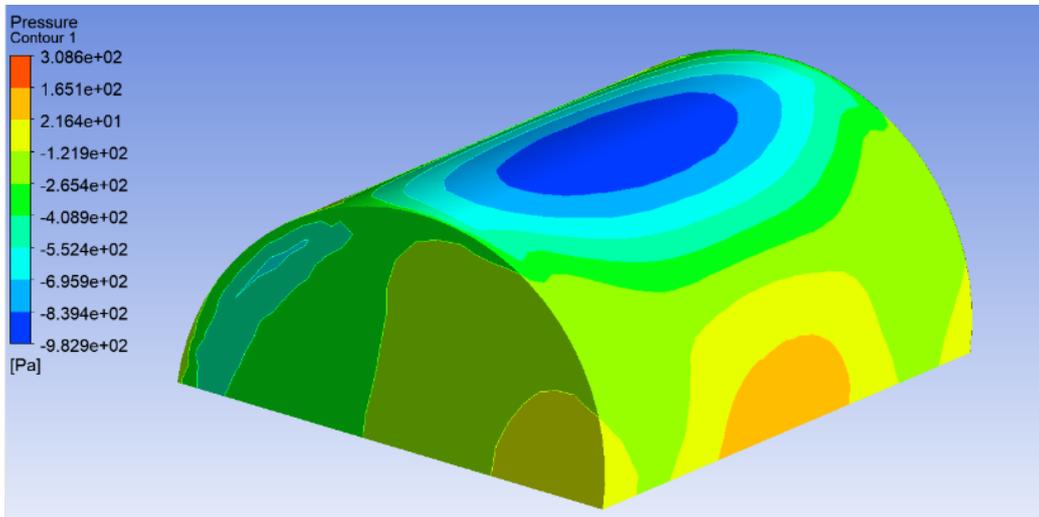


Рис. 3. Ветер перпендикулярно большей стороне. Заветренная сторона
Fig. 3. The wind is perpendicular to the larger side. The covered side

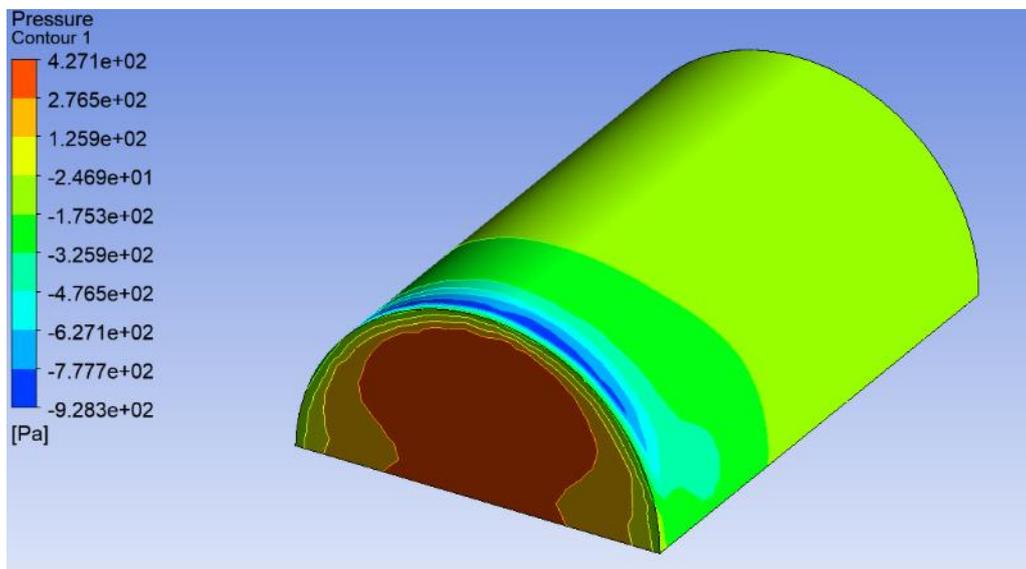


Рис. 4. Ветер перпендикулярно меньшей стороне. Навстренная сторона
Fig. 4. The wind is perpendicular to the smaller side. Windward side

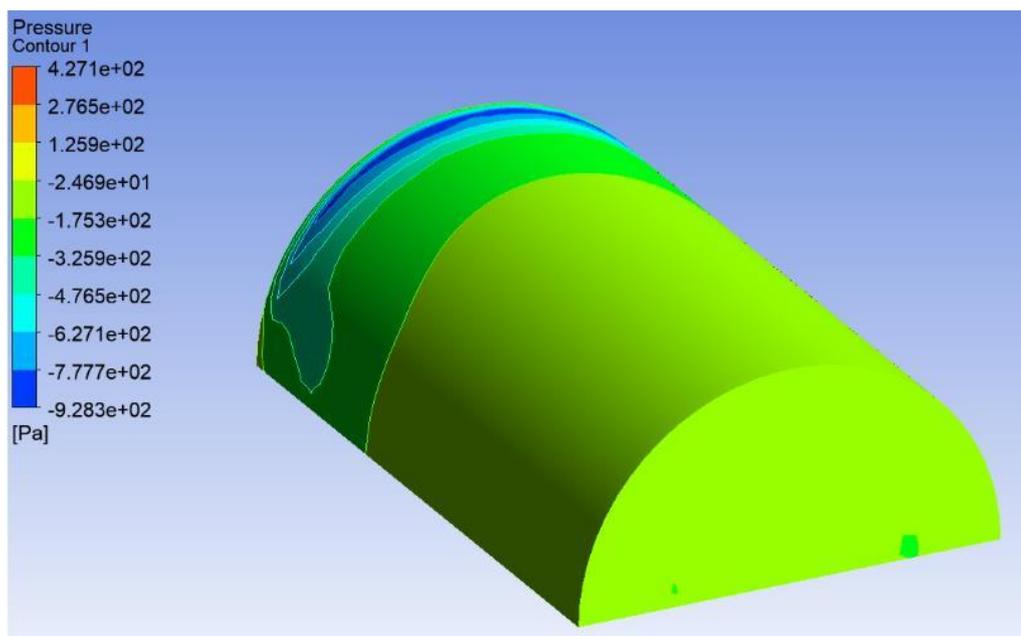


Рис. 5. Ветер перпендикулярно меньшей стороне. Заветренная сторона
Fig. 5. The wind is perpendicular to the smaller side. The covered side

Для оценки полученных результатов, вычисленное ветровое давление было сопоставлено с давлением, рекомендуемым в нормативном документе.

Нормативное значение средней составляющей ветрового воздействия согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» определяется по формуле (6).

$$w_m = w_0 k(z_e) c \quad (6)$$

где:

w_0 – нормативное значение ветрового давления;

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e ;

z_e – эквивалентная высота;

c – аэродинамический коэффициент.

Согласно СП 20.13330.2016 значения аэродинамических коэффициентов принимаются в соответствии с приложением В. Однако в своде правил отсутствуют данные об аэродинамических коэффициентах арочного покрытия, при действии ветра перпендикулярно меньшей стороне. Информацию о данных коэффициентах можно найти в приложении 4 СНиП 2.01.07-85 «Нагрузки и воздействия».

Результаты расчета средней составляющей ветровой нагрузки с указанием нормативного документа, по которому был принят аэродинамический коэффициент, сведены в табл. 1.

Таблица 1. Ветровое воздействие по нормативному документу

Table 1. Wind impact according to the regulatory document

№	w_0 , кПа	$k(z_e)$	c	w_m , кПа	Нормативный документ
Ветер перпендикулярно большей стороне					
w_{m1}	0,85	0,508	0,8	0,345	СП 20.13330.2016
w_{m2}			-1,2	-0,518	
w_{m3}			-0,4	-0,173	
w_{m4}			-1	-0,431	
w_{m5}			-0,8	-0,345	
Ветер перпендикулярно меньшей стороне					
w_{m1}	0,85	0,508	0,8	0,345	СП 20.13330.2016
w_{m2}			-0,5	-0,216	СНиП 2.01.07-85
w_{m3}			-0,7	-0,302	

Схемы действия ветрового давления на покрытие и стены арочного здания представлены на рис. 6 и на рис 7.

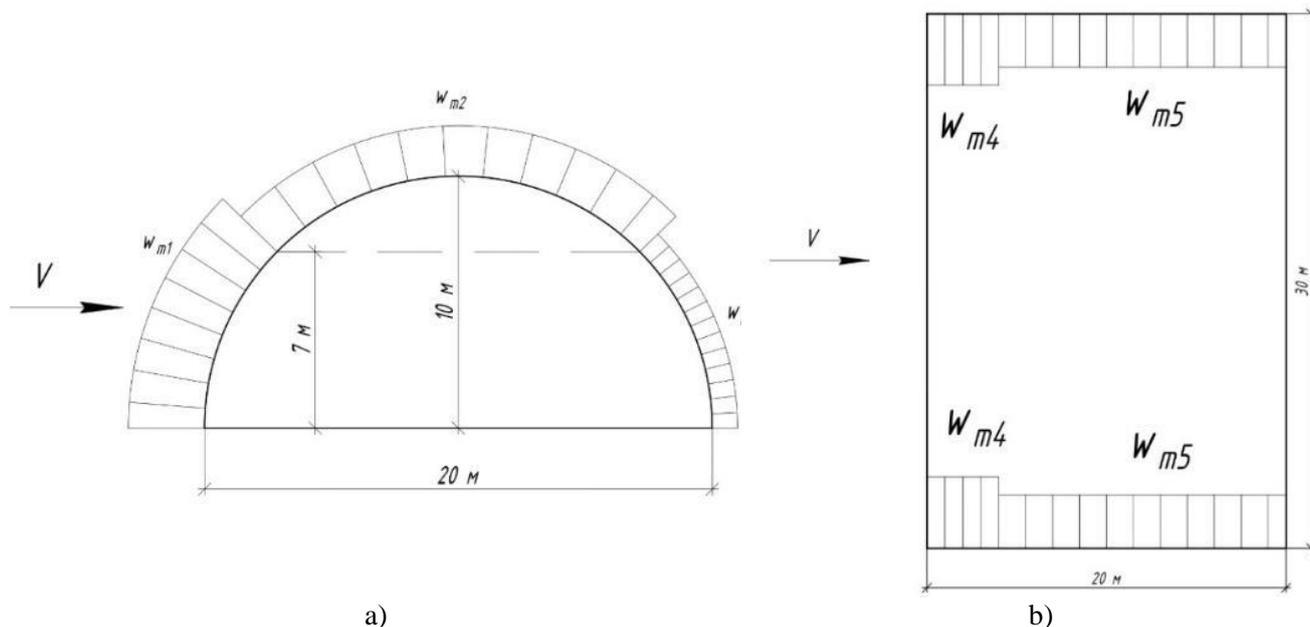


Рис. 6. Схема действия ветрового давления, действующего перпендикулярно большей стороне здания:
а – покрытие; б – стены

Fig. 6. The scheme of action of wind pressure acting perpendicular to the larger side of the building: a – coating; b – walls

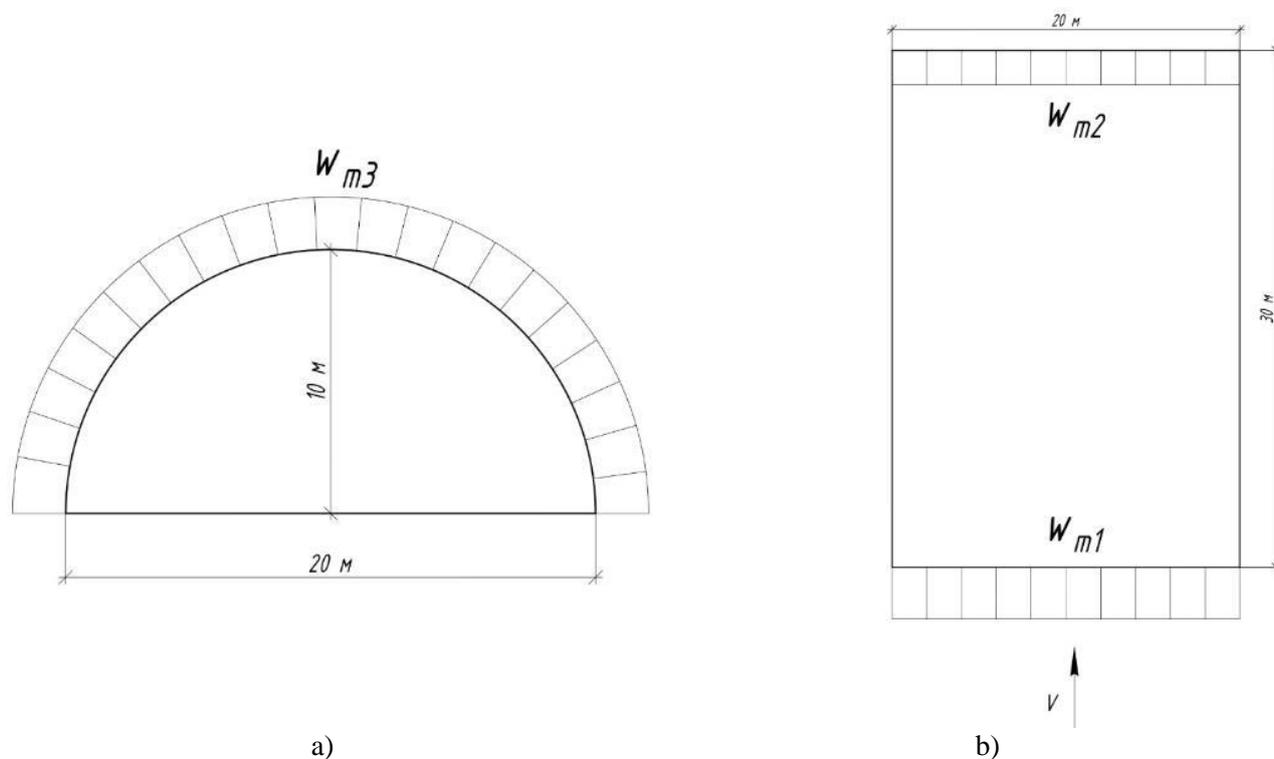


Рис. 7. Схема действия ветрового давления, действующего перпендикулярно меньшей стороне здания:
а – покрытие; б – стены

Fig. 7. The scheme of action of wind pressure acting perpendicular to the smaller side of the building: a – coating; b – walls

В табл. 2 представлено сравнение значений ветровой нагрузки, вычисленных по нормативному документу и полученных в результате CFD анализа в ПК ANSYS.

Таблица 2. Сравнение значений ветровой нагрузки по нормативному документу и ПК ANSYS
Table 2. Comparison of wind load values according to a regulatory document and ANSYS software

w_m , кПа	Нормативный документ	ANSYS	Разница, %
Ветер перпендикулярно большей стороне			
w_{m1}	0,345	0,308	10,7
w_{m2}	-0,518	-0,533	2,8
w_{m3}	-0,173	-0,194	10,8
w_{m4}	-0,431	-0,481	10,4
w_{m5}	-0,345	-0,265	23,2
Ветер перпендикулярно меньшей стороне			
w_{m1}	0,345	0,427	19,2
w_{m2}	-0,216	-0,251	13,9
w_{m3}	-0,302	-0,473	36,2

Результаты, полученные с помощью численного моделирования, в целом согласуются с данными, рассчитанными по нормативному документу. Из полученных результатов видно, что CFD анализ здания позволяет наглядно увидеть наиболее опасные зоны ветрового воздействия. Так, при воздействии ветра перпендикулярно большей стороне в зоне w_{m2} в середине покрытия действует ветровое давление 0,9 кПа, что почти в 2 раза больше среднего значения нагрузки в данной зоне.

Также стоит отметить, что ветровое давление на покрытие арочного здания при воздействии ветра перпендикулярно меньшей стороне, которое было получено в результате CFD анализа, не соответствует вычисленному по нормативному документу. Согласно СНиП 2.01.07-85 на всё покрытие действует одинаковая нагрузка от ветра, а по полученным в Ansys CFX изополям можно выделить 3 зоны ветрового воздействия. По результатам численного моделирования видно, что наибольшее ветровое давление действует вблизи наветренной стороны, далее идет зона с меньшим давлением. Наибольшая зона - зона с минимальной ветровой нагрузкой, которая почти в 10 раз меньше, чем в первой зоне.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненного CFD анализа арочного здания в ПК Ansys CFX:

1. были выявлены зоны с повышенной концентрацией ветрового давления, превышающие принятое осредненное значение для этих зон в 1,5-2 раза;
2. выявлено расхождение полученных осредненных значений и значений, вычисленных по нормативному документу при воздействии ветра перпендикулярно большей стороне и перпендикулярно меньшей;
3. получены значения ветрового давления на арочное покрытие при действии ветра перпендикулярно меньшей стороне, отсутствующие в СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сорокина А.А. Моделирование снеговых нагрузок // Инновационное развитие техники и технологий в промышленности: Сборник материалов Всероссийской научной конференции молодых исследователей с международным участием, Москва, 16 апреля 2024 года. Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Кос. С. 185–188. EDN YUJDBD.
2. Tominaga Y., Okaze T., Mochida A. Validation of prediction method of roof snow depth for an isolated gable-roof building: Prediction of unbalanced snow distribution due to wind on roofs based on CFD // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 2016. № 81(725). P. 1051–1059. DOI:10.3130/aajs.81.1051.
3. Сафиуллин И.И. Исследование ветровых воздействий на ЖК «Лазурные небеса» // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2014. № 4(30). С. 413–417. EDN TSMPPMD.
4. Анущенко А.М., Ерофеев В.И., Хазов П.А., Сатанов А.А., Февральских А.В. Исследование обтекания воздушными потоками большепролетной поверхности численным и экспериментальным методами // Приволжский научный журнал. 2021. № 1(57). С. 9–18. EDN RBOIXQ.
5. Анущенко А.М. Численное моделирование аэродинамики большепролетных зданий и сооружений // Великие реки' 2020: Труды научного конгресса 22-го Международного научно-промышленного

форума, Нижний Новгород, 27–29 мая 2020 года. Нижний Новгород: Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, 2020. С. 403–406. EDN СААГКМ.

6. Оленьков В.Д., Пузырев П.И. Численное моделирование ветрового воздействия на уникальные здания // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2014. № 4. С. 87–89. EDN TJOJPD.

7. Попов Н.А., Лебедева Д.С., Богачев И.В., Березин М.М. Воздействие ветровых и снеговых нагрузок на большепролетные покрытия // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 12. С. 71–76. EDN XISJCT.

8. Verma D.S.K., Roy A., Lather S., Sood M. CFD Simulation for Wind Load on Octagonal Tall Buildings // International Journal of Engineering Trends and Technology. 2015. Vol. 24, № 4. P. 211–216. DOI:10.14445/22315381/ijett-v24p239.

9. Shaikh W.I., Mulay D.S.B. Application of CFD simulation on various irregular-shaped buildings for determining wind forces and interference effects // International Journal of Computer Engineering in Research Trends. 2022. Vol. 9, № 6. P. 93–103. DOI:10.22362/ijcert/2022/v9/i06/v9i0601.

10. Сатанов А.А., Васин А.Д. Экспериментальное исследование распределения ветрового давления на высотное здание уникальной формы // Приволжский научный журнал. 2021. № 3(59). С. 38–46. EDN AANDEZ.

11. Дубовцев П.В., Хазов П.А., Мониц Д.В. Оценка возможности использования нормативной документации для определения ветрового давления на поверхность высотного здания путем численного моделирования // Приволжский научный журнал. 2021. № 2(58). С. 25–31. EDN WHUXOC.

ОБ АВТОРАХ

Станислав Федорович Дьяков – к.т.н., доцент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru

Арина Максимовна Васильева – студент Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: vasileva.a24@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Stanislav F. Dyakov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: dyakov_sf@spbstu.ru

Arina M. Vasileva – student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: vasileva.a24@mail.ru