



УДК 533.6:624.042.41

Е. Н. ОБЛЕТОВ, аспирант, ассистент кафедры теории сооружений и технической механики¹, инженер-проектировщик²; **Е. Д. ШАХАНОВ**, студент¹; **М. А. КАРГАПОЛЬЦЕВА**, студент¹; **С. С. ШИЛОВ**, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики¹

ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ ГЕОМЕТРИИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ И ОПТИМИЗАЦИЯ

¹ФГБОУ ВО «Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Россия, 603952, г. Н. Новгород, ул. Ильинская, д. 65. Тел.: (831) 430-54-96;

эл. почта: evg.obletov@gmail.com

²ООО «Союзстальконструкция»

Россия, 603155, г. Н. Новгород, ул. М. Горького, д. 262, оф. П250. Тел.: (831) 422-12-23;

эл. почта: soyzstal@mail.ru

Ключевые слова: параметрическое исследование, численное моделирование, ветровая нагрузка, аэродинамическое давление, изополя давлений, коэффициенты давлений.

Проводится исследование влияния геометрических изменений здания, таких как поворот (макрomodификация) и фаска/скругление углов (микромодификация), на реакцию сооружения от воздействия ветровой нагрузки. Описывается порядок создания модели здания в программе Revit 2021 с использованием параметрических семейств. Приводятся результаты исследований в виде графиков зависимостей коэффициентов геометрической адаптации от изменения формы сооружения. Предложены оптимальные параметры проектируемого высотного здания.

Уникальные архитектурные сооружения сложной геометрической формы требуют специального подхода к расчету воздействия ветровых нагрузок в процессе проектирования. Нормативные методики расчета становятся неприменимыми из-за сложности учета взаимного влияния аэродинамических потоков вблизи поверхности со сложной кривизной. Однако достоверный учет внешних нагрузок на сооружение является критическим этапом проектирования, поскольку он не только обеспечивает прочность и долговечность конструкции, но и гарантирует безопасность людей.

Вопрос оценки взаимодействия ветровых нагрузок с высотными конструкциями сложной формы требует дальнейших исследований. Получение надежной оценки состояния взаимодействия ветровых нагрузок с такими конструкциями на основе современных информационных технологий является актуальной задачей, которое на этапе окончательного проектирования дополняется модельными испытаниями в аэродинамической трубе.

В мировой и отечественной практике активно исследуется проблема распределения аэродинамического давления на разнообразные архитектурные формы, и существуют различные подходы к моделированию взаимодействия ветровых потоков с такими формами, описанные в работах исследователей из разных стран [1, 2]. В работах [3, 4] рассматриваются характеристики экспериментального оборудования, основы проведения испытаний в



аэродинамических трубах, основные программные пакеты, предназначенные для численного моделирования, а также систематизация существующих подходов к оценке ветрового воздействия на строительные конструкции с учетом современных международных требований. Авторы публикаций [5, 6] определяют основные аспекты аэродинамики зданий в условиях городской среды. В атласе [7] приведены аэродинамические коэффициенты сооружений подверженных воздействию ветра.

В данной статье применяется анализ потоков с использованием вычислительной гидродинамики (CFD) для определения ветровых нагрузок на высотное здание со сложной пространственной геометрией. Исследовано влияние геометрических изменений здания, таких как поворот (макромодификация) и фаска/скругление углов (микромодификация), на общие силы, вызванные ветровыми нагрузками.

Исходной моделью здания выбран параллелепипед высотой $H = 200,0$ м и размерами в плане $b \times h = 40,0 \times 40,0$ м. Место строительства – деловой центр г. Челябинск.

3D-модель здания разработана в программе Revit 2021 с использованием параметрических семейств. С помощью параметризации была получена возможность быстро подготовить расчетные модели и экспортировать их в расчетный комплекс RWIND.

На первом этапе были подготовлены контуры моделей здания на разных высотных отметках с шагом 25 метров. Семейство моделей с данными контурами представлено на рис. 1.

На втором этапе контуры закручиваются вокруг базисной точки; с помощью формул в параметрах типоразмера имеется возможность задавать общий угол поворота модели здания. Планы здания закручиваются на каждой отметке на соответствующий этой высоте угол. Типоразмеры семейства с используемыми параметрами представлены на рис. 2.

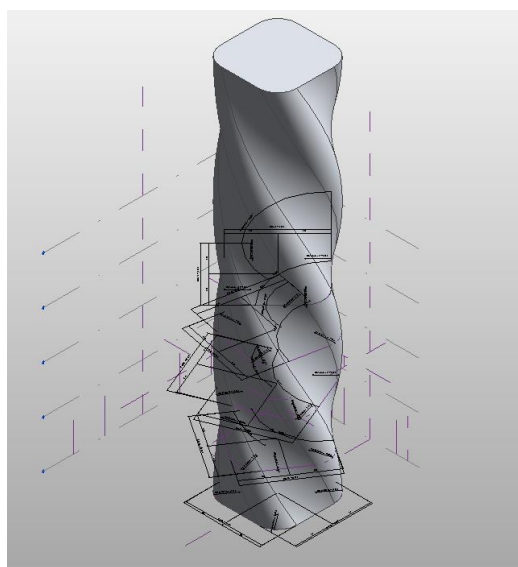


Рис. 1. Параметрическое семейство рассматриваемой модели

Параметр	Значение	Формула	Блокировать
Зависимости			
Отметка по умолчанию	0,0	=	<input type="checkbox"/>
Материалы и отделка			
Материал	Форма по умолчанию	=	<input type="checkbox"/>
Размеры			
Длина (по умолчанию)	40000,0	=	<input type="checkbox"/>
Поворот (по умолчанию)	270,00°	=	<input type="checkbox"/>
Сопражение (по умолчан	10000,0	=	<input type="checkbox"/>
Поворот_Первый (по умо	135,00°	=Поворот / 2	<input type="checkbox"/>
Поворот_1 (по умолчани	33,75°	=Поворот_Первый / 4	<input type="checkbox"/>
Поворот_2 (по умолчани	67,50°	=(Поворот_Первый / 4)	<input type="checkbox"/>
Поворот_3 (по умолчани	101,25°	=(Поворот_Первый / 4)	<input type="checkbox"/>
Поворот_4 (по умолчани	135,00°	=Поворот_Первый	<input type="checkbox"/>
Идентификация			

Рис. 2. Типоразмеры с параметрами семейства

На третьем этапе функцией «Переход» создается твердотельная геометрия. Подготовленные контуры соединяются и подгружаются в проект *Revit* для дальнейшей работы. Далее в семействе настраивается необходимый угол закручивания модели и размер фаски или радиус сопряжения углов. Подготовлены 136 моделей с различными геометрическими параметрами.

Последним этапом является процесс передачи моделей в комплекс *RWIND* в формате *IFC* и задание параметров ветровой нагрузки.

Профиль ветра определяется на основании действующих нормативных документов по формуле (1) [8]:

$$U(z) = U_o \left(\frac{z}{z_o} \right)^\alpha, U_o = \left(\frac{2w_o}{\rho} \right)^{0.5}, \quad (1)$$

где $w_o = 0,30$ кПа = 300,0 Па – нормативное значение ветрового давления для II ветрового района по табл. 11.1 [9], $\rho = 1,2$ кг/м³ – плотность воздуха при нормальных атмосферных условиях, $z_o = 60,0$, $\alpha = 0,25$ – параметры, определяемые типом шероховатости местности по табл. 4 [8] как для типа местности *C*.

В отечественных нормативных документах отсутствуют данные по характеру распределения интенсивности турбулентности и масштаба длины вихрей по высоте, поэтому следует обратиться к иностранным нормам [10]. Изменение интенсивности турбулентности с высотой можно определить по формуле 4.7 [10]:

$$I_v(z) = \frac{k_t}{c_o(z) \cdot \ln\left(\frac{z}{z_o}\right)}, \quad (2)$$

где $k_t = 1,0$ – параметр турбулентности, принимаемый по рекомендациям [10]; $c_o(z) = 1,0$ – топографический коэффициент, $z_o = 1,0$ – длина шероховатости, определяемые по табл. 4.1 [10].

Изменение масштаба длины турбулентности с высотой можно определить по формуле В.1 [10]:

$$L(z) = L_t \left(\frac{z}{z_t} \right)^\alpha, \quad (3)$$

где $z_t = 200,0$ м – контрольная высота, $L_t = 300,0$ м – контрольная длина турбулентности.

Коэффициент α определяется по следующей зависимости:

$$\alpha = 0,67 + 0,05 \ln(z_o) = 0,67 + 0,05 \ln(1,0) = 0,67. \quad (4)$$

Полученные функция профиля ветра задаются в *RWIND* (рис. 1 цв. вклейки).

Этапы исследования представлены на рис. 3.

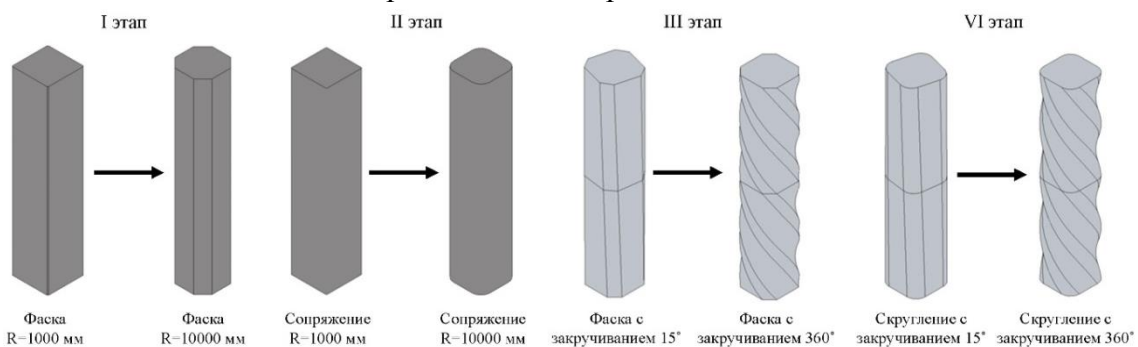


Рис. 3. Этапы исследования

**К СТАТЬЕ Е. Н. ОБЛЕТОВА, Е. Д. ШАХАНОВА,
М. А. КАРГАПОЛЬЦЕВОЙ, С. С. ШИЛОВА
«ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНОЙ
ГЕОМЕТРИИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ: АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВОЙ
НАГРУЗКИ И ОПТИМИЗАЦИЯ»**

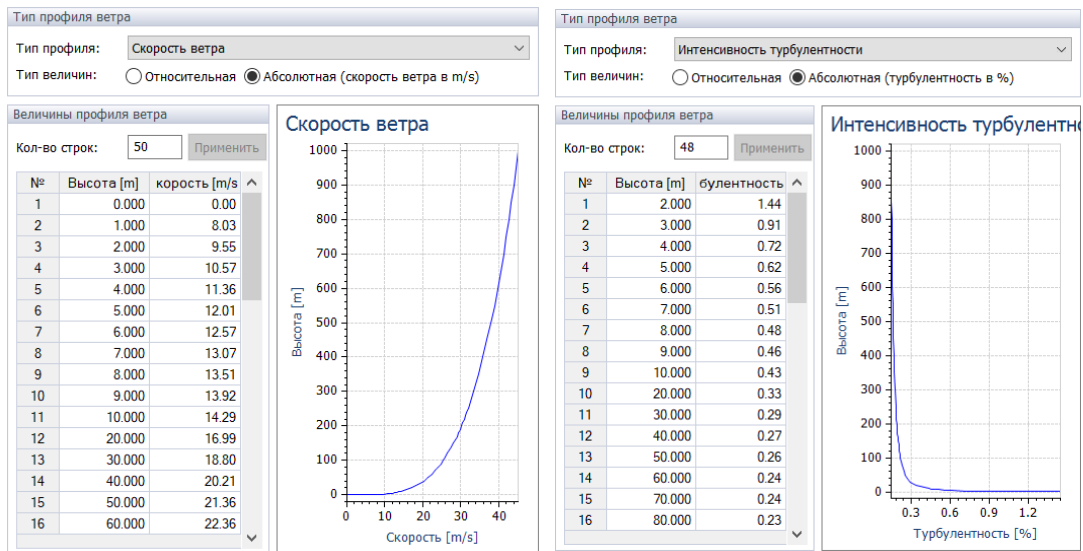


Рис. 1. Параметры набегающего потока

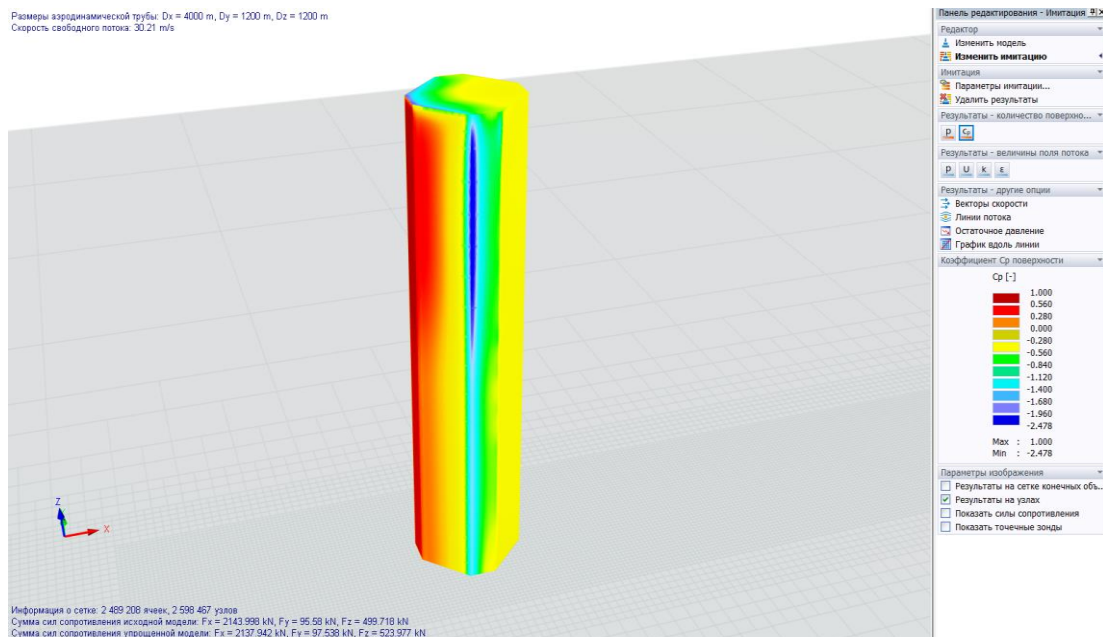


Рис. 2. Распределение аэродинамических коэффициентов c_p по поверхности модели с фасками 8 000 мм при атаке в ребро

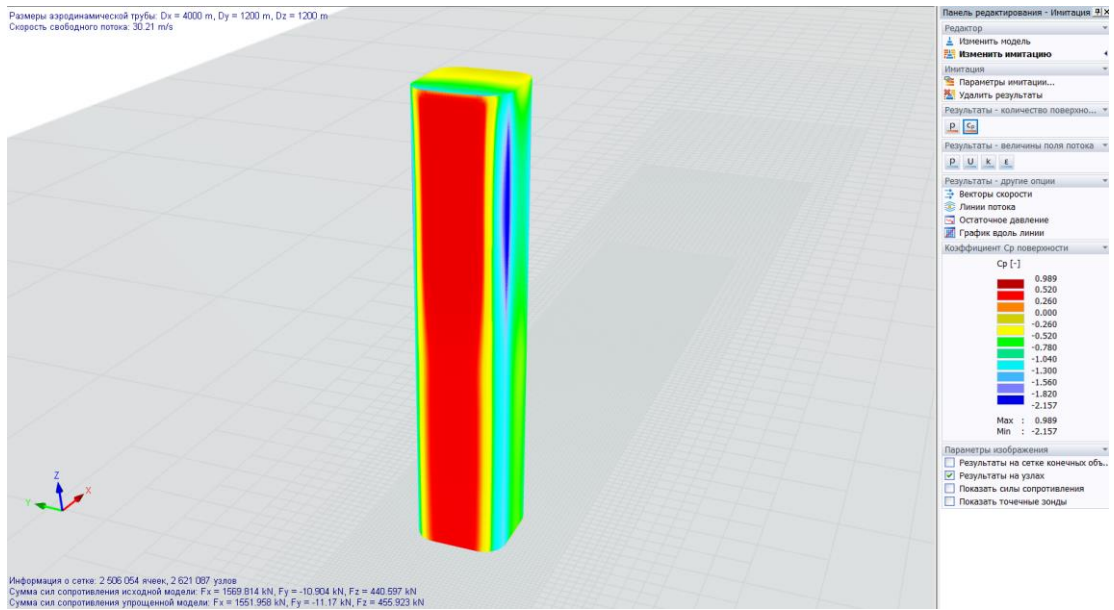


Рис. 3. Распределение аэродинамических коэффициентов c_p по поверхности модели с углами сопряжения 10 000 мм при атаке в грань

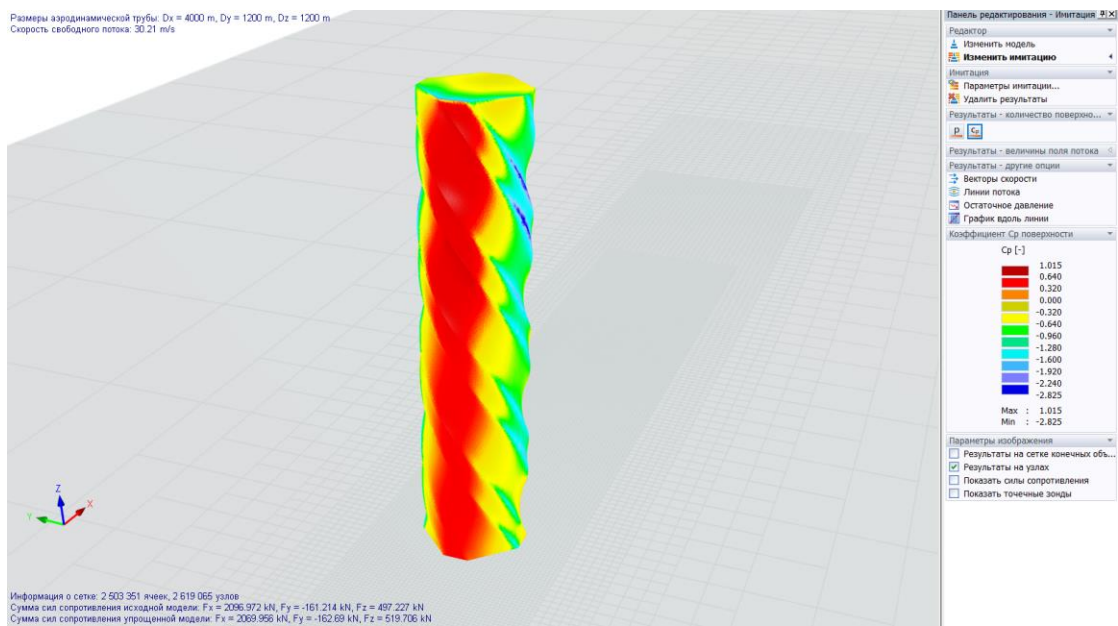


Рис. 4. Распределение аэродинамических коэффициентов c_p по поверхности модели с фасками 8 000 мм и углом закручивания 360° при атаке в ребро



На первом этапе определяется зависимость между размерами фасок здания и ветровой нагрузкой (рис. 4).

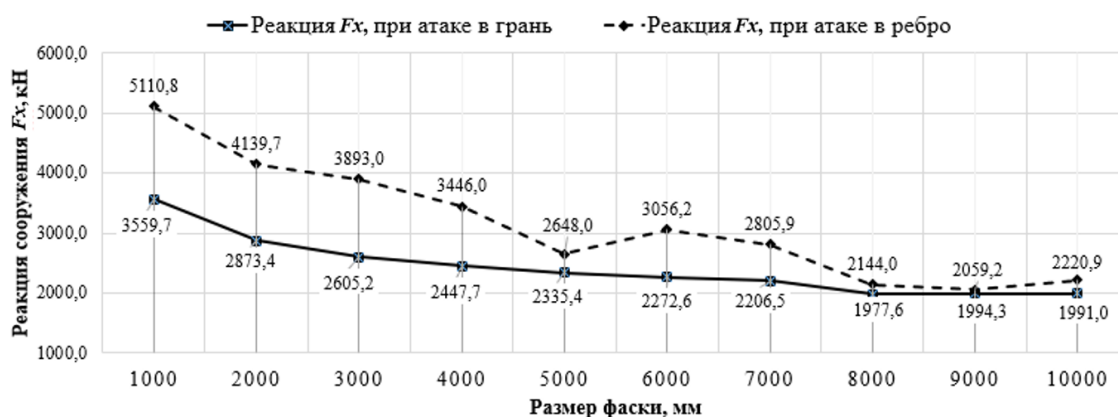


Рис. 4. Зависимость реакции здания на воздействие ветра от размера фаски при атаке в грань и ребро

С увеличением размера микромодификации уменьшается полезная площадь этажа, поэтому для определения оптимальных параметров фасок/скруглений вводится коэффициент геометрической адаптации, равный:

$$k = \frac{S_{эт}}{F_x}, \quad (5)$$

где $S_{эт}$ – площадь этажа, m^2 , F_x – реакция сооружения на ветровую нагрузку, кН.

Зависимость коэффициента геометрической адаптации от размера фаски при атаке в грань и ребро представлена на рис. 5. Область оптимального проектирования лежит в значениях размеров фаски 8 000 – 9 000 мм (рис. 2 цв. вклейки).

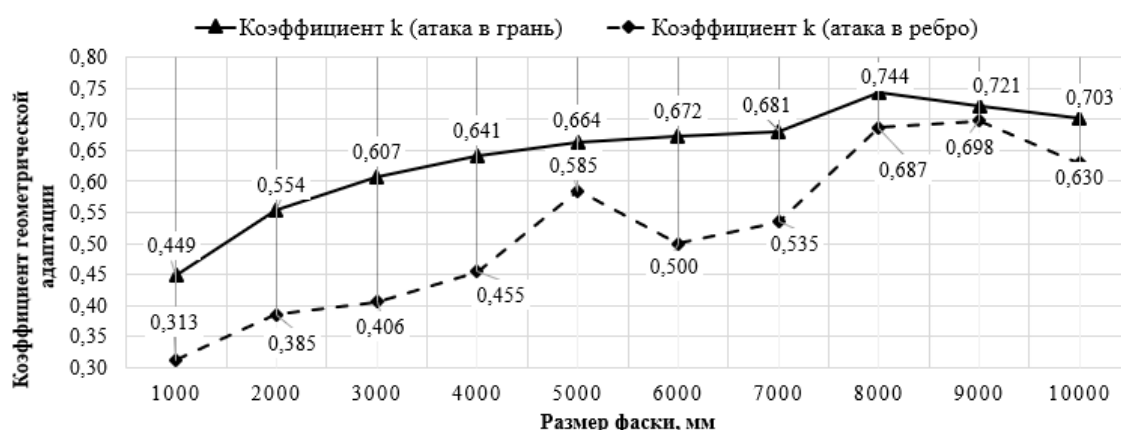


Рис. 5. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от размера фаски при атаке в грань и ребро

На втором этапе определяется зависимость между размерами сопряжений углов здания и ветровой нагрузкой. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от радиуса сопряжения при атаке в ребро и грань представлена на

рис. 6. Оптимальное значение размера радиуса сопряжения углов здания – 10 000 мм (рис. 3 цв. вклейки).

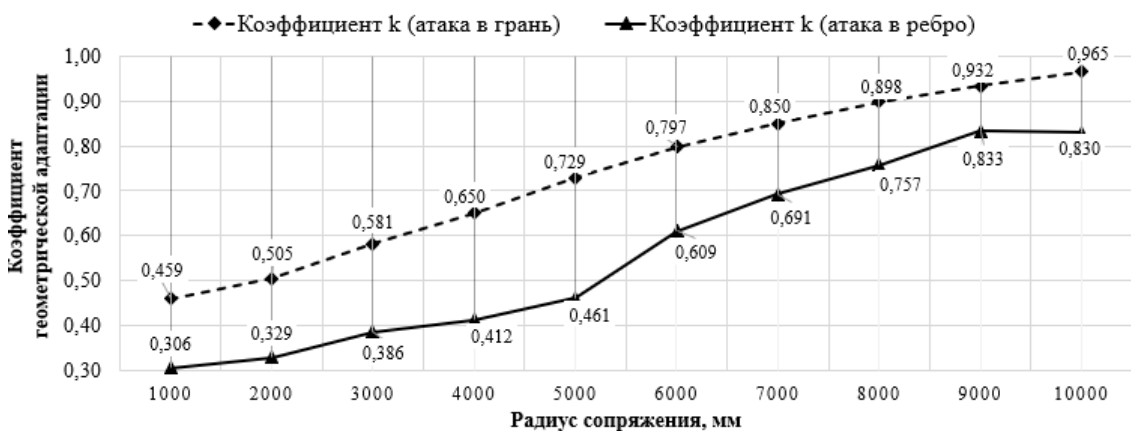


Рис. 6. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от радиуса сопряжения при атаке в ребро и грань

На третьем этапе определяется зависимость между углом закручивания здания с оптимальным размером фаски 8000 мм и ветровой нагрузкой. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от угла закручивания здания при атаке в ребро и грань представлена на рис. 7. Оптимальное значение угла закручивания здания – 360° (рис. 4 цв. вклейки).

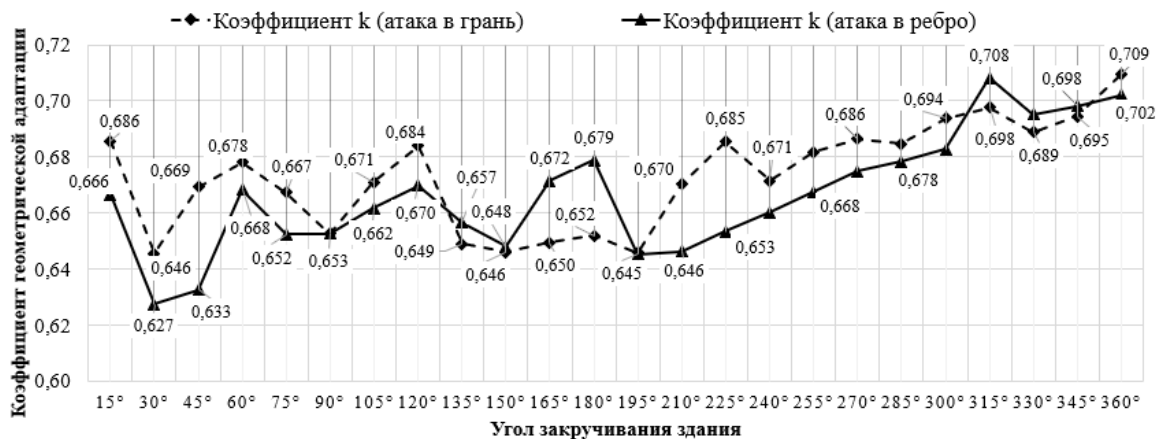


Рис. 7. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от угла закручивания здания с оптимальным размером фаски при атаке в ребро и грань

На четвертом этапе определяется зависимость между углом закручивания здания с оптимальным углом сопряжения – 10 000 мм и ветровой нагрузкой. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от угла закручивания здания при атаке в ребро и грань представлена на рис. 8. Оптимальное значение угла закручивания здания – 270° .

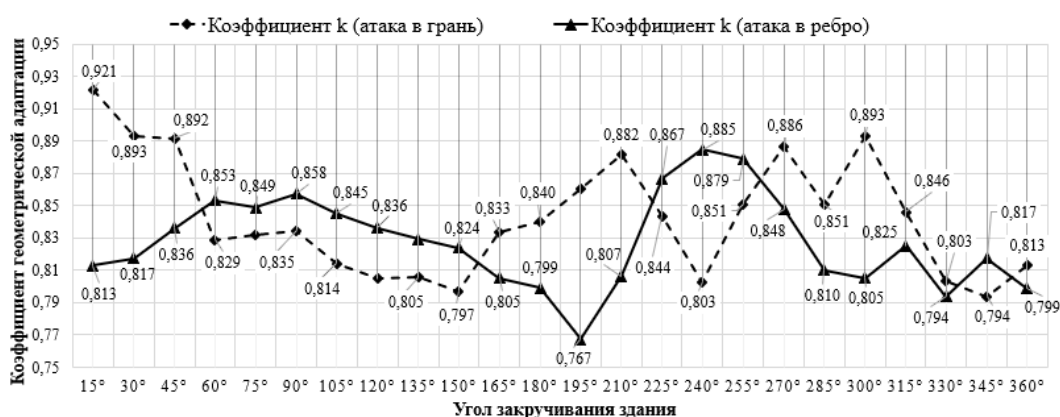


Рис. 8. Зависимость коэффициента геометрической адаптации от угла закручивания здания с оптимальным углом сопряжения при атаке в ребро и грань

На рис. 9 представлены оптимальные параметры проектируемого высотного здания.

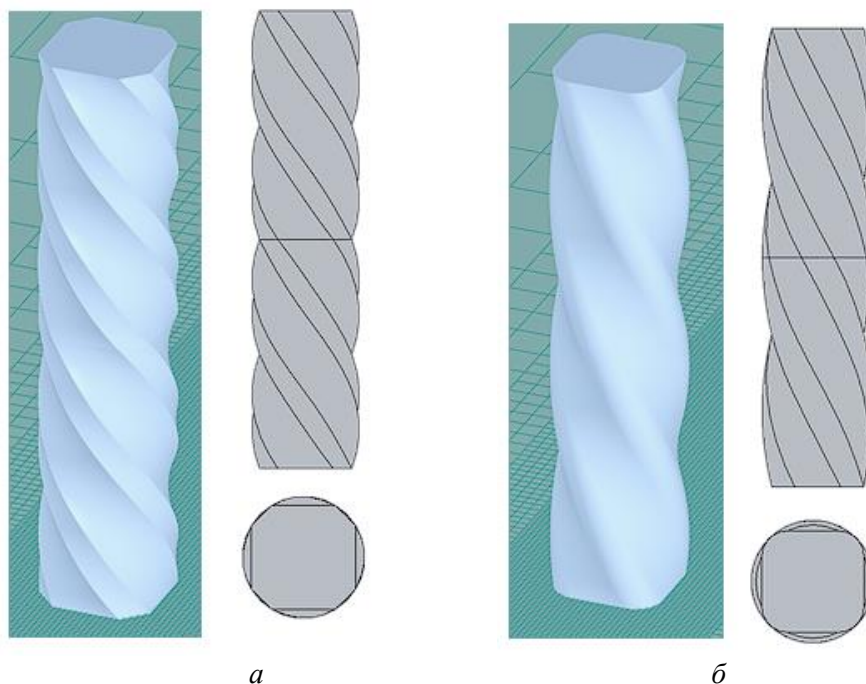


Рис. 9. Оптимальные параметры проектируемого высотного здания: *а* – размер фаски 8 000 мм, угол закручивания здания 360°; *б* – радиус сопряжения углов 10 000 мм, угол закручивания здания 270°

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Реттер, Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : монография / Э. И. Реттер. – Москва : Стройиздат, 1984. – 294 с. – Текст : непосредственный.
2. Симиу, Э. Воздействия ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан. – Москва : Стройиздат, 1984. – 360 с. – Текст : непосредственный.
3. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика : учебное пособие / О. И. Поддаева, А. С. Кубенин, П. С. Чурин. – Москва : МГСУ, 2015. – 88 с. – ISBN 978-5-7264-1194-1. – Текст : непосредственный.



4. Поддаева, О. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / О. И. Поддаева, И. В. Дуничкин. – Текст : непосредственный // Вестник МГСУ. – 2017. – № 6. – С. 602–609.

5. Михайлова, М. К. Проектирование, строительство и эксплуатация высотных зданий с учетом аэродинамических аспектов / М. К. Михайлова, В. С. Далинчук, А. В. Бушманова, Л. В. Доброгорская. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2016 – № 10 (49). – С. 59–74.

6. Айрапетов, А. Б. Новые аспекты аэродинамики ветрового нагружения высотных зданий в мегаполисе, новые подходы и методические принципы исследований как источник концепции формирования новых нормативов проектирования и строительства / А. Б. Айрапетов. – Текст : непосредственный // Academia. Архитектура и строительство. – 2010. – № 3. – С. 582–584.

7. Березин, М. А. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций / М. А. Березин, В. В. Катюшин. – Новосибирск : Олден-полиграфия, 2003. – 138 с. – ISBN 5-94905-002-9. – Текст : непосредственный.

8. ГОСТ Р 56728-2015. Здания и сооружения. Методика определения ветровых нагрузок на ограждающие здания : национальный стандарт Российской Федерации : утвержден и введен в действие Приказом Росстандарта от 19.11.2015 № 1892-ст : дата введения 2016- 05-01 : [редакция от 22.12.2020]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия : свод правил : утвержден Приказом Минстроя России от 03.12.2016 N 891/пр : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : дата введения 4 июня 2017 г. : [редакция от 30.05.2022]. – URL: <http://www.consultant.ru>. – Текст : электронный.

10. EN 1991-1-4:2005+A1. Еврокод 1: Воздействия на сооружения. Часть 1-4 : Основные воздействия – Ветровые нагрузки. – URL: <https://www.cstroy.ru/files/ntdoc/np1991-1-4.pdf>. – Текст : электронный.

OBLETOV Evgeny Nikolaevich, postgraduate student, assistant of the chair of theory of structures and technical mechanics¹, engineer-designer²; SHAKHANOV Evgeny Denisovich, student¹; KARGAPOLTSEVA Michele Aleksandrovna, student¹; SHILOV Sergey Sergeevich, postgraduate student of the chair of theory of structures and technical mechanics¹

PARAMETRIC MODELING OF COMPLEX HIGH-RISE BUILDING GEOMETRY: WIND LOAD INFLUENCE ANALYSIS AND OPTIMIZATION

¹Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering
65, Iljinskaya St., Nizhny Novgorod, 603952, Russia. Tel.: +7 (831) 430-54-96;
e-mail: evg.obletov@gmail.com

²JSC “Soyuzstalkonstruksiya”
262, Gorky St., Nizhny Novgorod, 603155, Russia. Tel.: +7 (831) 422-12-23;
e-mail: soyystal@mail.ru

Key words: parametric study, numerical modeling, wind load, aerodynamic pressure, pressure contour plots, pressure coefficients.



A study is being conducted on the influence of geometric building alterations, such as rotation (macro-modification) and chamfering/rounding corners (micro-modification), on the structure's response to wind load impact. The process of creating a building model in Revit 2021 software using parametric families is described. The research results are presented in the form of graphs showing the dependence of geometric adaptation coefficients on changes in the building shape. The optimal parameters for the designed high-rise building are proposed.

REFERENCES

1. Retter E. I. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and constructional aerodynamics] : monografiya. Moscow, Sroyizdat. 1984. – 294 p.
2. Simiu E., Scanlan R. Vozdeystviya vetra na zdaniya i sooruzheniya [Effects of wind on buildings and structures]. – Moscow : Sroyizdat, 1984. – 360 p.
3. Poddaeva O. I., Kubenin A. S., Churin P. S. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika [Architectural and construction aerodynamics] : uchebnoe posobie. – Moscow : Moskov. gos. stroit. un-t. – 2015. – 88 p. – ISBN 978-5-7264-1194-1.
4. Poddaeva O. I., Dunichkin I. V. Arkhitekturno-stroitel'naya aerodinamika / Vestnik MGSU. – Moscow, 2017. – № 6. – P. 602–609.
5. Mikhaylova M. K., Dalinchuk V. S., Bushmanova A. V., Dobrogorskaya L. V. Proektirovaniye, stroitel'stvo i ekspluatatsiya vysoknykh zdaniy s uchyotom aerodinamicheskikh aspektov [Design, construction and operation of high-rise buildings taking into account aerodynamic aspects] / Stroitel'stvo unikalnykh zdaniy i sooruzheniy [Construction of unique buildings and structures] / Sankt-Peterburgskiy politekhnicheskiy universitet Petra Velikogo, 2016. – № 10 (49). – P. 59–74.
6. Ayrapetov A. B. Novye aspekty aerodinamiki vetrovogo nagruzheniya vysoknykh zdaniy v megapolise, novye podkhody i metodicheskie printsipy issledovaniya kak istochnik kontseptsii formirovaniya novykh normativov proektirovaniya i stroitel'stva [New aspects of wind loading aerodynamics of high-rise buildings in a megalopolis, new approaches and methodological principles of research as a source of the concept of forming new design and construction standards]. – Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]. – 2010. – № 3. – P. 582–584.
7. Berezin M. A., Katyushin V. V. Atlas aerodinamicheskikh kharakteristik stroitelnykh konstruksiy [Atlas of aerodynamic characteristics of building structures]. Novosibirsk: Olden-poliografiya. 2003. – 138 p. – ISBN 5-94905-002-9.
8. GOST R 56728-2015. Zdaniya i sooruzheniya. Metodika opredeleniya vetrovykh nagruzok na ograzhdayushchie zdaniya [Buildings and constructions. Method for determining wind loads on the building envelope] : natsional. standart RF : utver. i vved. v deystvie Prikazom Rosstandarta ot 19.11.2015 N 1892-st. : data vved. 2016-05-01 : [red. ot 22.12.2020]. – URL: <http://www.consultant.ru>.
9. SP 20.13330.2016. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and effects] : svod pravil : utver. Prikazom Minstroya Rossii ot 03.12.2016 N 891/pr : aktualizirovannaya redaktsiya SNIIP 2.01.07-85* : data vved. 4 iyunya 2017 g. : [red. ot 30.05.2022]. – URL : <http://www.consultant.ru>.
10. EN 1991-1-4:2005+A1. Evrokod 1: Vozdeystviya na sooruzheniya. Chast 1-4 : osnovnye vozdeystviya – Vetrovye nagruzki [Eurocode 1: action on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions]. – URL: <https://www.cstroy.ru/files/ntdoc/np1991-1-4.pdf>.

© Е. Н. Облетов, Е. Д. Шаханов, М. А. Каргапольцева, С. С. Шилов, 2024
Получено: 15.01.2024 г.