

Инженерная геометрия и компьютерная графика. Цифровая поддержка жизненного цикла изделий Engineering geometry and computer graphics. Digital support for product lifecycle

Научная статья
УДК 514.85 + 004.942 + 621.548
DOI: 10.14529/build240307

ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ АЭРОДИНАМИКИ ВЫСОТНОГО ЗДАНИЯ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРАМИ

П.А. Хазов, khazov.nngasu@mail.ru
С.С. Шилов, sergey.shilov.1997@mail.ru
Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет,
Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В статье рассматривается влияние изменения геометрии здания на вовлеченность ветрового потока в рабочую зону ветрогенераторов. Потoki воздушных масс являются одним из альтернативных источников энергии, а геометрия окружающих форм напрямую влияет на эффективность применения ветрогенераторов, интеграция которых в тело здания приобретает в последнее время большую популярность. В качестве метода исследования применялось численное моделирование здания в программном комплексе Ansys CFX. Была выведена геометрическая зависимость длины фасада от других параметров здания. Было рассмотрено шесть форм зданий, имеющих одинаковую площадь этажа в плане. Для более объективной оценки исследование проводилось при различных углах атаки ветрового потока. Для выбора оптимальной геометрической формы применялся коэффициент, показывающий изменение скорости потока внутри рабочей области ветрогенератора по отношению к первоначальной. По результатам было определено, что наиболее оптимальной является форма с небольшим уклоном фасада. Данная форма позволяет направлять воздушную массу в рабочую область ветрогенератора с достаточно высокой скоростью и практически при любом направлении ветра.

Ключевые слова: оптимизация геометрических форм, компьютерное моделирование, ветрогенераторы
Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>.

Для цитирования. Хазов П.А., Шилов С.С. Геометрическая оптимизация аэродинамики высотного здания с интегрированными ветрогенераторами // Вестник ЮУрГУ. Серия «Строительство и архитектура». 2024. Т. 24, № 3. С. 73–82. DOI: 10.14529/build240307

Original article
DOI: 10.14529/build240307

GEOMETRIC OPTIMIZATION OF THE AERODYNAMICS OF A HIGH-RISE BUILDING WITH A BUILT-IN WIND GENERATOR

P.A. Khazov, khazov.nngasu@mail.ru
S.S. Shilov, sergey.shilov.1997@mail.ru
Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering,
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. This article examines the influence of changes in building geometry on wind flow in the working area of wind generators. Air flows are an alternative source of energy, and the geometry of the surrounding forms directly affects the efficiency of wind generators, the integration of which into the body of a building has recently become popular. The research used numerical modeling of a building in the Ansys CFX software package. The geometric dependence of the length of the facade on other building parameters was derived. Six building forms with the same floor plan area were considered. For a more objective assessment, the study was carried out using different angles of attack

© Хазов П.А., Шилов С.С., 2024.

of the wind flow. To select the optimal geometric shape, a coefficient was used that showed the change in air velocity inside the wind generator relative to the original shape. The optimal form is with a slight slope of the facade. This shape allows the direction of the air flow into the wind generator at a fairly high speed and from almost any wind direction.

Keywords: geometric optimization, computer modeling, wind generators

Acknowledgements. The research was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>.

For citation. Khazov P.A., Shilov S.S. Geometric optimization of the aerodynamics of a high-rise building with a built-in wind generator. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Construction Engineering and Architecture.* 2024;24(3):73–82. (in Russ.). DOI: 10.14529/build240307

Введение

Инженерная геометрия является универсальным направлением исследований, объединяющим множество различных задач науки и техники. Множество явлений, влияющих на структуру и поведение механических систем, напрямую зависят от форм, размеров, масштабов и прочих факторов, имеющих непосредственное отношение к геометрическому аппарату. Поиск наиболее рациональных, экономически выгодных и безопасных решений той или иной задачи зачастую сталкивается с геометрической оптимизацией, поскольку именно геометрические особенности объекта, как правило, являются наиболее объективными критериями для сравнения.

В настоящее время задачи архитектурно-строительной аэродинамики неразрывно связаны с анализом геометрических параметров зданий и сооружений [1, 2]. Как правило, в аэродинамических исследованиях на первый план выходят проблемы, связанные с взаимным влиянием системы «аэродинамическая среда – исследуемая конструкция», где критериями исследования являются механические характеристики, позволяющие принять наиболее рациональные геометрические формы с точки зрения минимизации нагрузок, а также обеспечения аэродинамической пешеходной комфортности на прилегающих к зданию территориях. В таком случае основными результатами выступают изополя распределения давлений на поверхностях здания или сооружения [3–8], а также поля скоростей ветрового потока на прилегающих пространствах [9–11].

В последние годы в связи с набирающим популярность энергоэффективным строительством актуальной становится задача применения альтернативных источников энергии, одним из которых является движение воздушных масс и ветровые явления [12–14]. В условиях крупных городов применение классических ветрогенераторов весьма затруднительно ввиду наличия большого количества многоэтажных и высотных зданий. Одним из возможных решений является интеграция ветрогенераторов непосредственно в конструкцию здания, что позволяет отказаться от сооружения внушительных размеров мачт, выделения больших площадей под ветрогенераторы [15–17].

Как правило, использование ветрогенераторов с горизонтальной осью в случае интеграции в не-

сущие конструкции становится нерациональным, поскольку горизонтальная ось не может быть снабжена флюгером, позволяющим сориентировать систему по направлению воздушного потока. В этом случае наиболее эффективными оказываются ветрогенераторы с вертикальной осью, выработка энергии в которых меньше зависит от направления ветра (рис. 1). Одним из главных показателей, влияющих на энергоэффективность такой установки, является количество вовлекаемого воздуха, проходящего через проем с установленным ветрогенератором за единицу времени. В этом случае на первый план выходит геометрия здания или сооружения, которая напрямую влияет на объемы задействованных воздушных масс [18–20].

Целью работы является компьютерное моделирование геометрической формы здания, при которой будет наибольшая вовлеченность ветрового потока в рабочую зону.

Метод

В настоящей статье изучаются геометрические формы проектируемого в научно-исследовательских целях высотного здания с интегрированными ветрогенераторами, расположенными на четырех уровнях (рис. 2). Отсутствие ветрогенератора в нижней части здания связано с особенностями распределения скоростей аэродинамического потока в городской местности, особенностью которого являются низкие скорости вблизи поверхности, связанные с вязким контактированием с землей, а также с наличием большого количества препятствий в виде зданий и сооружений, деревьев, особенностей ландшафта и т. п. Данные факторы делают поток крайне турбулентным, при этом хаотичность изменений скоростей приводит к общему торможению. Вышеизложенные факторы отрицательно сказываются на эффективности устройства интегрированных ветрогенераторов на высотах до 50 метров.

Для корректной оценки влияния одного из геометрических параметров здания на вовлеченность воздуха в рабочую зону генератора необходимо изменять один из параметров, сохраняя при этом основные технико-экономические показатели объекта (рис. 3а, б). В данной работе в качестве такого параметра был выбран угол наклона фасада к горизонтальной оси здания, так как он оказывает

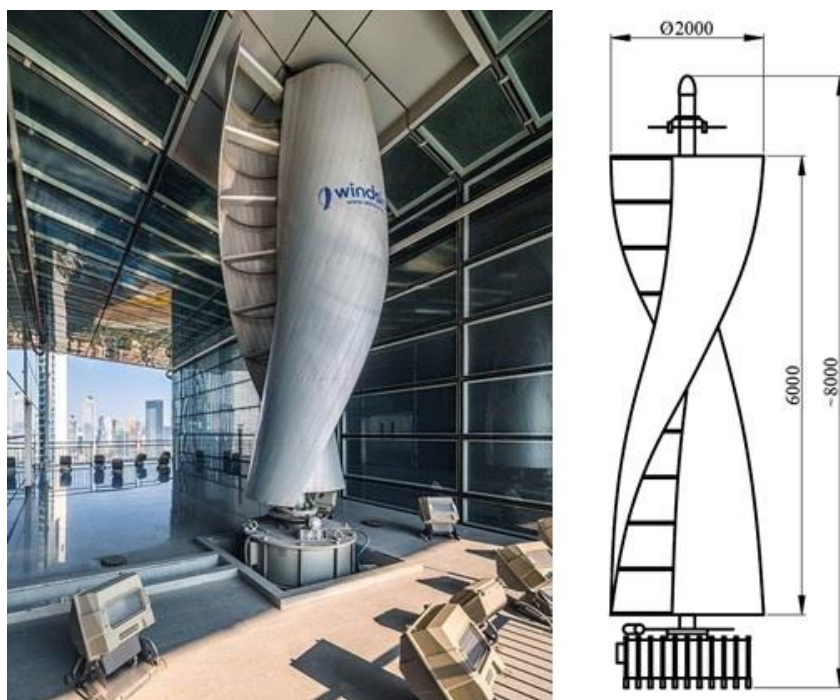


Рис. 1. Принципиальная схема ветрогенератора с вертикальной осью

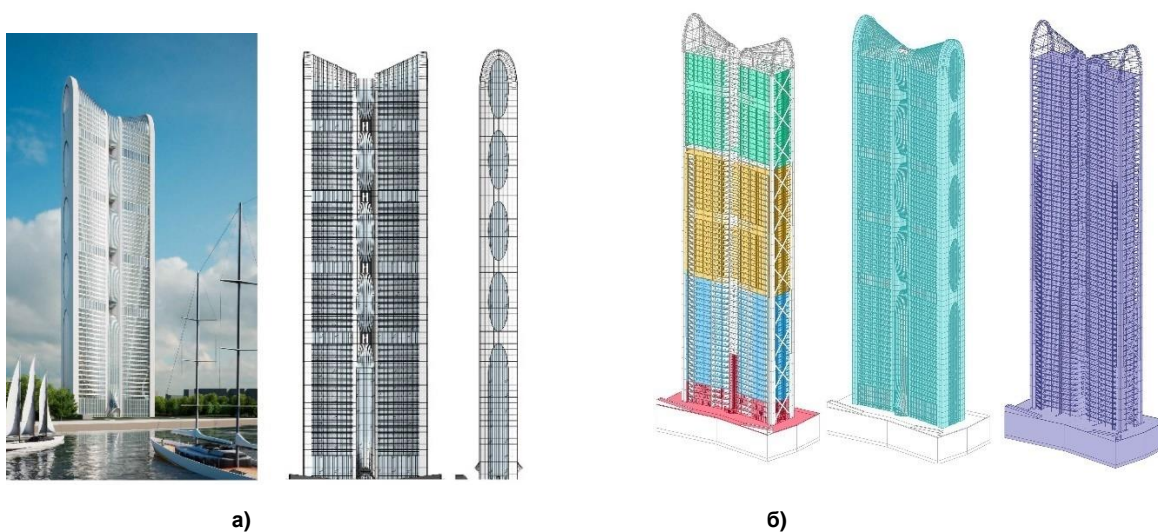


Рис. 2. Исследуемое здание: общий вид (а) и BIM-модель (б)

наибольшее влияние на результаты исследования. Для построения нужной формы здания необходимо знать длину фасада, которая изменяется в зависимости от угла α , при этом площадь этажа и площадь сечения рабочей зоны ветрогенератора остаются неизменной (рис. 3в).

Длина фасада $L = f(\alpha)$ определяется по формуле:

$$L = \frac{-R + \sqrt{R^2 - \alpha[(0,5\pi - \alpha)R^2 + 0,5A]}}{\alpha}$$

Геометрические характеристики этажа для каждой серии экспериментов сведены в табл. 1.

Угол атаки набегающего на тело потока воздуха или, другими словами, направление ветрово-

го потока является еще одним важным параметром, оказывающим существенное влияние на результаты исследования.

Исследование проводилось в программно-вычислительном комплексе *Ansys Workbench 2024 R1*, модуль *CFX* для получения полей ветровых скоростей в рабочей зоне ветрогенераторов. На рис. 4 представлена сетка конечных объемов с указанием граничных и начальных условий, необходимых для решения задач гидродинамики [21].

На границах расчетной области были заданы следующие условия:

– на входе задается постоянная на всей границе скорость ветрового потока 10,0 м/с;

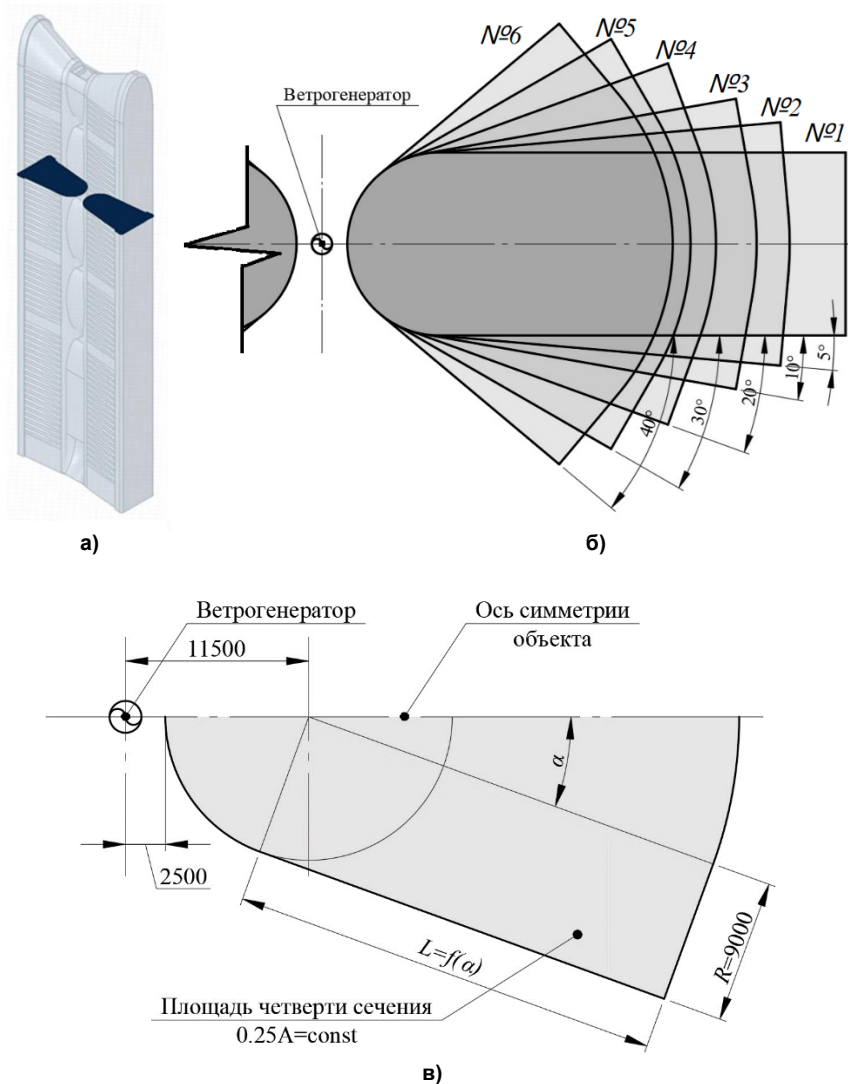


Рис. 3. Данные для геометрического исследования: моделируемый фрагмент (а), исследуемые формы фрагмента (б), геометрическая схема (в)

Таблица 1

Геометрические характеристики этажа

№ формы	α , град	A , м ²	R , м	$L = f(\alpha)$, м
1	0,0	1680,0	9,0	39,6
2	5,0			34,3
3	10,0			31,0
4	20,0			27,0
5	30,0			24,5
6	40,0			22,7

– на выходе – условие постоянства избыточного давления (дополнительное давление равно 0,0 Па);

– на внешних боковых границах – условие симметрии потока;

– на границе объекта исследования – условие стенки без скольжения, исключающее проникновение потока внутрь здания.

В качестве модели турбулентности применялась гибридная модель SST [22, 23]. Это низкорейнольдсовая модель, которая стала стандартом для инженерных задач. SST-модель представляет собой комбинацию k-ε и k-ω моделей турбулентности: для расчета течения в свободном потоке используются уравнения k-ε модели, а в области вблизи стенок – уравнения k-ω модели.

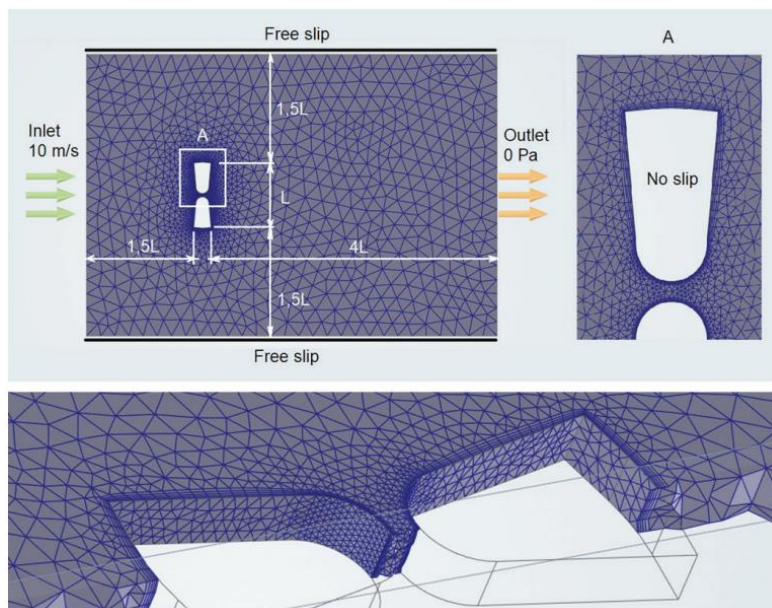


Рис. 4. Расчетная область аэродинамического моделирования для одной из моделей

Для учета влияния угла атаки ветрового потока на геометрические формы исследуемое здание поворачивалось на угол Θ от $0,0^\circ$ до $90,0^\circ$ с шагом $10,0^\circ$, все остальные параметры численного моделирования сохранялись.

Для сравнения результатов моделирования и выбора оптимальной геометрической формы необходимо ввести коэффициент, показывающий отношение скорости ветрового потока внутри канала к начальной скорости на входе:

$$k = \frac{v_{\text{кан}}}{v_{\text{нач}}}$$

После проведения численного исследования и выбора наиболее оптимальной формы была изготовлена твердотельная модель здания с применением технологии 3D-печати из полимерных материалов для проведения физического эксперимента

в аэродинамической трубе (рис. 5). Задача исследования заключалась в экспериментальной проверке выбранной геометрической формы.

Результаты и обсуждения

При угле атаки в $90,0^\circ$ в области ветрогенератора ветровые потоки попадают не напрямую, а после столкновения с твердотельной системой, образуя при этом завихрения в рабочей зоне. При этом не достигается необходимая скорость вращения генератора для полноценной выработки энергии, поэтому скорость ветровых потоков была принята $0,0$ м/с. Для наглядного представления полученных результатов в ходе численного исследования различных геометрических форм значения скорости воздушных масс внутри канала $v_{\text{кан}}$ были сведены в табл. 2.



Рис. 5. Макет здания в аэродинамической трубе

Для более наглядного представления влияния геометрических параметров здания на скорость внутри канала были построены графики для каждой формы объекта. График показывает значение коэффициента k в зависимости от угла атаки ветрового потока (рис. 6).

С целью анализа поведения потока в расчетной области и влияния геометрии здания, а именно угла наклона фасада, визуализируется поле направления движения ветра с выделением точек деления потока и характерных групп направлений (рис. 7, 8). Для оценки влияния формы и влияния наличия сквозных проходов была исследована сплошная модель без отверстий (рис. 9).

На основании физического эксперимента были построены изополя распределения аэродинамических коэффициентов по поверхности здания (рис. 10). Как известно, аэродинамические характеристики, такие как ветровое давление и

аэродинамические коэффициенты, напрямую зависят от скорости ветрового потока, следовательно, на основании полученных изополей можно сделать вывод касемо влияния геометрии здания на вовлеченность ветрового потока в область ветрогенератора.

Выводы

По результатам проведенного исследования был сделан ряд выводов относительно влияния геометрических характеристик здания на количество вовлеченного воздуха в канал с ветрогенератором и скорость внутри каналов:

1. В границах угла атаки от 55 до 65° графики для всех геометрических форм начинают сходиться, что может свидетельствовать о том, что при таких углах геометрические размеры здания не оказывают значительного влияния на поведение потока в рабочей зоне ветрогенераторов.

Таблица 2

Значения скорости воздушных масс

Угол атаки Θ , град	Модель № 1	Модель № 2	Модель № 3	Модель № 4	Модель № 5	Модель № 6
0,0	33,351	31,342	30,711	29,187	26,051	25,156
10,0	33,913	31,979	30,304	29,024	26,370	24,043
20,0	33,285	31,530	29,250	27,859	26,011	24,202
30,0	31,233	29,738	29,226	26,869	25,660	25,024
40,0	29,503	28,025	27,870	26,982	26,034	24,432
50,0	27,415	26,831	26,497	26,885	26,065	25,177
60,0	25,334	24,431	24,047	24,112	24,982	24,745
70,0	24,258	22,016	22,028	22,754	24,255	21,596
80,0	18,458	13,543	7,380	1,742	0,00	0,00
90,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

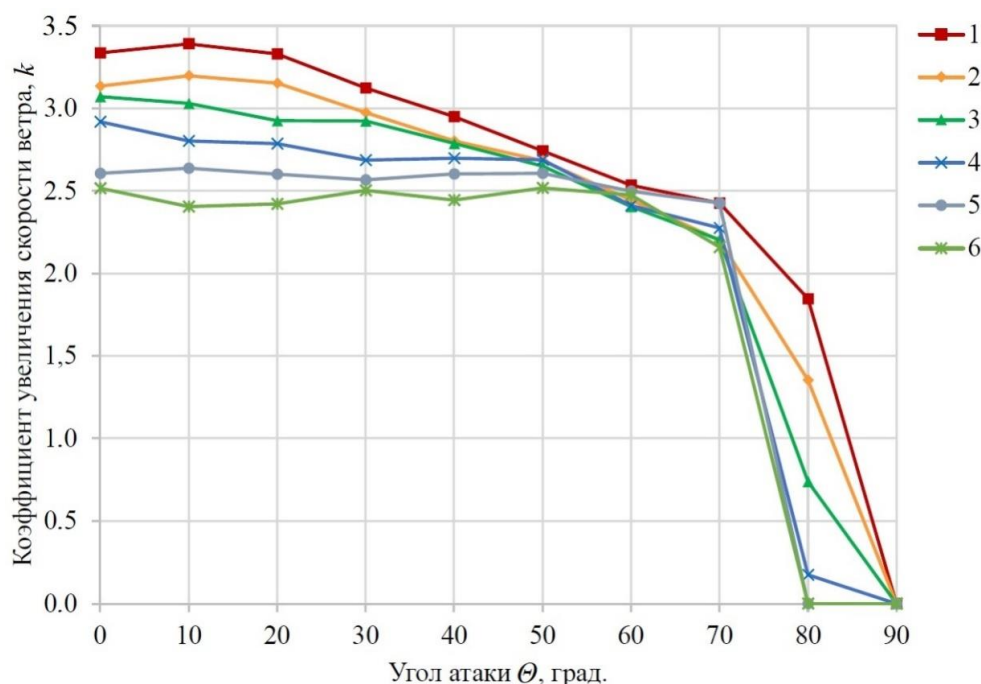


Рис. 6. График зависимости коэффициента увеличения скорости k от угла атаки Θ

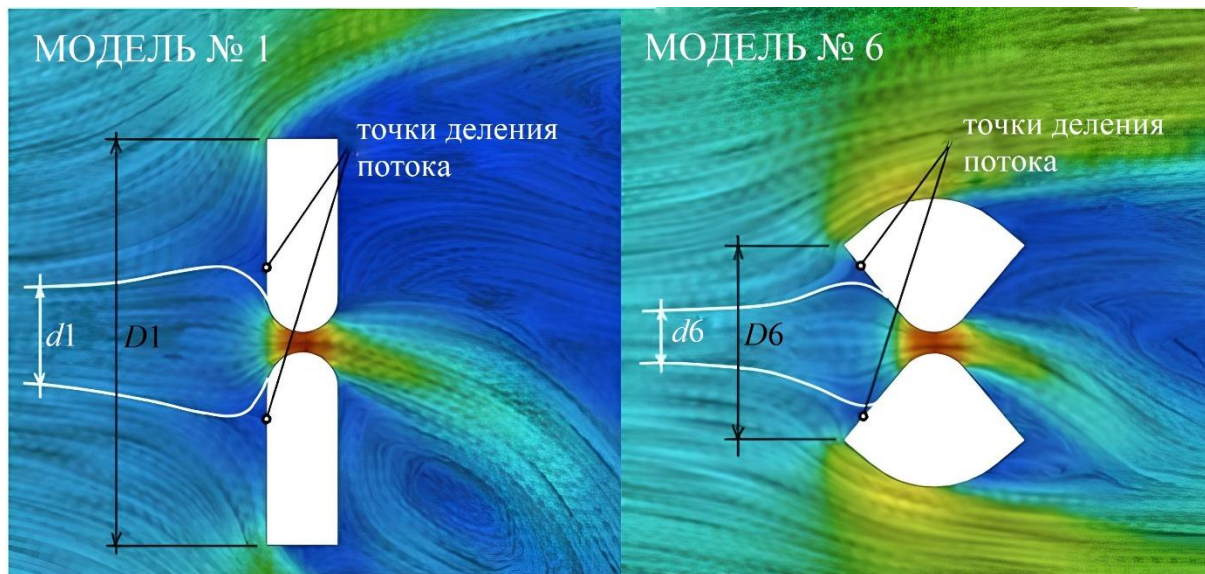


Рис. 7. Поля направлений обтекания моделей № 1 и № 6

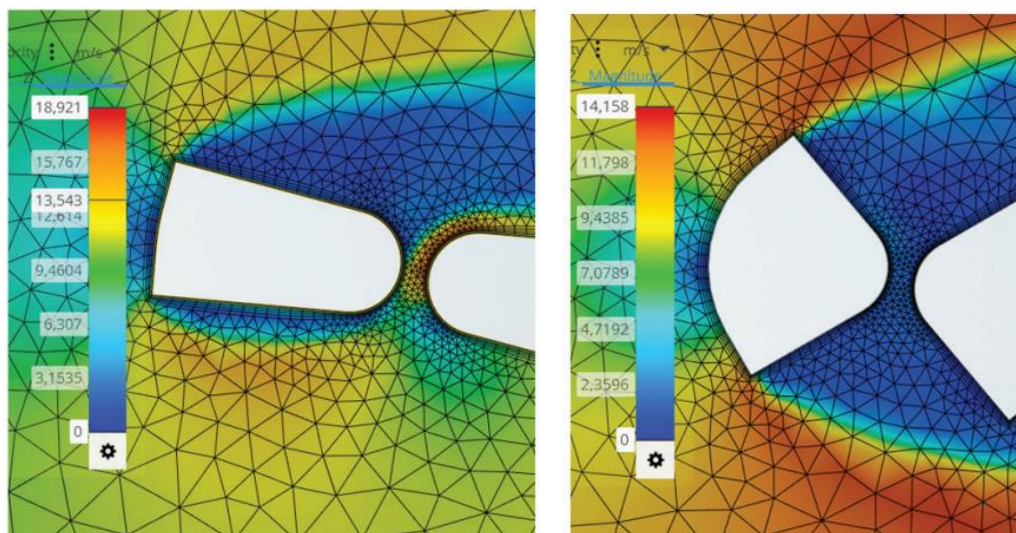


Рис. 8. Значения скоростей ветрового потока для моделей № 2 и № 6 при угле атаки 80°

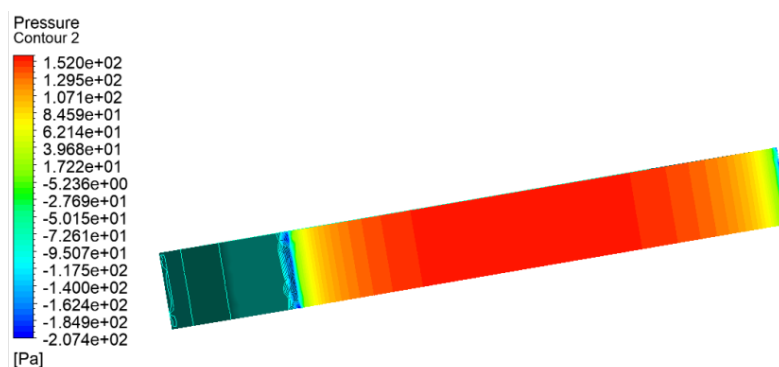


Рис. 9. Фрагмент здания без проема

2. Для всех моделей максимальный коэффициент увеличения скорости ветра достигается при перпендикулярном направлении ветрового потока. На основании рис. 7 можно

наблюдать, что при увеличении угла наклона фасада точки разделения потока сдвигаются ближе к краям здания, что говорит об увеличении количества воздушных масс внутри рабо-

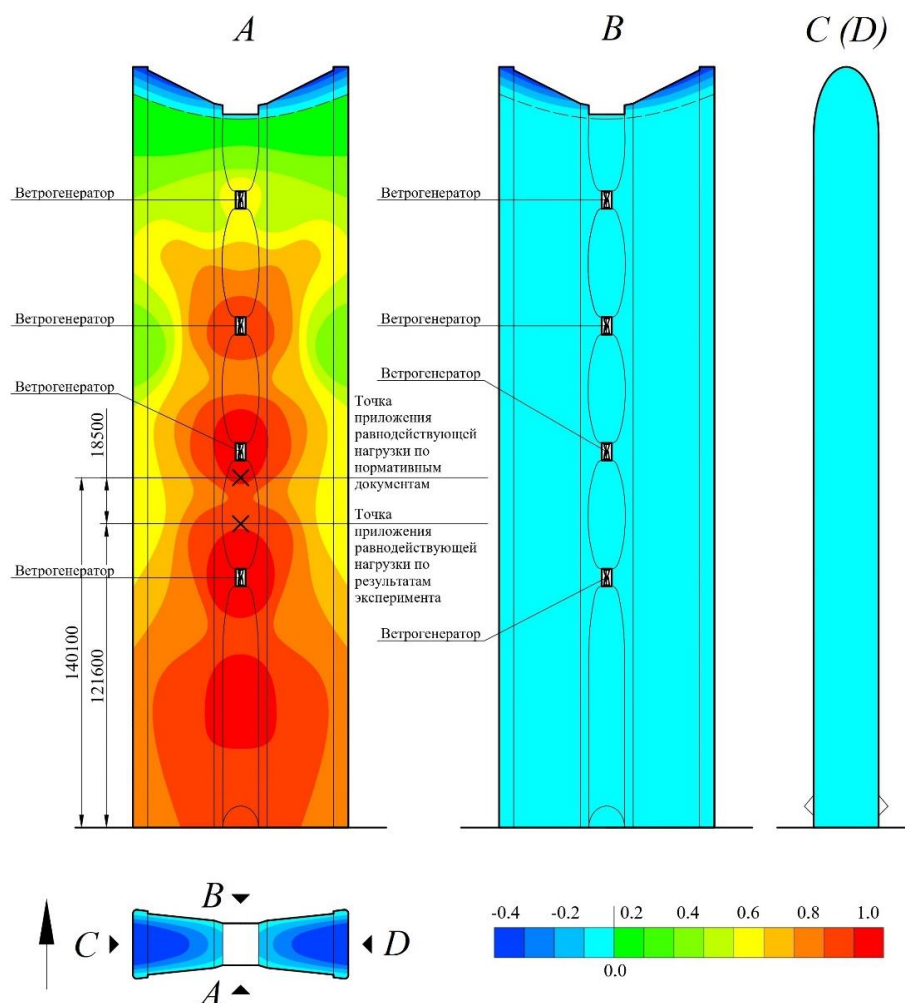


Рис. 10. Изополя распределения аэродинамических коэффициентов

чей области ветрогенератора и повышении их эффективности.

3. По данным рис. 8 можно сделать вывод, что при одновременном увеличении угла наклона фасада и увеличении угла атаки ветрового потока наблюдается значительное уменьшение скорости внутри канала и количества вовлекаемого воздуха, что снижает выработку электроэнергии.

4. На основании результатов физического эксперимента наблюдается концентрация ветровых давлений в области ветрогенераторов по сравнению с объектами без проходов

(см. рис. 9), где давления распределяются равномерно. Локальные увеличения давления говорят об увеличении скорости внутри узкого канала ветрогенератора, что также способствует увеличению вырабатываемой энергии.

Таким образом, наиболее оптимальной формой являются здания с углом наклона фасада от $5,0^\circ$ до $10,0^\circ$, при данных углах наблюдаются высокие коэффициенты увеличения скорости при большом диапазоне углов атаки. А наклонные фасады позволяют увеличить количество вовлеченного воздуха в область ветрогенераторов.

Список литературы

1. Ключко В.М. Приемы объемно-планировочных решений формирования энергоэффективных высотных полифункциональных зданий, использующих энергию ветра // Архитектура и современные информационные технологии. 2015. № 2 (31). С. 13.
2. Белостоцкий А.М., Афанасьева И.Н., Акимов П.А. Ветровое нагружение высотных зданий, сооружений, комплексов (предложение по актуализации свода правил) // Сборник научных трудов РААСН. 2017. Т. 2. С. 104–114. DOI: 10.22337/9785432302212-2017-104-114.
3. Gorji-Bandpy M., Mousaad Aly A. Aerodynamics [Internet]. 2021 [cited 05 December 2021]. Available at: <https://www.intechopen.com/books/8558>. DOI: 10.5772/intechopen.78935.
4. Кошин А.А. Анализ динамического воздействия воздушного потока на тандем моделей высотных зданий // Вестник ТГАСУ. 2014. № 2. С. 134–141.

5. Experimental and numerical study of the effect of the coating on the characteristics of the wind flow between adjacent buildings / D. Gelbashts, A. Buyruk, B. Sahin et al. // 8-th International Conference on Advanced Technologies. Elazig, 2017. P. 1648–1655.
6. Mohamed A. Comparison of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests / А. Мохамед, К. Уайт, С. Уоткинс // 15th Australian wind energy society workshop. Sydney, 2012. 4 p.
7. Леденев П.В. Возможности численного моделирования в проблеме определения аэродинамических нагрузок на плохообтекаемое препятствие в турбулентном потоке // Материалы VIII международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». М.: МЦНМО, 2008. С. 96–97.
8. Айрапетов А.Б., Вышинский В.В., Катунин А.В. Расчетные и экспериментальные исследования обтекания высотных зданий и сооружений атмосферным ветром в условиях городской застройки // Труды МФТИ. 2017. Т. 9. № 2. С. 5–12.
9. Перминов Э.М. Ветроэнергетика: история, состояние, перспективы // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 5. С. 11–26.
10. Елистратов В.В., Боброва Д.М. Ветроэнергетические установки – архитектурный элемент здания // Архитектура и современные информационные технологии. 2013. № 2 (23). С. 8.
11. Груничев И.А. Архитектурные принципы интеграции ветрогенераторов в малоэтажных зданиях в зонах прибрежных территорий // Градостроительство и архитектура, 2015. № 12. С. 26–31.
12. Karadag I., Yüksek I. Wind Turbine Integration to Tall Buildings // IntechOpen. 2020. P. 15. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91650>;
13. Li Q.S., Shu Z.R., Chen F.B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation // Applied Energy. 2016. Vol. 165. P. 777–788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>
14. Stankovic S., Campbell N., Harries A. Urban Wind Energy. London: Taylor & Francis Group, 2009. 200 p. <https://doi.org/10.4324/9781849770262>
15. Хазов П.А., Поздеев М.Л. Оптимизация форм энергоэффективных зданий с ветрогенераторами // Приволжский научный журнал. 2021. № 4. С. 55–63.
16. Smith, Richard F. Bahrain world trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building / Richard F. Smith, Shaun Killa // The Structural Design of Tall and Special Buildings. 2007. Vol. 16, № 4. P. 429–439. DOI: 10.1002/tal.416
17. Frechette Roger, Russell Gilchrist Towards Zero Energy. A Case Study of the Pearl River Tower, Guangzhou, China // CTBUH 2008: 8th World Congress. Dubai. 2008. P. 11.
18. Мягков М.С., Алексева Л.И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки // Архитектура и современные информационные технологии. 2014. № 1(26). С. 15.
19. Лампси Б.Б., Шилов С.С., Хазов П.А., Февральских А.В. Определение аэродинамических коэффициентов большепролетного покрытия экспериментальным методом // Приволжский научный журнал. 2021. № 3. С. 17–24.
20. Лампси Б.Б., Шилов С.С., Хазов П.А. Численное и физическое моделирование ветровых потоков на большепролетное покрытие // Вестник МГСУ. 2022. № 1. С. 21–31.
21. Темам Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ. 2-е изд. М.: Мир, 1981. 408 с.
22. Вальгер С.А., Федорова Н.Н., Федоров А.В. Структура турбулентного отрывного течения в окрестности установленной на пластине призмы с квадратным сечением // Теплофизика и аэромеханика. 2015. Т. 22, № 1. С. 29–42.
23. David C. Wilcox. Turbulence modeling for CFD. California. DCW Industries. Third edition. 536 p.

References

1. Klyuzko V.M. [Methods of spatial planning solutions for the formation of energy-efficient high-rise multi-functional buildings using wind energy]. *Arkhitektura i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* [Architecture and modern information technologies]. 2015;3(31)13. (In Russ.)
2. Belostotsky A.M., Afanasyeva I.N., Akimov P.A. [Wind loading of high-rise buildings and complexes]. *Sbornik nauchnykh trudov RAASN* [Collection of scientific papers of the Russian Academy of Sciences]. 2017;2:104–114. (in Russ.) DOI: 10.22337/9785432302212-2017-104-114;
3. Gorji-Bandpy M., Mousaad Aly A. Aerodynamics [Internet]. 2021 [cited 05 December 2021]. Available at: <https://www.intechopen.com/books/8558>. DOI: 10.5772/intechopen.78935;
4. Koshin A.A. Analysis of airflow dynamic impact on tandem-arranged high-rise building models. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. English version appendix*. 2014;2(43):134–141. (in Russ.)
5. Gelbashts D., Buyruk A., Sahin B., Karabulut K., Alnak A. Experimental and numerical study of the effect of the coating on the characteristics of the wind flow between adjacent buildings. *8-th International Conference on Advanced Technologies*. Elazig. 2017:1648–1655.

6. Mohamed A., White K., Watkins C. Comparison of the numerical study of the effect of building protrusion aerodynamics with the results of aerodynamic tests. 15th Australian wind energy society workshop. Sydney. 2012;4.
7. Ledenev P.V. [Possibilities of numerical modelling in determination of aerodynamic loads on a poorly streamlined obstacle in turbulent flow]. *Materialy VIII mezhdunarodnoy shkoly-seminara "Modeli i metody aerodinamiki"* [Materials of the VIII International school-seminar "Models and methods of aerodynamics"]. Moscow: ICNMO; 2008:96–97. (In Russ.)
8. Airapetov A.B., Vyshinsky V.V., Katunin A.V. [Computational and experimental studies of the flow of high-rise buildings and structures by atmospheric wind in urban conditions]. *Trudy MFTI* [The works of MIPT]. Moscow. 2017;9(2):5–12. (in Russ.)
9. Perminov E.M. [Wind energy: history, state, prospects]. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* [Bulletin of the Moscow Energy Institute]. 2020;5:11–26. (in Russ.)
10. Elistratov V.V., Bobrova D.M. [Wind power plants – an architectural element of the building]. *Architecture and modern information technologies*. Moscow Architectural Institute. Moscow. 2013;2(23):8. (in Russ.)
11. Grunichev I.A. [Architectural principles of integration of wind turbines in low-rise buildings in coastal areas]. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. Saint Petersburg: 2015;12:26–31. (in Russ.)
12. Karadag I., Yükses I. Wind Turbine Integration to Tall Buildings. *IntechOpen*. 2020:15. <https://doi.org/10.5772/intechopen.91650>
13. Li Q.S., Shu Z.R., Chen F.B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation. *Applied Energy*. 2016;165:777–788. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>;
14. Stankovic S., Campbell N., Harries A. Urban Wind Energy. London: Taylor & Francis Group. 2009:200. <https://doi.org/10.4324/9781849770262>;
15. Khazov P.A., Pozdeev M.L. Form optimization of energy-efficient buildings with wind turbines. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021;4(60):55–63. (in Russ.)
16. Smith R.F., Killa S. Bahrain world trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2007;16(4):429–439. DOI: 10.1002/tal.416
17. Roger F., Gilchrist R. Towards Zero Energy. A Case Study of the Pearl River Tower, Guangzhou, China. CTBUH 2008: 8th World Congress. Dubai. 2008. P. 11
18. Myagkov M.S., Alekseeva L.I. [Features of the wind regime of typical forms of urban development]. *Architecture and modern information technologies*. Moscow Architectural Institute. Moscow: 2014;1(26):15. (in Russ.)
19. Lampsi B.B., Shilov S.S., Khazov P.A., Fevral'skiykh A.V. Determination of aerodynamic coefficients of a large-span coverage by an experimental method. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2021;3(59):17–24. (in Russ.)
20. Lampsi B.B., Shilov S.S., Khazov P.A. Numerical and physical modeling of wind loads on long-span shell structures. *Vestnik MGSU*. 2022;17(1):21–31. (in Russ.) DOI: 10.22227/1997-0935.2022.1.21-31
21. Temam R. *Uravneniya Nav'ye – Stoksa. Teoriya i chislennyy analiz* [The Navier–Stokes equations. Theory and numerical analysis]. 2nd ed. Moscow, World Publ., 1981. 408 p.
22. Valger S.A., Fedorova N.N., Fedorov A.V. Structure of turbulent separated flow in the neighborhood of a plate-mounted prism of square section. *Thermophysics and Aeromechanics*. 2015;22(1):29–42. (in Russ.)
23. Wilcox D.C. Turbulence modeling for CFD. California. *DCW Industries*. Third edition. 536 p.

Информация об авторах:

Хазов Павел Алексеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры теории сооружений и технической механики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия, khazov.nngasu@mail.ru

Шилов Сергей Сергеевич, аспирант кафедры теории сооружений и технической механики, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, Нижний Новгород, Россия, sergey.shilov.1997@mail.ru

Information about the authors:

Pavel A. Khazov, PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of the Theory of Structures and Technical Mechanics, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia; khazov.nngasu@mail.ru

Sergey S. Shilov, post graduate student of the Department of the Theory of Structures and Technical Mechanics, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia; sergey.shilov.1997@mail.ru

Статья поступила в редакцию 22.03.2024, принята к публикации 26.03.2024.

The article was submitted on 22.03.2024; approved after review on 26.03.2024.