

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОРМ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ЗДАНИЙ С ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ТУРБИННЫМИ ВЕТРОГЕНЕРАТОРАМИ

П.А. Хазов

khazov.nngasu@mail.ru

О.И. Ведяйкина

razvnauki@rambler.ru

ННГАСУ, Нижний Новгород, Российская Федерация

Аннотация

Изучен вопрос возможности получения энергии от ветрогенераторов, установленных в городской черте, а не расположенных изолированно вдалеке от населенных пунктов. Целесообразность интегрирования ветрогенераторов в городскую среду рассмотрена на примере комплекса высотных зданий. Комплекс зданий представляет собой два вертикальных объекта, сужающихся по высоте и расположенных так, что их поверхности являются конструкциями для захвата и вовлечения ветровых потоков в энергогенерирующие установки. Выполнено численное компьютерное моделирование аэродинамических потоков, действующих на башни трех вариантов сечения: от наиболее плохообтекаемого к сечению со сглаженными углами, имеющему наиболее плавные формы. При двух характерных углах атаки проанализировано влияние формы здания на скорость потока, проходящего через ветрогенератор, а также сравнение эффективности расположения установок на различной высоте между двумя башнями. Проведено сравнение по коэффициенту увеличения скорости, как более объективному показателю, учитывающему изменение скорости на подходе к зданию и у ветрогенераторов. Показано, что наиболее эффективно использование наиболее плавных форм объектов, как сохраняющих сравнительные показатели вовлекаемых в энергогенерирующие установки потоков, при этом обладающих наименьшим аэродинамическим сопротивлением

Ключевые слова

Турбинные ветрогенераторы, энергоэффективность, встроенные энергогенерирующие установки, энергия ветра, моделирование, аэродинамическое сопротивление

Поступила 29.10.2024

Принята 21.02.2025

© Автор(ы), 2025

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант № 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>)

Введение. Развитие современных городов невозможно представить в отрыве от энергетической отрасли. Затраты электроэнергии для обеспечения крупных мегаполисов возрастают с каждым днем, что приводит к необходимости увеличения вырабатываемой энергии и качества ее производства.

В настоящее время приоритетные направления развития науки и техники, следуя современным «зеленым» трендам, становятся все более экологоцентрированными, популяризируются альтернативные источники энергии — энергия ветра, солнечная энергия, энергия из недр земли и пр. [1–11]. Одним из активно изучаемых источников является атмосфера, ветровые процессы в которой являются неиссякаемыми и непрерывными и при должной проработке позволяют аккумулировать весомые объемы энергии для последующей переработки в электричество. Это реализуется с использованием специальных установок — ветрогенераторов [1–6], преобразующих кинетическую энергию ветра в кинетическую энергию вращения ротора.

Вопросы целесообразности внедрения ветрогенераторов в систему городской инфраструктуры могут вызывать сомнения, однако при более подробном рассмотрении становится понятно, что преимущества таких технологий в достаточной мере покрывают недостатки. Так, затраты на мероприятия по уменьшению ветрового и вибрационного воздействий на здания и сооружения нивелируются экономией на расходах, связанных, например, с транспортировкой электроэнергии и обслуживанием установок [7–9]. Соотношение положительных и отрицательных аспектов, касающихся строительства изолированных и размещаемых в зданиях ветрогенераторов, наглядно показано ниже.

Изолированный ветрогенератор:

- располагается на специальном полигоне вдалеке от населенных пунктов;
- задействует только поток, покрывающий круг вращения лопастей;
- «следит» за направлением потоков за счет флюгерной системы;
- отличается дорогостоящей «транспортировкой» электроэнергии к потребителю;
- имеет усложненный доступ специалистов для обслуживания;
- не оказывает дополнительной вибрационной нагрузки на конструкции и рядом расположенные здания.

Интегрированный в здание ветрогенератор:

- располагается непосредственно в городской застройке и не требует специально отведенных больших площадей;

- «захватывает» потоки при правильном формообразовании зданий;
- чувствителен к направлению ветра;
- потребителем является непосредственно здание, несущее ветрогенератор;
- доступен для специалистов по мостам, несущим ветрогенератор;
- может оказывать серьезную шумовую, вибрационную и динамическую нагрузку на здание и окружающую застройку.

При горизонтальном расположении оси ротора ветрогенератора необходимо обеспечение максимального захвата воздушных потоков для наиболее рационального использования энергии ветра и ее последующего преобразования в электрическую энергию. Для решения этой задачи необходимо спроектировать такую форму башен, которая будет обеспечивать наибольшие значения коэффициентов увеличения скорости аэродинамических потоков. Основным отличием от зданий с интегрированными ветрогенераторами, имеющими вертикальную ось ротора, является необходимость проектирования комплекса высотных объектов и устройства специальных мостов, предназначенных для непосредственного расположения ветрогенераторов. Таким образом, аэродинамическая картина усложняется и на первый план выходят задачи, связанные с прогнозированием обтекания систем тел. При оценке аэродинамических особенностей комплексов объектов сложной геометрической формы наблюдается изменение статических характеристик каждого объекта ввиду непосредственного влияния близко расположенных зданий на воздушные потоки [12].

Материалы и методы. Для поиска оптимальной формы рационально принять башни с линейно уменьшающимся по высоте профилем (рис. 1), что будет приводить к минимизации статической составляющей ветровой нагрузки и уменьшению инерционных сил от ее динамической составляющей. Рассмотрены три формы башен в плане: 1) прямоугольная (№ 1); 2) треугольная (№ 2); 3) треугольная со скругленными углами (№ 3). Ожидается, что переход между формами будет улучшать обтекаемость объектов и уменьшать ветровые нагрузки, при этом скорость потоков в канале между башнями не будет значительно изменяться.

Оптимизация преследует цель определения такой формы, которая будет менее чувствительна к небольшим изменениям направленности ветрового потока. Другими словами, максимизация скорости потоков при угле атаки на главный фасад здания не является доминантным критерием наиболее оптимальной формы, поскольку направленность потоков является случайной функцией, зависящей от большого числа параметров. Наиболее рациональная форма должна обеспечивать стабильный поток

в канале между башнями и приводить к максимизации вырабатываемой электроэнергии за продолжительный период времени.

Трехмерная визуализация геометрии изучаемых объектов приведена на рис. 1, а. Кроме технических критериев, связанных с аэродинамическими нагрузками и скоростями движения воздушных потоков в области установки ветрогенератора, следует отметить необходимость согласования с архитектурными задачами, а именно с поиском эстетического очертания, обеспечивающего необходимую выразительность объекта.

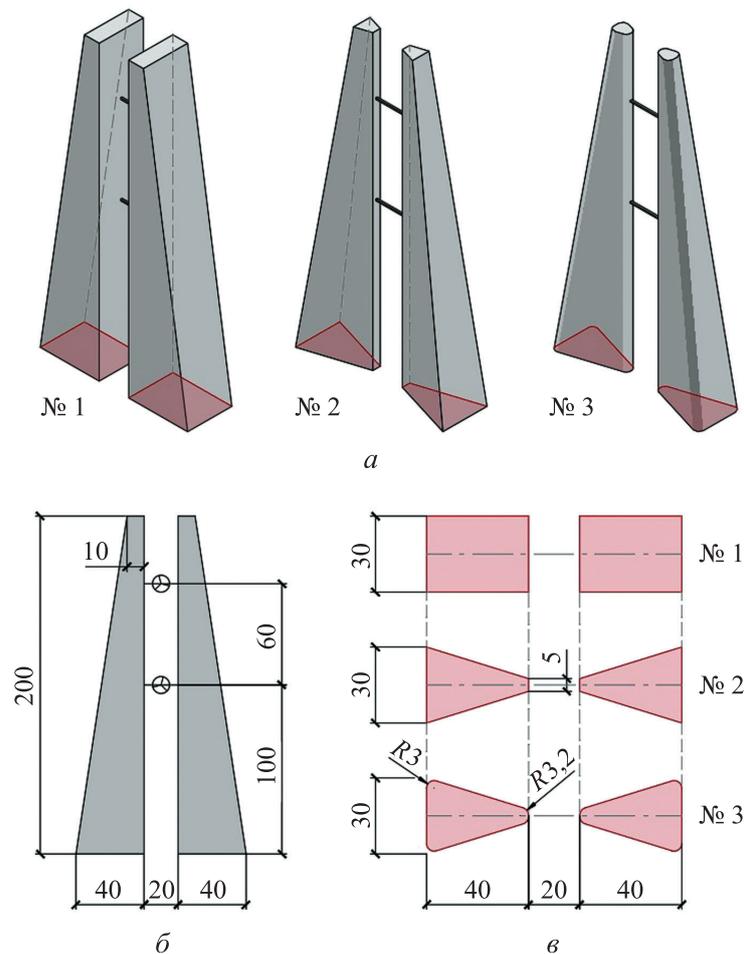


Рис. 1. Изучаемые формы (а), профиль (б) и планы башен (в) комплекса высотных зданий с интегрированными ветрогенераторами

Численное компьютерное моделирование заключается в решении систем дифференциальных уравнений Навье — Стокса, описывающих обтекание твердых тел потоками жидкости или газа [13]. Осуществляется совместное применение уравнений движения

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right]; \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right]; \\ \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\mu}{\rho} \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right] \end{aligned}$$

и уравнения неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0.$$

Здесь u, v, w — проекции скоростей движения частиц в элементарных потоках на оси принятой глобальной системы координат XYZ; t — время; ρ — плотность аэродинамической среды (атмосферы); p — давление в изучаемой точке пространства; μ/ρ — коэффициент кинематической вязкости среды, μ — коэффициент динамической вязкости [12, 13].

Система уравнений (1) имеет матричное представление

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} + \frac{\mu}{\rho} \Delta \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \vec{f},$$

где \vec{V} — поле векторов скоростей; ∇ — оператор набла; Δ — векторный оператор Лапласа; \vec{f} — поле векторов массовых сил.

Использование формы системы уравнений движения возможно в случаях взаимодействия на низких скоростях потока со статичными объектами, когда эффектом сжимаемости среды можно пренебречь. В общем случае система усложняется с учетом сжимаемости среды ($\rho \neq \text{const}$), проявляющейся при значительно больших скоростях [14–17].

В настоящее время решение системы уравнений движения аналитическим методом невозможно. Это обусловлено его сложной нелинейной природой. Поэтому для получения приближенного решения приходится использовать численные методы. Суть этих методов заключается в дискретизации расчетной области, т. е. разбиении ее на множество элементарных объемов (конечных элементов). Размер этих элементов выбирается исходя из требований точности и вычислительных ресурсов. Распределение искомых величин (давления, скорости и др.) внутри каждого объема аппроксимируется определенными функциями (например, линейными).

Компьютерное моделирование ветрового потока выполняется в программно-вычислительном комплексе Ansys CFX [18, 19], модуль Fluent,

для чего созданы геометрические копии зданий и окружающего их пространства. Аэродинамические потоки заданы с учетом увеличения их скорости по высоте объектов¹ [20].

Моделирование аэродинамического обтекания проведено для углов ветровой атаки 0 и 45° к главному фасаду здания. Увеличение угла атаки более 45° не рационально, поскольку практически полностью прекращается вращение турбины ветрогенератора, а проектирование ветрогенераторов со следящей флюгерной системой в такой постановке задачи невозможно.

Результаты компьютерного моделирования. Результаты моделирования, в которых заметны определенные закономерности аэродинамического обтекания зданий, приведены на рис. 2.

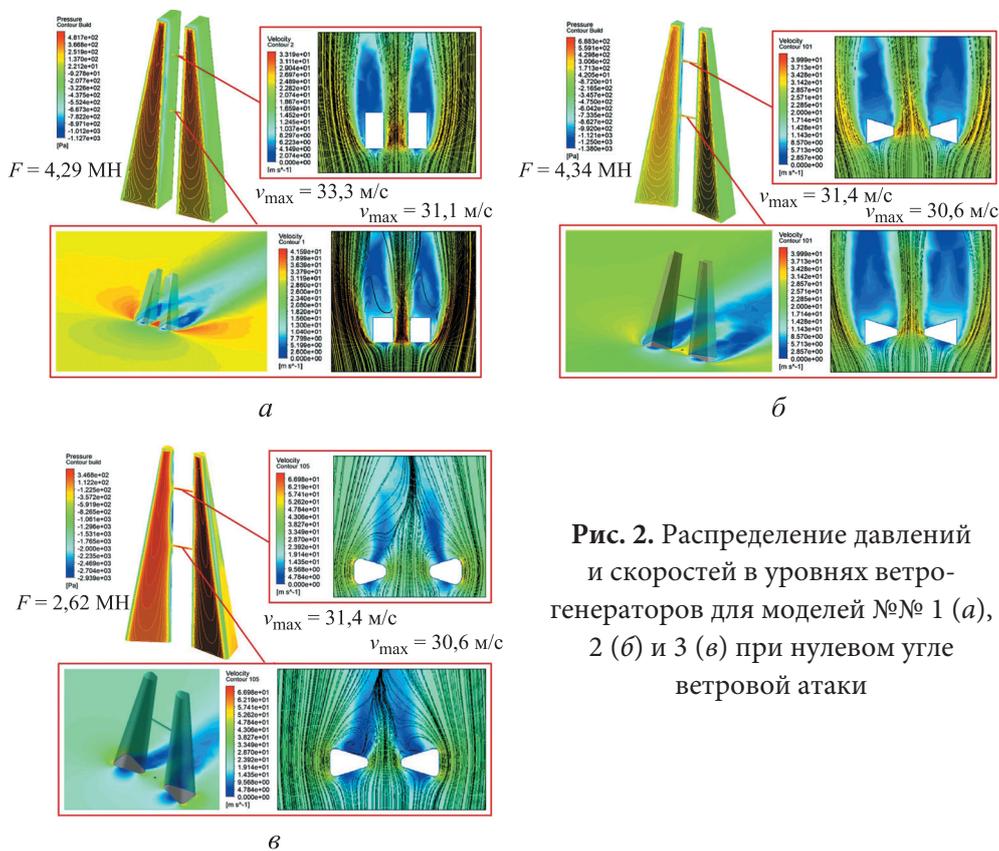


Рис. 2. Распределение давлений и скоростей в уровнях ветрогенераторов для моделей №№ 1 (а), 2 (б) и 3 (в) при нулевом угле ветровой атаки

Скорости движения воздушных потоков в уровне обеих установок для каждой рассмотренной модели имеют близкие значения в рамках од-

¹СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07–85*. М., Минстрой России, 2016.

ной модели. Это достигается наложением двух противоположных эффектов: с одной стороны, скорости воздушного невозмущенного потока нарастают по высоте, с другой, — уменьшающаяся площадь здания на высоких отметках меньше способствует захвату воздушных масс. Таким образом, при взаимодействии с аэродинамической средой ветрогенераторы будут задействованы в равной степени, а их детали будут подвержены одинаковому износу, вырабатывая сопоставимые объемы энергии.

Результаты сравнения скоростей для трех моделей по уровням установки ветрогенераторов приведены в таблице. Скорости воздушных потоков в модели № 1 на 7...8 % превосходят аналогичные показатели в моделях № 2 и № 3. При анализе эффективности формы каждой модели важным показателем является не абсолютное значение скорости потоков, а коэффициент увеличения скорости, равный отношению скорости в канале к скорости на подходе к зданию: $v = v_k / v_{вх}$.

**Зависимость скорости, коэффициента увеличения скорости
и суммарных реакций от формы здания и угла ветровой атаки**

Модель	Расположение ветрогенератора	Скорость, м/с, при угле ветровой атаки, град		Коэффициент увеличения скорости при угле ветровой атаки, град		Суммарная реакция, МН, при угле ветровой атаки, град	
		0	45	0	45	0	45
1	Нижнее	33,7	25,8	1,36	1,04	4,29	4,21
	Верхнее	36,2	26,7	1,33	0,98		
2	Нижнее	31,1	31,9	1,25	1,28	4,34	3,59
	Верхнее	33,3	30,2	1,22	1,10		
3	Нижнее	30,6	26,3	1,15	1,06	2,62	2,19
	Верхнее	31,4	27,8	2,05	1,02		

Согласно представленным в таблице данным, все модели имеют сравнимые показатели аэродинамических эффектов. Уровень влияния формы, критерием которого является коэффициент увеличения скорости, ожидаемо оказывается более значим на нижних уровнях в силу низких значений скорости набегающего потока воздуха.

Важным критерием для принятия той или иной формы поперечного сечения башни также является динамика коэффициента увеличения скорости движения потоков в рабочей зоне ветрогенератора в зависимости от изменения угла ветровой атаки. Результаты моделирования для трех моделей при угле атаки 45° приведены на рис. 3.

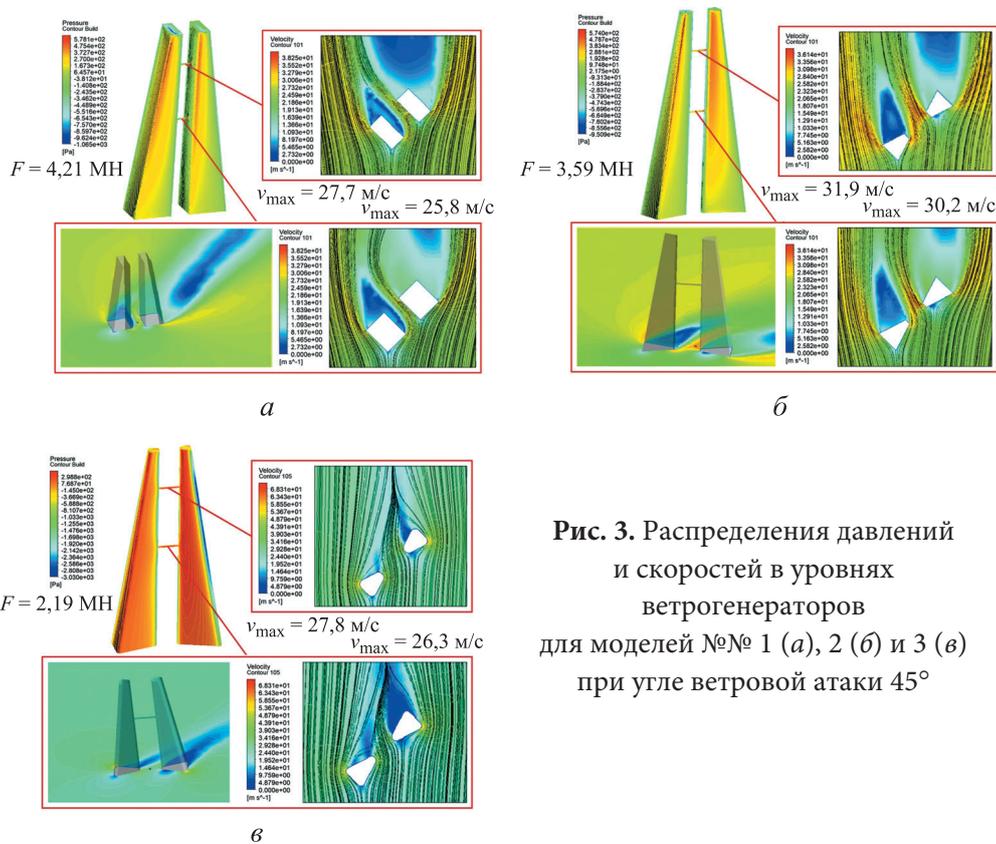


Рис. 3. Распределения давлений и скоростей в уровнях ветрогенераторов для моделей №№ 1 (а), 2 (б) и 3 (в) при угле ветровой атаки 45°

Можно наблюдать, что абсолютные значения скоростей потоков для модели № 1 при изменении угла ветровой атаки понизились в среднем на 31 %, для модели № 2 — на 4 %, для модели № 3 — на 15 %. Аналогичную динамику показывает и изменение коэффициентов увеличения скорости ветровых потоков при изменении угла ветровой атаки (см. таблицу).

Модель № 1 является наименее обтекаемой и создает зону вакуума в рабочей области ветрогенератора, тем самым снижая преимущество в энергоэффективности перед моделями № 2 и № 3 при меньших значениях угла ветровой атаки.

Модель № 2 по сравнению с остальными является наиболее адаптивной к переменному направлению ветра, однако отличие аэродинамического характера ее обтекания от модели № 1 заключается в том, что явление срыва вихрей, демонстрируемое обеими картинками, в первом случае создает упомянутую зону вакуума в рабочей области ветрогенератора, а во втором — амплитудный скачок ветрового ускорения. Большие абсолютные значения скоростей во втором случае — следствие явления срыва вихрей, а не естественного вовлечения воздушных масс, что может как по-

высить энергоэффективность, так и привести к стремительному изнашиванию механизма ветрогенератора.

Наиболее благоприятная аэродинамическая картина наблюдается для модели № 3, где при изменении угла ветровой атаки, хотя и происходит снижение абсолютных значений скоростей (на 15 %) и коэффициентов ускорения, но практически полностью отсутствует турбулентный след.

Кроме эффективной работы ветрогенераторов необходимым условием по-прежнему остается обеспечение экономической эффективности строительства объекта. В качестве глобального критерия используется значение равнодействующей всех аэродинамических сил, распределенных по поверхности объекта.

Результаты сравнения реакций каждой модели на аэродинамическое воздействие для двух углов ветровой атаки приведены в таблице. Глобальные реакции для моделей № 1 и № 2 практически не отличаются, в модели № 3 за счет применения более обтекаемой формы удалось снизить реакцию в 2 раза. Это в совокупности с наиболее мягким характером аэродинамического обтекания и приемлемым уровнем адаптивности модели к изменению угла ветровой атаки может свидетельствовать о том, что модель № 3 является наиболее рациональной при проектировании подобных комплексов.

Выводы. При проектировании зданий с интегрированными ветрогенераторами процесс геометрической оптимизации формы поперечного сечения башни (башен) должен быть направлен на смягчение характера аэродинамического взаимодействия воздушных масс и объекта за счет рассмотрения более обтекаемых форм. Эта форма является компромиссной при решении противоположных задач — уменьшение контакта с воздушными массами для снижения общей реакции объекта и вовлечение как можно больших объемов воздуха в рабочую зону ветрогенератора.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Stankovic S., Campbell N., Harries A. Urban wind energy. Taylor & Francis, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781849770262>
- [2] Наумов И.И., Моторин Д.Е., Кочубей А.Л. и др. Повышение энергоэффективности и модернизация энергетических систем в России: энергоэффективность и энергоменеджмент. *Дневник науки*, 2021, № 10, ст. 35. EDN: ТТΥΚΕF. DOI: https://doi.org/10.51691/2541-8327_2021_10_5
- [3] Хазов П.А., Поздеев М.Л. Оптимизация форм энергоэффективных зданий с ветрогенераторами. *Приволжский научный журнал*, 2021, № 4, с. 55–63. EDN: UCTSNV

- [4] Ерофеев В.И., Сатанов А.А., Хазов П.А. и др. Рациональная ориентация объектов с интегрированными ветрогенераторами по критерию максимизации вырабатываемой электроэнергии. *Машиностроение и инженерное образование*, 2023, № 4, с. 39–46. EDN: EOQUZZ
- [5] Елистратов В.В., Боброва Д.М. Ветроэнергетические установки — архитектурный элемент здания. *Архитектура и современные информационные технологии*, 2013, № 2, с. 8.
- [6] Тебуев В.В. Выработка электроэнергии с размещением ветрогенератора в вертикальном вытяжном воздушном канале в конструкции жилого здания. Патент РФ 2369772. Заявл. 12.07.2007, опубл. 10.10.2009.
- [7] Karadag I., Yüksek I. Wind turbine integration to tall buildings. *Intech Open*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.91650>
- [8] Smith R.F., Killa S. Bahrain world trade Center (BWTC): The first large-scale integration of wind turbines in a building. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 2007, vol. 16, no. 4, pp. 429–439. DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.416>
- [9] Li Q.S., Shu Z.R., Chen F.B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation. *Appl. Energy*, 2016, vol. 165, pp. 777–788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>
- [10] Клюзко В.М. Приемы объемно-планировочных решений формирования энергоэффективных высотных полифункциональных зданий, использующих энергию ветра. *Архитектура и современные информационные технологии*, 2015, № 2.
- [11] Юрченко И.В. Обзор рынка ветроэнергетики России. *Экономические науки*, 2023, № 3, с. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.14451/1.220.18>
- [12] Satanov A.A., Erofeev V.I., Khazov P.A. Oscillations of structures interacting in the aerodynamic medium. *REEPE*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479722>
- [13] Хазов П.А., Ведяйкина О.И. Компьютерное моделирование аэродинамического обтекания и оценка пешеходной аэродинамической комфортности комплекса зданий. *Омский научный вестник*, 2024, № 3, с. 56–63. DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-191-56-63>
- [14] Герасимов С.И., Лобастов С.А., Сироткина А.Г. и др. Регистрация воздушных ударных волн контактным и бесконтактным методом. *Датчики и системы*, 2019, № 2, с. 45–49.
- [15] Герасимов С.И., Сироткина А.Г., Трепалов Н.А. и др. Оценка погрешности оптико-физического метода измерения параметров воздушной ударной волны. *Измерительная техника*, 2019, № 4, с. 38–41. EDN: TPHYUS
- [16] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Kuzmin V.A., et al. Shadow scheme with selective range of photoregistration in aerodynamic tests. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.26583/sv.11.2.01>

[17] Герасимов С.И., Одзериho И.А., Герасимова Р.В. и др. Безопасные условия проведения исследований с баллистическими установками. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 9 (714), с. 105–114.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-105-114>

[18] Басов К.А. ANSYS для конструкторов. М., ДМК Пресс, 2016.

[19] Газаров А.Р. Применение метода конечных элементов для исследования аэродинамики зданий. *Известия ТулГУ. Технические науки*, 2020, № 12, с. 282–284. EDN: EAUWXV

[20] Шилов С.С., Кашкина Е.С., Хазов П.А. Численное моделирование и оптимизация ориентации высотного здания по розе ветров. *Приволжский научный журнал*, 2023, № 3, с. 42–50. EDN: FCMGPK

Хазов Павел Алексеевич — д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры теории сооружений и технической механики ННГАСУ (Российская Федерация, 603000, Нижний Новгород, Ильинская ул., д. 65).

Ведяйкина Ольга Ивановна — канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры общей физики и теоретической механики ННГАСУ (Российская Федерация, 603000, Нижний Новгород, Ильинская ул., д. 65).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Хазов П.А., Ведяйкина О.И. Сравнительный анализ форм энергоэффективных зданий с интегрированными турбинными ветрогенераторами. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2025, № 5 (122), с. 41–54.

EDN: UGCCFK

COMPARATIVE ANALYSIS OF SHAPES OF THE ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS WITH THE INTEGRATED TURBINE WIND GENERATORS

P.A. Khazov

O.I. Vediaikina

khazov.nngasu@mail.ru

razvnauki@rambler.ru

NNGASU, Nizhny Novgorod, Russian Federation

Abstract

The paper analyzes a problem of the possible power generation using the wind generators installed within the urban areas, rather than at the isolated locations far from the populated areas. It considers feasibility of integrating wind generators into the urban environment on the example a high-rise buildings complex. The complex consists of two vertical buildings taper-

Keywords

Turbine wind generators, energy efficiency, integrated power-generating units, wind energy, simulation, aerodynamic resistance

ing in height and positioned in such a way that their surfaces act as structures for capturing and drawing wind flows into the power-generating units. The paper provides a numerical computer simulation of the aerodynamic flows acting on the towers with the three cross-sections from the least streamlined to a cross-section with the smoothed corners having the most gradual shapes. It analyzes the building shape influence on the velocity of a flow passing through the wind generator at the two characteristic angles of attack, and compares the efficiency of positioning the units at different heights between the two towers. The comparison is made using the velocity increase coefficient, as a more objective indicator that takes into account alteration in velocity as the flow approaches the building and enters the wind generator. The paper shows that using the smoother shapes for an object is most efficient, as they maintain comparative characteristics of the flows entering the power-generating units while providing the lowest aerodynamic resistance

Received 29.10.2024

Accepted 21.02.2025

© Author(s), 2025

The work was financially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 22-13-20009, <https://rscf.ru/project/22-13-20009/>)

REFERENCES

- [1] Stankovic S., Campbell N., Harries A. Urban wind energy. Taylor & Francis, 2009. DOI: <https://doi.org/10.4324/9781849770262>
- [2] Naumov I.I., Motorin D.E., Kochubey A.L., et al. Improving energy efficiency and modernizing energy systems in Russia: energy efficiency and energy management. *Dnevnik nauki*, 2021, no. 10, st. 35 (in Russ.). EDN: TTYKEF. DOI: https://doi.org/10.51691/2541-8327_2021_10_5
- [3] Khazov P.A., Pozdeev M.L. Form optimization of energy-efficient buildings with wind turbines. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2021, no. 4, pp. 55–63 (in Russ.). EDN: UCTSNV
- [4] Erofeev V.I., Satanov A.A., Khazov P.A., et al. Rational orientation of objects with integrated wind generators according to the criteria of maximizing the generated electricity. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie*, 2023, no. 4, pp. 39–46 (in Russ.). EDN: EOQUZZ
- [5] Elistratov V.V., Bobrova D.M. The wind generator — architectural element of the building. *Arkhitektura i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* [Architecture and Modern Information Technologies], 2013, no. 2, p. 8 (in Russ.).

- [6] Tebuev V.V. Vyrabotka elektroenergii s razmeshcheniem vetrogeneratora v vertikalnom vytyazhnom vozdushnom kanale v konstruktsii zhilogo zdaniya [Electric power generation with arrangement of wind generator in vertical exhaust air duct in domestic building structure]. Patent RU 2369772. Appl. 12.07.2007, publ. 10.10.2009 (in Russ.).
- [7] Karadag I., Yüksek I. Wind turbine integration to tall buildings. *Intech Open*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.91650>
- [8] Smith R.F., Killa S. Bahrain world trade Center (BWTC): the first large-scale integration of wind turbines in a building. *Struct. Des. Tall Spec. Build.*, 2007, vol. 16, no. 4, pp. 429–439. DOI: <https://doi.org/10.1002/tal.416>
- [9] Li Q.S., Shu Z.R., Chen F.B. Performance assessment of tall building-integrated wind turbines for power generation. *Appl. Energy*, 2016, vol. 165, pp. 777–788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.114>
- [10] Klyuzko V.M. Volume-planning methods formation of high-rise polyfunctional buildings an energy efficient that use wind power. *Arkhitektura i sovremennyye informatsionnyye tekhnologii* [Architecture and Modern Information Technologies], 2015, no. 2 (in Russ.).
- [11] Yurchenko I.V. Overview of the Russian wind energy market. *Ekonomicheskie nauki* [Economic Sciences], 2023, no. 3, pp. 18–24 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.14451/1.220.18>
- [12] Satanov A.A., Erofeev V.I., Khazov P.A. Oscillations of structures interacting in the aerodynamic medium. *REEPE*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/REEPE60449.2024.10479722>
- [13] Khazov P.A., Vedyaykina O.I. Computer modeling of aerodynamic flow and assessment of pedestrian aerodynamic comfort of a building complex. *Omskiy nauchnyy vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2024, no. 3, pp. 56–63 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.25206/1813-8225-2024-191-56-63>
- [14] Gerasimov S.I., Lobastov S.A., Sirotkina A.G., et al. Registration of air shock waves by contact and contactless methods. *Datchiki i sistemy* [Sensors & Systems], 2019, no. 2, pp. 45–49 (in Russ.).
- [15] Gerasimov S.I., Sirotkina A.G., Trepalov N.A., et al. Estimation of the error of the optophysical method for measuring the parameters of an air shock wave. *Meas. Tech.*, 2019, vol. 62, no. 4, pp. 342–346. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11018-019-01627-9>
- [16] Gerasimov S.I., Kikeev V.A., Kuzmin V.A., et al. Shadow scheme with selective range of photoregistration in aerodynamic tests. *Scientific Visualization*, 2019, vol. 11, no. 2, pp. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.26583/sv.11.2.01>
- [17] Gerasimov S.I., Odzerikho I.A., Gerasimova R.V., et al. Safe conditions for conducting tests using ballistic facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2019, no. 9 (714), pp. 105–114 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2019-9-105-114>
- [18] Basov K.A. ANSYS dlya konstruktorov [ANSYS for designers]. Moscow, DMK Press Publ., 2016.

[19] Gazarov A.R. Application of finite element method to study aerodynamics of buildings. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [News of the Tula State University. Technical Sciences], 2020, no. 12, pp. 282–284 (in Russ.). EDN: EAUWXV

[20] Shilov S.S., Kashkina E.S., Khazov P.A. Numerical simulation and optimization of the orientation of a high-rise building by the wind rose. *Privolzhskiy nauchnyy zhurnal* [Privolzhsky Scientific Journal], 2023, no. 3, pp. 42–50 (in Russ.). EDN: FCMGPK

Khazov P.A. — Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Theory of Structures and Technical Mechanics, NNGASU (Ilyinskaya ul. 65, Nizhny Novgorod, 603000 Russian Federation).

Vediaikina O.I. — Cand. Sc. (Phys.-Math.), Assoc. Professor, Department of General Physics and Theoretical Mechanics, NNGASU (Ilyinskaya ul. 65, Nizhny Novgorod, 603000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Khazov P.A., Vediaikina O.I. Comparative analysis of shapes of the energy-efficient buildings with the integrated turbine wind generators. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2025, no. 5 (122), pp. 41–54 (in Russ.). EDN: UGCCFK