

EDN: GRDMNA

УДК 69.036.01

Identification of Dependencies Between Aerodynamic Conditions and Configuration of a Single Building

Elizaveta V. Vdovina^{*a} and Sergey S. Dobrosmyslov^b

^a Siberian Federal University

Krasnoyarsk, Russian Federation

^b Krasnoyarsk Scientific Center SB RAS

Krasnoyarsk, Russian Federation

Received 14.06.2023, received in revised form 20.06.2023, accepted 07.07.2023

Abstract. This article discusses the study of the influence of one building on the wind regime, with a change in the number of floors, the angle of rotation relative to the prevailing flow and the size of the building in the plan by using mathematical modeling. The works describing the aerodynamics of buildings, the shape and structure of the wind flow are analyzed. The current domestic and foreign standards regulating the wind regime in urban development are considered. Aerodynamic conditions are described by the size of the wind shadow and the negative pressure area. Correlation and regression analysis was carried out and equations describing each of the aerodynamic characteristics were obtained. The revealed dependencies helped to determine the most optimal configuration of the building, contributing to air purging and improving the quality of atmospheric air. The study was conducted taking into account the wind regime of the city of Krasnoyarsk.

Keywords: building aerodynamics, mathematical modeling, wind comfort environment, correlation and regression analyses.

Citation: Vdovina, E. V., Dobrosmyslov, S. S. Identification of dependencies between aerodynamic conditions and configuration of a single building. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(5), 619–634. EDN: GRDMNA



Выявление зависимости между аэродинамическими условиями и конфигурацией одиночного здания

Е. В. Вдовина^а, С. С. Добросмыслов^б

*^а Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

*^бКрасноярский научный центр СО РАН
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотция. В данной работе проведено исследование влияния одного здания на ветровой режим при изменении этажности, угла размещения относительно преобладающего потока и размеров здания в плане, с применением математического моделирования. Проанализированы работы, описывающие аэродинамику зданий, форму и структуру потока ветра. Рассмотрены действующие отечественные и зарубежные нормативы, регулирующие ветровой режим в городской застройке. Аэродинамические условия описываются размерами ветровой тени и области отрицательного давления. Проведен корреляционно-регрессионный анализ и получены уравнения, описывающие каждую из аэродинамических характеристик. Выявленные зависимости помогли определить наиболее оптимальную конфигурацию здания, способствующую продуваемости и улучшению качества атмосферного воздуха с учетом ветрового режима города Красноярск.

Ключевые слова: аэродинамика здания, математическое моделирование, ветровой комфорт, корреляционно-регрессионный анализ.

Цитирование: Вдовина Е. В. Выявление зависимости между аэродинамическими условиями и конфигурацией одиночного здания / Е. В. Вдовина, С. С. Добросмыслов. Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(5). С. 619–634. EDN: GRDMNA

Введение

Аэродинамика зданий активно изучается для описания сложных турбулентных потоков, их формы и структуры, так как урбанизация может как ускорить ветровой поток, так и замедлить его [1]. За зданием образуется зона застоя, характеризующаяся замкнутой циркуляцией воздушных потоков и, соответственно, плохой проветриваемостью. В условиях загрязненности воздушно-го бассейна именно в этой зоне образуется скопление вредных веществ, что имеет негативное влияние с точки зрения экологии. Зона застоя может описываться как ветровая тень или же как аэродинамическая тень. Эти понятия имеют схожий смысл, касаясь описания ветрового потока, но не одно из них не включает того, что за зданием образуется область отрицательного давления, которая способствует задерживанию вредных веществ. Течение с наветренной стороны здания характеризуется наличием нисходящих потоков в нижней части фасада, у подветренной стороны происходит сильное понижение давления [2].

Исследования ветрового воздействия ведутся по трем направлениям. Первый метод – естественный (полевой), с использованием метеорологического оборудования, который рассмотрен в работе С. В. Михайлюты [3]. Второй метод – экспериментальный, с использованием физических моделей. Наиболее распространен эксперимент в аэротрубе, примененный в ис-

следовании Поддаевой О. И., где приведена методология проведения эксперимента и сравнение с расчетными аэродинамическими коэффициентами [4].

Наиболее распространен третий метод исследований – математический, с использованием программных комплексов. Для задач аэродинамики рассматриваются ламинарный и турбулентный потоки, с решением уравнений Навье-Стокса и Рейнольдса. Данную задачу можно решить в разных программных комплексах, таких как: Autodesk Flow Design [5, 6], ANSYS [7, 8, 9], SigmaFlow [1], ENVI-met [10,11] и Star-CCm+ [12].

По объекту исследования работы в данной области можно разделить на изучение одиночных зданий и квартальной застройки. Одиночные здания рассматриваются при вариации одного из параметров: геометрических размеров [6], высоты здания [5], угла поворота относительно преобладающего потока [4], а далее выявляются изменения ветрового давления, аэродинамических коэффициентов и формы, структуры потока.

Квартальные застройки рассматриваются или уже для существующих кварталов [1, 7, 10, 12] для выведения рекомендаций по улучшению экологической безопасности, или изучаются элементарные модели застроек для выявления аэродинамических закономерностей [9, 11].

Стоит отметить, что при проектировании квартала для установления расстояния между объектами руководствуются требованиями инсоляции и пожаробезопасности. К сожалению, упоминание о ветровом комфорте в отечественной нормативной литературе отсутствует. В зарубежных нормативах расчет ветрового комфорта обязателен при проектировании кварталов в Европейских странах, Японии и Америке. В Нидерландах приняты немецкие нормы NEN 8100, в Америке используются нормы, основанные на исследованиях Т.В. Лоусона, а в Японии используются нормы, разработанные А.Ф.Е Вайсом и А. Д. Пендварденем. Их объединяют значения, что при скорости ветра более 5 м/с ветровой комфорт не обеспечивается. Нижняя граница варьируется от 0,4–2,5 м/с [8].

В промышленном городе Красноярске, в силу географических особенностей и плотной застройки города, наблюдаются низкие скорости ветра и, как следствие, регулярное превышение уровня предельно допустимых концентраций (ПДК). Экологическую проблему качества атмосферного воздуха требуется решать комплексно, поэтому со стороны строительной сферы требуется подобрать оптимальную конфигурацию зданий, которая бы обеспечила наилучшие аэродинамические условия.

Целью исследования являлось установление зависимости между аэродинамическими условиями, которые описываются областью отрицательного давления, и областью низких скоростей ветра, а именно потоков со скоростью менее 1,2 м/с. Требовалось установить приоритетность факторов на формирование зон застоя, найти корреляционную связь между оценочными характеристиками и подобрать оптимальные значения параметров здания в условиях ветрового режима г. Красноярска.

Методология исследования

В качестве объекта исследования было выбрано одиночное здание как элементарная единица застройки. В ходе исследования изменялись следующие параметры:

- Этажность (9–14–18–25 этажей);
- Угол поворота здания относительно потока (0° – 30° – 45° – 60° – 90°);

- Ширина здания (12–15–18–21 м);
- Длина здания, которая варьируется от длины секции (30–60–90 м).

Исследования велись с применением математического моделирования с использованием программного комплекса COMSOL Multiphysics, который выполняет расчеты, основанные на уравнении массопереноса методом конечных элементов.

Для корреляционно-регрессионного анализа полученных данных применяется программа Statistica SR. Данный софт позволяет вывести уравнение регрессии и коррелировать полученные зависимости в поисках оптимальных параметров жилой застройки.

Математическая модель

Ветровой поток рассматривается как движение несжимаемой жидкости и описывается системой дифференциальных уравнений Навье-Стокса.

Общий вид уравнения Навье-Стокса (1):

$$\begin{aligned} p(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} &= \nabla[-p\mathbf{I} + (\eta + \eta_T)(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)] + F, \\ \nabla\mathbf{u} &= 0. \end{aligned} \quad (1)$$

Решение уравнения Навье-Стокса осуществлялось в рамках приближения k-ε (2):

$$\begin{aligned} p\mathbf{u}\nabla k &= \nabla[\eta + (\eta_T/\sigma_T)\nabla k] + \eta_T P(\mathbf{u}) - p\varepsilon, \\ p\mathbf{u}\nabla\varepsilon &= \nabla[(\eta + \eta_T/\sigma_\varepsilon)\nabla\varepsilon] + \frac{C_{\varepsilon 1}\varepsilon\eta_T P(\mathbf{u})}{k} - \frac{C_{\varepsilon 2}p\varepsilon^2}{k}, \\ P(\mathbf{u}) &= \frac{\nabla\mathbf{u}}{(\nabla\mathbf{u} + (\nabla\mathbf{u})^T)}; \eta_T = pC_\mu k^2/\varepsilon, \end{aligned} \quad (2)$$

где p – давление, Па; F – поле внешних сил; ε – энергия, Дж; Н/м^3 ; k – кинетическая энергия объема, Дж/м^3 ; C , σ – коэффициент, учитывающий диффузию энергии; η , η_T – динамическая и турбулентная вязкость, $\text{Па} \cdot \text{с}$;

Математическая модель турбулентного движения воздуха реализована в программном комплексе COMSOL Multiphysics со следующими исходными данными:

- Общие размеры модели $A \times B \times H = 200 \times 200 \times 200$ м;
- Размер сетки – нормальный;
- Скорость ветра = 2,5 м/с – среднегодовая скорость ветра в г. Красноярске;
- Используемые материалы: воздух, ячеистый бетон;
- Тип расчета – стационарный.

Анализ результатов исследования

Выполнен расчет 180 вариаций моделей одиночного здания следующих площадей: 30x12 м, 30x15 м, 30x18 м, 30x21 м, 60x12 м, 60x15 м, 60x18 м, 60x21 м, 90x18 м. Для каждого варианта площади было 4 варианта высоты здания и 5 вариантов угла поворота. Для определения ветровой тени выводился объем области скорости ветра менее 1,2 м/с, что соответствует 1 баллу по шкале Бофорта. Для определения аэродинамической тени выводился объем зоны отрицательного давления ($p < 0$). Графические результаты моделирования представлены на рис. 1–4.

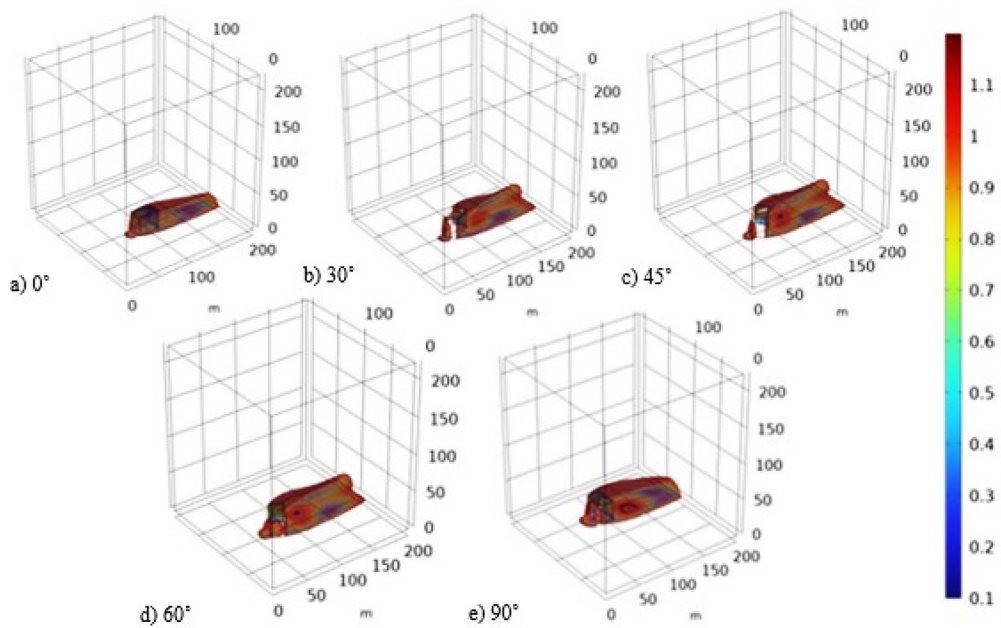


Рис. 1. Область низких скоростей ветра при изменении угла поворота здания с площадью $S=30 \times 18$ м и высотой $H = 27$ м, м/с

Fig. 1 – Low-speed velocity field at different angles of rotation for a single building with an area of $S = 30 \times 18$ m and a height of $H = 27$ m, m/s

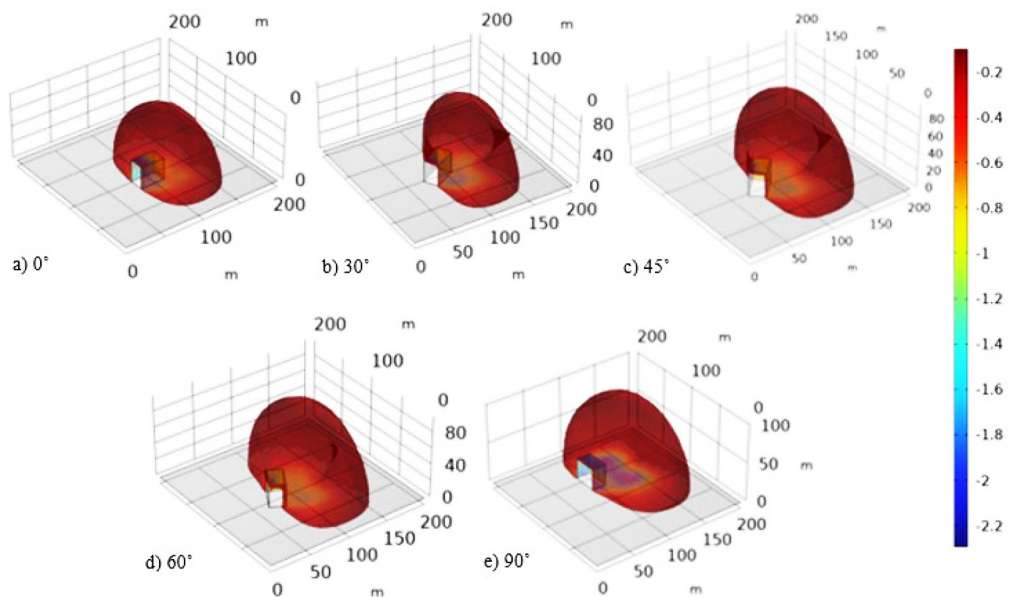


Рис. 2. Область отрицательного давления за зданием с площадью $S = 30 \times 18$ м и высотой $H = 27$ м, Па

Fig. 2. Negative pressure area behind a single building with $S = 30 \times 18$ m and a height of $H = 27$ m, Pa

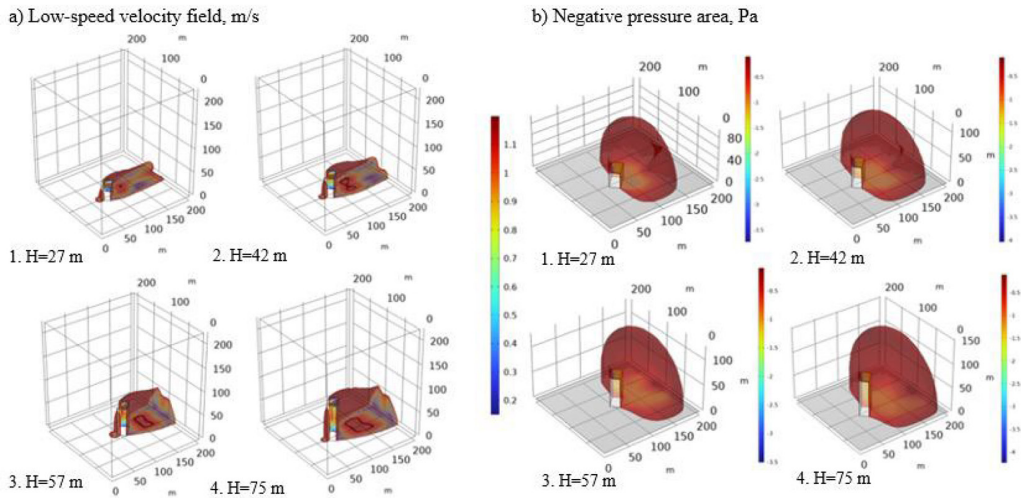


Рис. 3. Графические результаты одиночного здания площадью $S = 30 \times 18$ м и $\alpha = 45^\circ$

Fig. 3. Graphical results of a single building with an area of $S = 30 \times 18$ m and $\alpha = 45^\circ$

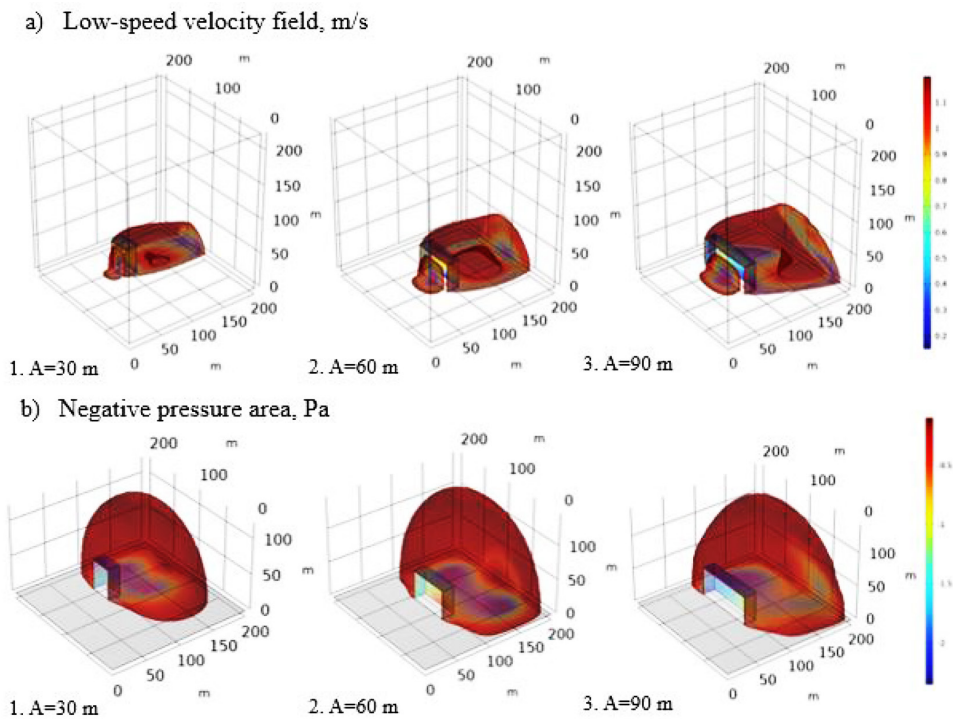


Рис. 4. Графические результаты одиночного здания шириной $B=18$ м, высотой $H=42$ м и $\alpha=90^\circ$

Fig. 4. Graphical results of a single building with width $B=18$ m, height $H=42$ m and $\alpha=90^\circ$

На качественном уровне наблюдается тенденция увеличения каждой характеристики зоны застоя с увеличением высоты здания и угла поворота. На данном этапе анализа отмечается, что отношение области низких скоростей ветра к области отрицательного давления варьируется от 0,13–0,24.

Корреляционно-регрессионный анализ

Для получения математического выражения размеров зоны застоя от параметров одиночного здания применен корреляционно-регрессионный анализ. Для многофакторной корреляционной модели объема области низких скоростей ветра (y) подобраны следующие факторы, которые оказывают наиболее существенное влияние на ее уровень: A (x_1) – длина здания, м; B (x_2) – ширина здания, м; H (x_3) – высота здания, м; α (x_4) – угол поворота относительно преобладающего потока, °. Данные факторы не имеют функциональной связи. Произведем отбор влиятельных значений, представленный на рис. 5.

Путем визуального анализа ранжированного ряда значения не имеют существенного отклонения, следовательно, соответствуют закону нормального распределения.

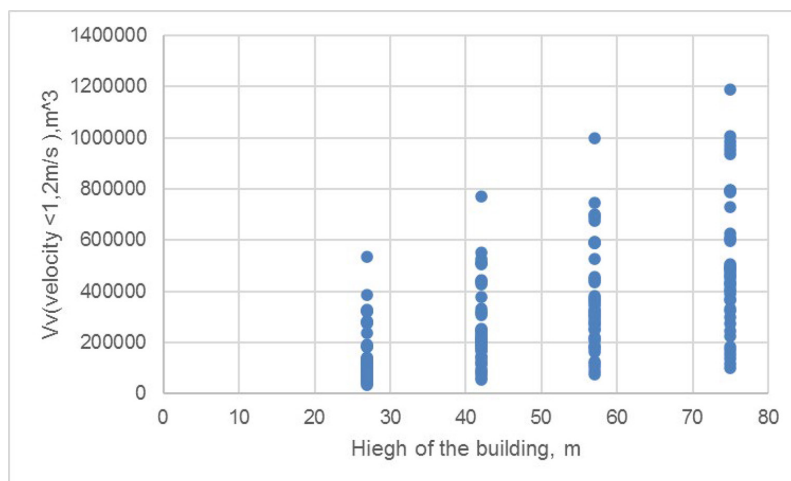


Рис. 5. Анализ влиятельных значений области низких скоростей ветра от высоты здания

Fig. 5. Analysis of the influential values of the low-speed velocity field from the height of the building

В данном случае трудно обосновать форму зависимости между результативными и факторными показателями, поэтому рассматривалось три вида линейной регрессии: множественная, факторная и полиномиальная [13, 14]. В табл. 1 представлены результаты проверки гипотезы об адекватности модели для области низких скоростей ветра.

Все модели имеют весьма высокие коэффициенты корреляции и детерминации. Наименее точные показатели у факторной модели, но есть неудобство в виде 15 степеней свободы дисперсии. Так как объемная формула затруднит расчет, а разница между множественной и полиномиальной моделями незначительна, предпочтение отдано множественной модели регрессии. Тогда запись зависимости имеет следующий вид:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_4 \cdot x_4, \quad (3)$$

где выборочные коэффициенты b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – это оценки соответствующих коэффициентов уравнения регрессии, характеризующего всю генеральную совокупность.

Для описания влияния факторных признаков на размер ветровой тени построена регрессионная модель. Используя программу Statistica, проведем дисперсный анализ, выведем коэффициенты регрессии, а для определения значимости и приоритетности факторов выведем коэффициенты корреляции.

Анализируя показатели регрессионной статистики, можно сделать вывод, что нескорректированный коэффициент множественной детерминации и множественный коэффициент корреляции указывают на высокую (более 85 %) предопределенность результата Y в построенной регрессионной модели рассматриваемыми факторными признаками. Показатели дисперсионного анализа представлены в табл. 3.

Таблица 1. Проверка гипотезы об адекватности модели области низких скоростей ветра

Table 1. Testing the hypothesis of the adequacy of the model of the low-speed velocity field

Вид регрессии	Множественный R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	df	F	p
Множественная	0,9053	0,8196	0,8155	4	198	0,00
Факторная	0,9898	0,9798	0,9779	15	530	0,00
Полиномиальная	0,9081	0,8247	0,8165	8	100	0,00

Таблица 2. Показатели регрессионной статистики для области низких скоростей ветра

Table 2. Regression statistics indicators for the low-speed velocity field

Показатель	Значение показателя
Множественный R	0,9053
R-квадрат	0,8197
Скорректированный R-квадрат	0,8155
Стандартная ошибка оценки	$7925933 \cdot 10^6$
Наблюдения	180

Таблица 3. Показатели дисперсионного анализа для области низких скоростей ветра

Table 3. Indicators of variance analysis for the low-speed velocity field

Показатель	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F	$F_{кр}$	Значимость
Регрессия	4	$7925933 \cdot 10^6$	$1981483 \cdot 10^6$	198,83	5,63	0,00
Остаток	175	$1743939 \cdot 10^6$	$9965366 \cdot 10^3$			
Всего	179	$9669872 \cdot 10^6$				

Анализируя показатели дисперсионного анализа, можно сделать вывод о том, что уравнение множественной регрессии и коэффициент множественной детерминации статистически значимы, что подтверждено F-критерием Фишера, так как $F_{\phi} > F_{кр}$. Показатели регрессионного и корреляционного анализов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 4. Показатели регрессионного анализа для области низких скоростей ветра

Table 4. Regression analysis indicators for the low-speed velocity field

Фактор	Коэффициенты В	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
У-пересечение	-537195	48374	-11,11	0,00
X ₁	4399	374,07	11,76	0,00
X ₂	4251	2339,97	1,82	0,07
X ₃	7304	418,11	17,47	0,00
X ₄	4590	248,02	18,51	0,00

Таблица 5. Корреляционный анализ для области низких скоростей ветра

Table 5. Correlation analysis for the low-speed velocity field

Фактор	A, м	B, м	H, м	α , °	Vv, м ³
A, м	1,000000	0,104257	0,000000	0,000000	0,385700
B, м	0,104257	1,000000	0,000000	0,000000	0,098216
H, м	0,000000	0,000000	1,000000	-0,000000	0,560809
α , °	0,000000	0,000000	-0,000000	1,000000	0,594121
Vv, м ³	0,385700	0,098216	0,560809	0,594121	1,000000

Анализируя показатели регрессионного анализа, можно сделать вывод, что величина, оценивающая агрегированное влияние прочих факторов на резульативный показатель, и коэффициенты регрессии b_1 , b_3 , b_4 статистически значимы, что подтверждается t-критерием Стьюдента, равным 2,776, а коэффициент регрессии b_2 не удовлетворяет требованиям. Исходя из корреляционного анализа на область низких скоростей ветра наиболее значимым фактором является угол поворота относительно преобладающего потока, вторым по значимости – высота здания, третьим – длина здания. Фактор ширины здания не является статически значимым. Вероятность для рассматриваемых факторных признаков не превышает принятый уровень, что подтверждается показателем вероятности случайных значений параметров регрессии. Уравнение множественной регрессии области низких скоростей ветра имеет вид

$$y = -537195 + 4399 \cdot A + 7304 \cdot H + 4590 \cdot \alpha. \quad (4)$$

Для многофакторной корреляционной модели объема отрицательного давления (y) подобраны те же факторы, что и области низких скоростей ветра. Произведем отбор влиятельных значений, представленный на рис. 6.

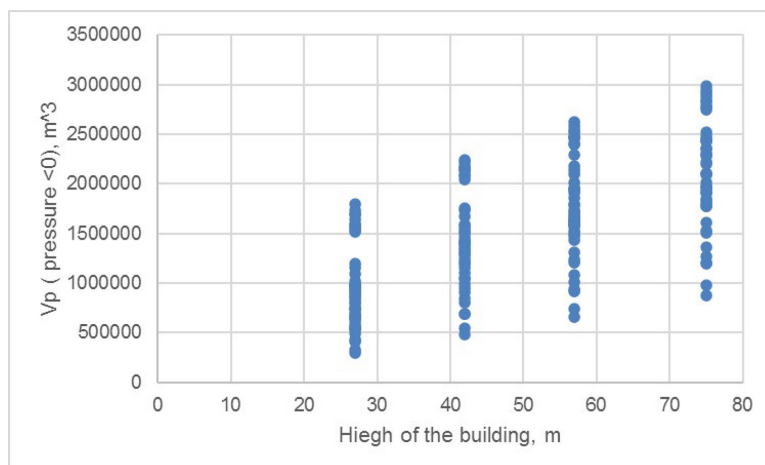


Рис. 6. Анализ влиятельных значений области отрицательного давления от высоты здания

Fig. 6. Analysis of the influential values of the negative pressure area from the height of the building

Таблица 6. Проверка гипотезы об адекватности модели области отрицательного давления

Table 6. Testing the hypothesis of the adequacy of the model of the negative pressure area

Вид регрессии	Множественный R	R-квадрат	Скорректированный R-квадрат	df	F	p
Множественная	0,8939	0,7990	0,7944	4	173	0,00
Факторная	0,9230	0,8520	0,8384	15	63	0,00
Полиномиальная	0,9251	0,8559	0,8491	8	126	0,00

В табл. 6 представлены результаты проверки гипотезы адекватности модели для области отрицательного давления.

Для модели области отрицательного давления выбрана полиномиальная модель, так как у нее самые высокие показатели коэффициентов. Тогда запись зависимости имеет следующий вид (5):

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_1^2 + b_3 \cdot x_2 + b_4 \cdot x_2^2 + b_5 \cdot x_3 + b_6 \cdot x_3^2 + b_7 \cdot x_4 + b_8 \cdot x_4^2, \quad (5)$$

где выборочные коэффициенты $b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8$ – это оценки соответствующих коэффициентов уравнения регрессии.

Для описания влияния факторных признаков на размер области отрицательного давления построена регрессионная модель.

Нескорректированный коэффициент множественной детерминации и множественный коэффициент корреляции указывают на высокую (более 85 %) предопределенность результата Y в построенной регрессионной модели рассматриваемыми факторными признаками. Показатели дисперсионного анализа для модели области отрицательного давления представлены в табл. 8.

Следовательно, уравнение множественной регрессии и коэффициент множественной детерминации статистически значимы, что подтверждено F-критерием Фишера [13], так как $F_{\phi} > F_{кр}$. Показатели регрессионного и корреляционного анализов приведены в табл. 9 и 10.

Анализируя показатели регрессионного анализа, можно сделать вывод, что коэффициенты регрессии $b_1, b_2, b_5, b_6, b_7, b_8$ статистически значимы, что подтверждается t-критерием Стьюдента, а коэффициенты регрессии b_3, b_4 не удовлетворяют требованиям. Исходя из корреляционного анализа на область низких скоростей ветра наиболее влиятельным фактором служит

Таблица 7. Показатели регрессионной статистики для области отрицательного давления

Table 7. Regression statistics indicators for the negative pressure area

Показатель	Значение показателя
Множественный R	0,9251
R-квадрат	0,8559
Скорректированный R-квадрат	0,8491
Стандартная ошибка оценки	$6632471 \cdot 10^7$
Наблюдения	180

Таблица 8. Показатели дисперсионного анализа для области отрицательного давления

Table 8. Indicators of variance analysis for the negative pressure area

Показатель	Степени свободы	Сумма квадратов	Средний квадрат	F	$F_{кр}$	Значимость
Регрессия	8	$6632471 \cdot 10^7$	$8290589 \cdot 10^6$	126,9	5,63	0,00
Остаток	171	$1117027 \cdot 10^7$	$6532323 \cdot 10^4$			
Всего	179	$7749498 \cdot 10^6$				

Таблица 9. Показатели регрессионного анализа для области отрицательного давления

Table 9. Regression analysis indicators for the negative pressure area

Фактор	Коэффициенты B	Стандартная ошибка	t-статистика	P-значение
Y-пересечение	-2647220	655764	-4,036	<0,001
X_1	33712	5438	6,198	0,000
X_2	-235	49,2	-4,781	<0,001
X_3	89407	74332,1	1,203	0,231
X_4	-1919	2245,1	-0,855	0,394
X_5	40515	7598,8	5,332	0,000
X_6	-167	73,5	-2,869	0,025
X_7	23949	1964,6	12,190	0,000
X_8	-130	20,7	-6,274	0,000

Таблица 10. Корреляционный анализ для области отрицательного давления

Table 10. Correlation analysis for the negative pressure area

Фактор	A, м	A ² , м ²	B, м	B ² , м ²	H, м	H ² , м ²	α , °	α^2	V _p , м ³
A, м	1,000	0,984	0,104	0,085	0,000	-0,000	0,000	0,000	0,258
A ² , м ²	0,984	1,000	0,121	0,099	0,000	-0,000	0,000	0,000	0,232
B, м	0,104	0,121	1,000	0,996	0,000	-0,000	0,000	0,000	0,138
B ² , м ²	0,085	0,099	0,996	1,000	0,000	-0,000	0,000	0,000	0,134
H, м	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,990	-0,000	-0,000	0,636
H ² , м ²	-0,000	-0,000	-0,000	-0,000	0,990	1,000	-0,000	-0,000	0,620
α , °	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,000	-0,000	1,000	0,946	0,562
α^2	0,000	0,000	0,000	0,000	-0,000	-0,000	0,946	1,000	0,473
V _p , м ³	0,258	0,232	0,138	0,134	0,636	0,620	0,562	0,473	1,000

высота здания, вторым по значимости является угол поворота, третьим – длина здания. Фактор ширины здания не является статически значимым. Вероятность для рассматриваемых факторных признаков не превышает принятый уровень, что подтверждается показателем вероятности случайных значений параметров регрессии.

Уравнение полиномиальной регрессии области отрицательного давления ветра имеет вид

$$y = -2647220 + 33716 \cdot A - 235 \cdot A^2 + 40545 \cdot H - 167 \cdot H^2 + 23949 \cdot \alpha - 130 \cdot \alpha^2. \quad (6)$$

Вывод оптимальных параметров здания

На рис. 7 отображены результаты корреляционно-регрессионного анализа и подобраны оптимальные параметры здания по области низких скоростей ветра.

При анализе профилей желательности выявлено, что наиболее оптимальный вариант относительно размера области низких скоростей ветра – одиночное здание площадью 30x18 м, высотой в 8 этажей, расположенное под углом 0° к преобладающему потоку, в условиях ветрового режима г. Красноярска.

Стоит отметить, что при высоте здания в 3–8 этажей показатели области низких скоростей ветра практически не изменны, далее наблюдается резкий рост значений. Оптимальная ширина здания варьируется от 12 до 18 м. При увеличении высоты и угла поворота здания размеры нежелательной ветровой тени также увеличиваются. На рис. 8 представлены профили относительно области отрицательного давления.

Основываясь на профилях прогнозируемых значений для области отрицательного значения, можно утверждать, что наиболее влиятельный фактор для зоны отрицательного давления – этажность здания. Чем ниже здание, тем меньше зона застоя. Зависимости параметров имеют криволинейный характер, в отличие от зависимостей области низких скоростей ветра, в силу формы уравнения регрессии. Относительно области отрицательного давления наиболее экологичной является трехэтажное здание площадью 30x15 м, расположенное под углом в 45° относительно преобладающего потока.

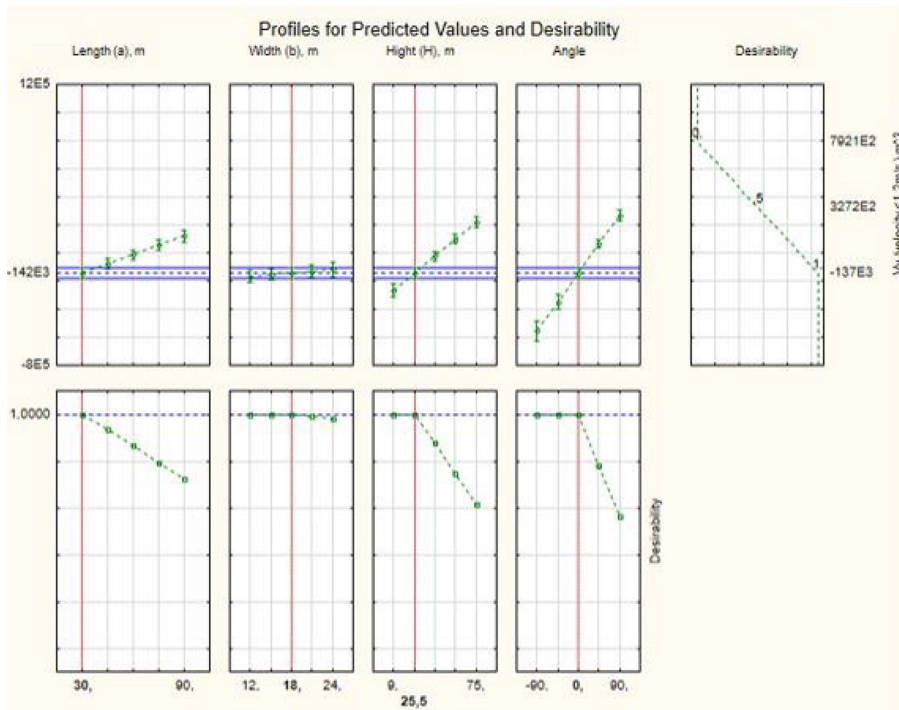


Рис. 7. Профиль прогнозируемых значений и желательности для области низких скоростей ветра
 Fig. 7. The profile of predicted values and desirability for the low-speed velocity field

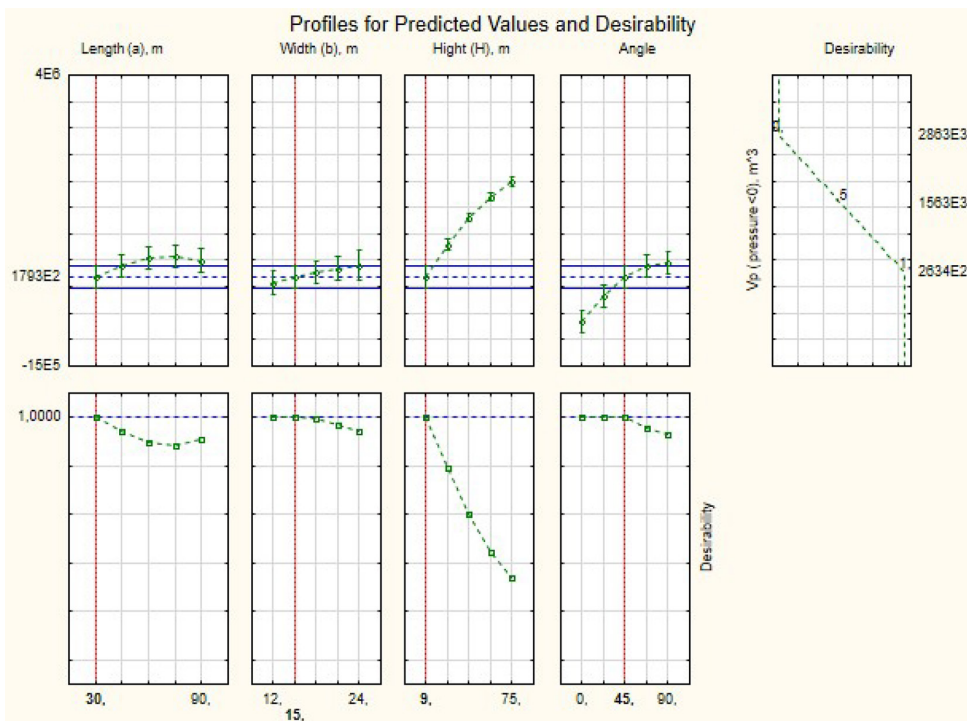


Рис. 8. Профиль прогнозируемых значений и желательности для области отрицательного давления
 Fig. 8. The profile of predicted values and desirability for the negative pressure area

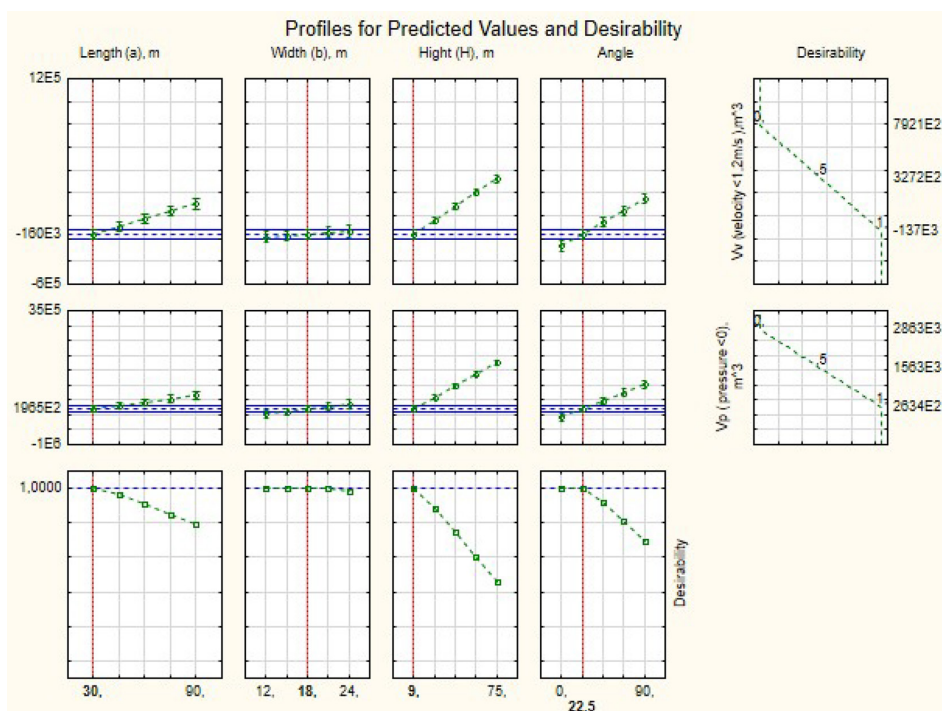


Рис. 9. Профиль прогнозируемых значений и желательности для зоны застоя

Fig. 9. The profile of predicted values and desirability for the stagnation zone

При совмещении двух характеристик зоны застоя были получены следующие профили, представленные на рис. 9.

При визуальном анализе профилей прогнозируемых значений определено, что наиболее влиятельные параметры – высота и угол поворота здания, что не противоречит вышесказанным выводам.

Итак, в условиях ветрового режима города Красноярск наиболее экологичное объемно-планировочное решение для одиночного здания – здание высотой 9 м, площадью 30x18 м, под углом $22,5^\circ$ к преобладающему потоку.

Выводы

По результатам проведенного исследования была выявлена зависимость между параметрами одиночного здания и аэродинамическими условиями, описанными в виде области недопустимо низких скоростей ветра и области отрицательного давления. Установлено соотношение между двумя характеристиками. Полученные уравнения регрессии являются статистически значимыми, следовательно, могут применяться на практике с целью подбора наиболее экологичных объемно-планировочных решений здания на предпроектной стадии согласования. Определено, что наиболее влиятельными параметрами на зону застоя считаются высота здания и угол его поворота относительно преобладающего потока. Полученные оптимальные параметры здания констатируют, что для улучшения экологической обстановки в городе Красноярске следует снизить этажность до 3–8 этажей и тщательно продумывать расположение здания в плане.

Список литературы / References

- [1] Мешкова В. Д., Дектерев А. А., Филимонов С. А., Литвинцев К. Ю. SigmaFlow как инструмент исследования ветрового комфорта в условиях городской среды. *Журнал СФУ. Техника и технологии*, 2022, 15(4), 490–504 [Meshkova V. D., Degtyarev A. A., Filimonov S. A., Litvintsev K. Yu. SigmaFlow as a Tool for Studying Wind Comfort in Urban Environment, *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2022, 15(4), 490–504 (in Russian)]
- [2] Гагарин В. Г., Гувернюк С. В., Леденев П. В. Аэродинамические характеристики зданий для расчета ветрового воздействия на ограждающие конструкции. *Жилищное строительство. Высотное строительство*, 2010, 1(2), 7–10 [Gagarin V. G., Guvernyuk S. V., Ledenev P. V. Aerodynamic characteristics of buildings for calculating wind impact on enclosing structures. *Housing construction. High-rise construction*, 2010, 1(2), 7–10 (in Russian)]
- [3] Mikhailuta S. V., Lezhenin A. A., Pitt A., Taseiko O. V. Urban wind fields: Phenomena in transformation. *Urban Climate*, 2016, 12(5), 1–19
- [4] Поддаева О. И., Буслаева Ю. С., Грибач Д. С. Экспериментальное исследование ветровых нагрузок на многофункциональный высотный жилой комплекс. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова*, 2014, 6, 58–62 [Poddaeva O. I., Buslaeva Yu. S., Gribach D. S. Experimental study of wind loads on a multifunctional high-rise residential complex. *Bulletin of V. G. Shukhov BSTU*, 2014, 6, 58–62 (in Russian)]
- [5] Миронова Ю. В., Габдрахманова Л. М. Ветровые воздействия на существующие малоэтажные здания при размещении высотных и многоэтажных зданий в сложившейся застройке. *Известия КГАСУ*, 2019, 1, 147–154 [Mironova Yu. V., Gabdrakhmanova L. M. Wind impacts on existing low-rise buildings when placing high-rise and multi-storey buildings in the current development. *Izvestiya KGASU*, 2019, 1, 147–154 (in Russian)]
- [6] Куприянов В. Н., Альтапов С. Р. Моделирование ветровых воздействий изменением формы здания. *Известия КГАСУ*, 2016, 2, 100–104 [Kupriyanov V. N., Altapov S. R. Modeling of wind impacts by changing the shape of a building. *Izvestiya KGASU*, 2016, 2, 100–104 (in Russian)]
- [7] Туан Л. М., Шукуров И. С. Моделирование тепло-ветрового режима городской улицы в г. Ханое. *Вестник МГСУ*, 2020, 15(3), 369–379 [Tuan L. M., Shukurov I. S. Modeling of the heat-wind regime of a city street in Hanoi. *Bulletin of MGSU*, 2020, 15(3), 369–379 (in Russian)]
- [8] Дорошенко А. В. Программа оценки аэродинамической комфортности в пешеходных зонах. *Вестник ИрГТУ*, 2013, 5, 100–103 [Doroshenko A. V. Aerodynamic comfort assessment program in pedestrian zones. *Bulletin of IrSTU*, 2013, 5, 100–103 (in Russian)]
- [9] Оленьков В. Д., Колмогорова А. О., Сапогова А. Е. Компьютерное моделирование аэрационного режима жилой застройки с целью проветривания и ветрозащиты. *Вестник ЮУрГУ. Строительство и архитектура*, 2021, 21(1), 5–12 [Olenkov V. D., Kolmogorova A. O., Sapogova A. E. Computer simulation of the aeration regime of residential buildings for the purpose of ventilation and wind protection. *Bulletin of SUSU. Construction and Architecture*, 2021, 21(1), 5–12 (in Russian)]
- [10] Орлов А. А. Климатическое зонирование придомовых территорий. Использование программного комплекса. *ВЕСТНИК НАУКИ*, 2020, 2, (3), 81–94 [Orlov A. A. Climatic zoning of adjacent territories. use of the software package. *BULLETIN OF SCIENCE*, 2020, 2, (3), 81–94 (in Russian)]

[11] Мягков М. С., Алексеева Л. И. Особенности ветрового режима типовых форм городской застройки. *AVIT*, 2014, 1(26), 1–15 [Myagkov M. S., Alekseeva L. I. Features of the wind regime of typical forms of urban development. *AVIT*, 2014, 1(26), 1–15 (in Russian)]

[12] Иванова Ю. В., Куц Е. В., Кадокова С. Ю. Метод моделирования ветрового воздействия на здание общественного назначения. *Инженерный вестник Дона*, 2022, 12, 1–11 [Ivanova Yu.V., Kutz E. V., Kondakova S. Yu. Method of modeling wind impact on a public building. *Engineering Bulletin of the Don*, 2022, 12, 1–11 (in Russian)]

[13] Большакова Л. В., Литвиненко А. Н. Методика применения статистического пакета анализа для проведения корреляционно-регрессионного анализа в ходе экономических исследований. *Вестник экономической безопасности*, 2021, 3, 259–265 [Bolshakova L. V., Litvinenko A. N. Methodology of application of statistical analysis package for correlation and regression analysis in the course of economic research. *Bulletin of Economic Security*, 2021, 3, 259–265 (in Russian)]

[14] Яроменко Н. Н., Бубенок Е. Д., Хахалева Е. А. Корреляционно-регрессионный анализ как способ прогнозирования экономического развития предприятия. *Вестник Академии знаний*, 2021, 44 (3), 249–252 [Yaremenko N. N., Bubenok E. D., Khakhaleva E. A. Correlation and regression analysis as a way of forecasting the economic development of an enterprise. *Bulletin of the Academy of Knowledge*, 2021, 44 (3), 249–252 (in Russian)]