

Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения

Д.А. Ким

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Аннотация: В статье проанализировано ветровое воздействие на здания и сооружения, рассмотрены параметры региональных и местных ветров, влияние рельефа местности на региональные ветра, представлено соотношение скорости ветра от высоты обдува. Рассмотрены основные аспекты определения ветровых нагрузок на здания и сооружения. Исследован характер ветровой нагрузки, а также методы ее расчета. Сформулирована задача дальнейшего развития метода расчета ветрового воздействия с использованием компьютерного моделирования.

Ключевые слова: Ветер, здания, сооружения, аэродинамика, гидродинамика, CFD, регион, моделирование, ландшафт, холм, долина.

Как известно, ветер – это движение воздушных масс, вызванное различиями в атмосферном давлении, связанными с градиентами температуры земли, воды и воздуха, которые могут происходить на макротерриториальном уровне (между одним географическим регионом и другим) или в локальном масштабе (набережная, приозерная зона, долины и т. д.) [1].

В первом случае речь идет о региональных ветрах, во втором – о местных. Параметрами, характеризующими ветер, являются: скорость, направление, с которого он дует, частота. Схематическое представление этих трех параметров дает роза ветров (рис. 1).

Представленная на круговой диаграмме роза ветров показывает частоту ветров, дующих с определенных направлений. Длина каждого луча розы ветров связана с частотой, с которой ветер дует с определенного направления в данный период времени (месяц, сезон, год). Каждый concentрический круг представляет собой различную частоту, варьирующуюся от нуля в центре до возрастающих частот на внешних кругах.

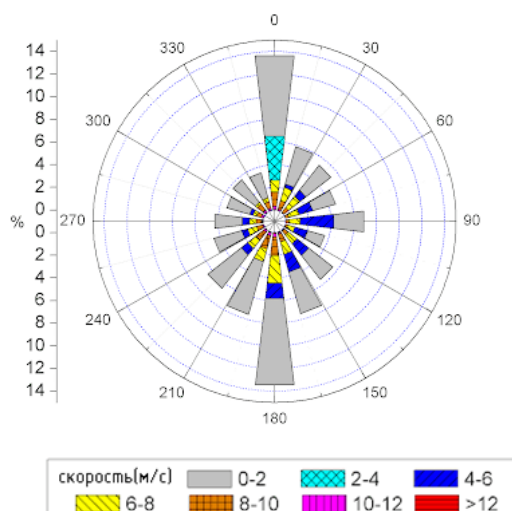


Рис.1. – Роза ветров

График розы ветров может содержать дополнительную информацию, поскольку каждый луч может быть разбит на цветные полосы, которые показывают диапазоны скорости ветра. Наиболее полезными данными являются средние значения за длительный период времени [2].

Влияние рельефа на региональные ветры весьма примечательно и может быть оценено количественно. На ровной местности, без препятствий, скорость ветра изменяется в зависимости от двух параметров: шероховатости поверхности земли и высоты. На рис. 2 показаны некоторые примеры профилей скорости ветра. Можно отметить, что на той же высоте скорость ветра больше на открытой местности, чем в районе с высокой плотностью застройки [3].

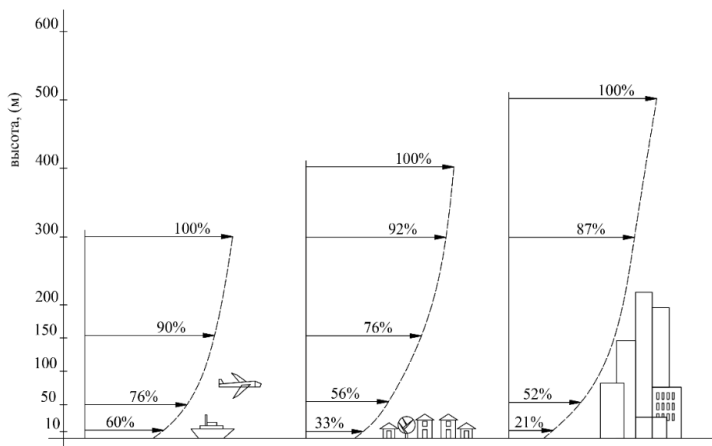


Рис.2. – Профили ветра на различной местности

Ветер измеряется метеостанциями, расположенными в заданном топографическом контексте. Изменение этого контекста также корректирует скорость ветра, которая изменяется в том же самом месте по отношению к высоте. Обычно данные о ветре, доступные для определения местоположения, измеряются в ближайшем аэропорту, а также на метеостанциях и метеопунктах городов на высоте 10 м от земли [4]. Для расчета скорости ветра на разных высотах можно использовать следующую формулу:

$$V_z/V_{10}=\alpha K,$$

где: V_z – скорость ветра на высоте Z , м/с; V_{10} – скорость ветра на высоте 10 м, м/с; K и α – это два коэффициента, которые варьируются в зависимости от ландшафта, как показано в таблице 1.

Таблица 1

Значения коэффициентов α , K в зависимости от типа местности

№ п/п	Тип местности	Коэффициенты	
		α	K
1	Открытая сельская местность	0,17	0,68
2	Окраина города с низкой плотностью населения	0,20	0,52
3	Городской район	0,25	0,35
4	Центральная часть города	0,33	0,21

График, показанный на рис. 3, позволяет графически рассчитать среднюю скорость ветра на высоте Z от земли по отношению к данному типу ландшафта, если известна величина, измеренная на высоте 10 м. Для выявления средней скорости ветра на уровне десятого этажа (около 30 м) здания, расположенного в городском районе с низкой плотностью застройки, фиксируется на графике соответствующее значение V_z/V_{10} (0,82 в нашем случае); зная, что в аэропорту средняя скорость ветра составляет 4 м/с, скорость на высоте 30 м определяется как $V_z=0,82\times 4=3,28$ м/с.

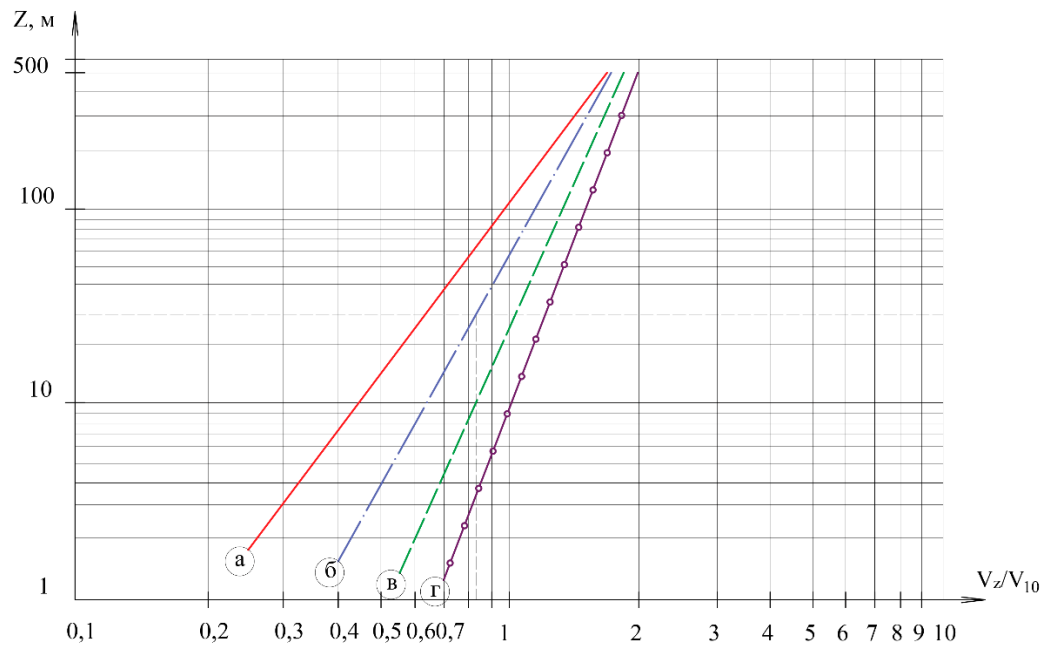


Рис.3. – Соотношение скорости ветра и высоты обдува

а - открытая сельская местность; б - окраина города с низкой плотностью населения; в - городской район; г - центральная часть города

В районах, характеризующихся сложной орографией, ветры могут усиливаться, отклоняться или ослабляться, как показано на рис. 4.

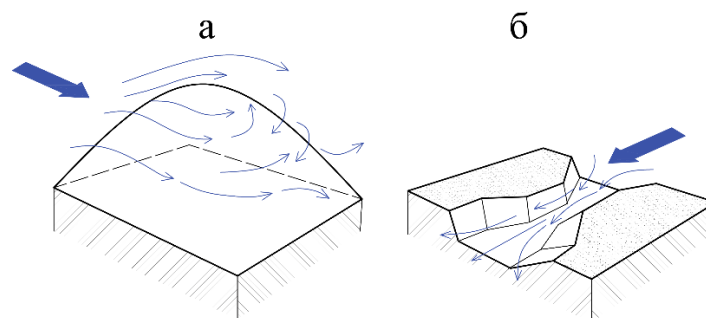


Рис.4. – Различные направления ветра в зависимости от топографии местности (а - холм, б - долина)

Сочетание контрастных тепловых сред приводит к развитию горизонтальных градиентов давления, которые в отсутствие региональных ветров вызывают движение воздуха и, следовательно, местные ветры. В некоторых случаях, таких как бризы над морями и озерами и в горных

долинах летом, эти движения можно предсказать. Разница температур почвы и воды и ее инверсия в течение 24 часов (в дневное время почва теплее воды, но ночью холоднее) производят соответствующую разность давлений воздуха над водой и землей [5]. Эта разница, в свою очередь, вызывает воздушный поток через береговую линию. Ветер меняет направление от дня к ночи и наоборот (рис. 5).

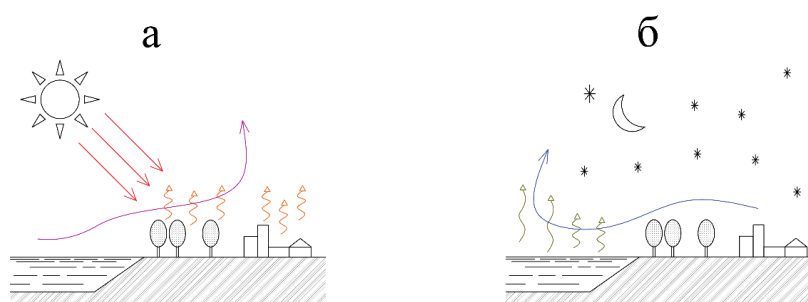


Рис.5. – Изменение направления ветра днем (а) и ночью (б)

В долине движение воздуха более сложное, как показано схематически на рис. 6. В общем случае прогнозирование локальных воздушных движений на основе нескольких параметров очень сложно из-за большого числа задействованных переменных.

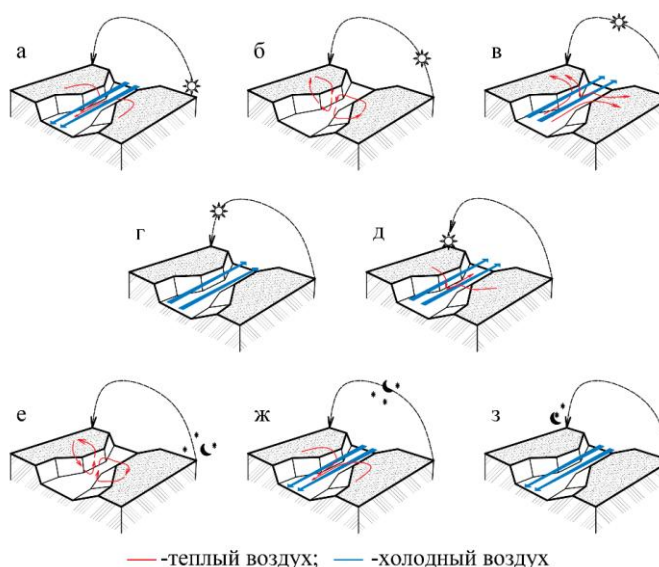


Рис. 6. – Движение воздуха в долине в зависимости от времени суток

а - 06:00, б - 09:00; в - 12:00; г - 15:00; д - 18:00; е - 21:00;

ж - 00:00; з - 03:00

Поскольку ветер – это поток воздушных масс, то его движение подчиняется закону Бернулли:

$$\frac{\rho v_0^2}{2} + p_0 = \frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 \quad (1)$$

где v_0 и v_1 -скорости при двух разных сечениях потока, p_0 и p_1 – давления в одних и тех же сечениях, ρ – плотность воздуха.

Представим формулу (1) в виде:

$$p_1 - p_0 = \frac{\rho v_0^2}{2} [1 - (v_1/v_0)^2] \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности (2) между избыточным давлением в поперечных сечениях и скоростным напором называется аэродинамическим коэффициентом:

$$C = [1 - (v_1/v_0)^2] \quad (3)$$

Он (3) определяет величину динамического давления, которое преобразуется в давление ветра и обычно основан на экспериментальных испытаниях в аэродинамической трубе, т.е. аэродинамический коэффициент – это отношение избыточного статического давления в одной точке внешней поверхности здания к динамическому давлению ветра [6, 7].

Величина и знак аэродинамических коэффициентов зависят от расположения точки на фасаде здания, от формы здания, направления и скорости ветра, наличия соседних зданий и сооружений поблизости, а также рельефа местности. При испытании в аэродинамической трубе характера течения потока и значения давления при характеристике определяются точки здания. В работе [8] хорошо описан процесс аэродинамических испытаний модели. Различают прямоточные и закрытые аэродинамические трубы и трубы с закрытой и открытой рабочей частью [9].

В зависимости от решаемых задач городской постройки испытания зданий и сооружений производятся в аэродинамической трубе или в гидродинамических лодках.

Воздушный поток формируется в тестовом участке аэродинамической трубы, где устанавливается исследуемая модель. Модель устанавливается на поворотный стол, ее ориентация под потоком изменяется с определенным шагом.

Избыточное статическое давление или пониженное давление возникает на поверхности модели здания под действием воздушного потока. Это давление измеряется микроманометром, соединенным шлангом с зондом или дренажной трубкой, устанавливаемой на поверхности модели. Динамическое давление воздушного потока измеряется трубкой Пито в начальном сечении рабочей трубы.

Модель здания размещается у вертикальной стены, имитирующей поверхность Земли. Схема течения в гидравлическом проточном лотке является размерной (допустимой для бесконечно длинного здания с нормальным направлением потока к фасаду). В качестве индикаторов для контроля потока вокруг конструкции используется алюминиевая пудра или мелкое бумажное конфетти. Фотографируя модель процесса течения с известной экспозицией, можно получить не только размеры вихревых зон, но также и векторы скоростей в частях потока (по длине следа, оставленного конфетти). Модель здания, установленная на плоском основании (имитирующем поверхность грунта) гидрлотка, помещается в поток воды непосредственно за выравнивающими штангами.

Существует необходимость проектирования конструкции с учетом пиковых ветровых нагрузок на ограждения и места их крепления в современной редакции строительных норм РФ СП 20.13330.2016. При этом значения аэродинамических коэффициентов положительного давления или

всасывания, которые фигурируют в уравнении для расчета нормативного значения пиковых ветровых нагрузок, должны определяться по результатам модельных испытаний в аэродинамической трубе [10].

Известно, что для некоторых из них могут возникать автоколебания (автоколебания) и аэродинамическая неустойчивость. Гибкие структуры при отрыве вихря кармана от поверхности тела [11, 12]. В соответствии с СП 20.13330.2016 необходимо проверить высокие и гибкие здания ($h/d > 10$) на резонансные вихревые возбуждения. В то же время рекомендуется уточнить это влияние при аэродинамических испытаниях модели.

Следует помнить, что расчет ветровой нагрузки, как некоторого значения давления на здание или сооружение, является вспомогательной задачей обширного структурного анализа динамического воздействия. В соответствии с СП 20.13330.2016, методы расчета здания или сооружения на ветровое воздействие предполагают использование приближенных расчетных схем сооружений, упрощенных и обобщенных типов окружающих зданий и рельефа местности. Современные строительные нормы поднимают вопрос об аэродинамической неустойчивости зданий под воздействием ветра весьма опосредованно. Теоретическую сторону различных видов этого явления можно найти в работе [12]. Чтобы понять поведение сложной конструкции, такой как высотное здание, необходимо провести модельное испытание в аэродинамической трубе, особенно если оно имеет нестандартную форму. В связи с высокой ресурсоемкостью и сложностью проведения этих экспериментов возникает необходимость поиска альтернативных методов динамического анализа зданий и сооружений на ветровое воздействие. В последние годы активно развиваются методы компьютерного моделирования ветровых воздействий, создаются сложные программные комплексы, такие как Autodesk CFD, Ansys fluent, Envi-met и другие. Они позволяют точно и близко к реальным условиям задавать

исходные данные, влияющие на дальнейший расчет (форма здания, рельеф местности, близлежащие здания, погодные условия, и др.) для получения значений ветровой нагрузки, согласующихся с результатами аэродинамических испытаний. Поэтому изучение и модернизация таких программ является актуальной и важной задачей аэродинамики зданий и сооружений.

Литература

1. Гордеев В.Н., Лантук-Дяченко А.И., Пашинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: АСВ, 2007. 482 с.
2. Райзер В.Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: АСВ, 1998. 304 с.
3. Дубинский С.И. Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы. М.: 2010. 198 с.
4. Серебровский Ф.Л. Аэрация населенных мест. М.: Стройиздат, 1985. 172 с.
5. Гиясов Адхам. Плоскостные и пространственные конструкции покрытий зданий. М.: АСВ, 2008. 144 с.
6. Ai Z.T., Mak C.M. CFD simulation of flow and dispersion around an isolated building: Effect of inhomogeneous ABL and nearwall treatment // *Atmospheric Environment*, 77 (10), 2013. pp. 568–578.
7. Kubilaya A., Deromea D., Blockenc B., Carmelieta J. CFD simulation and validation of wind-driven rain on a building facade with an Eulerian multiphase model // *Building and Environment*, 61 (3), 2013. pp. 69–81.
8. Ferziger J.H., Peric M. *Computational Methods for Fluid Dynamics*. Springer, Berlin, 1996, 356 p.
9. Белостоцкий А.М., Акимов П.А., Афанасьева И.Н. Вычислительная аэродинамика в задачах строительства. М.: 2017. 720 с.

10. Симиу Е., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
11. Гиясов А. Тепло-ветровой режим городского каньона, взаимосвязь его с воздушной средой помещений // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4737.
12. Присс О.Г. Определение ветровой нагрузки на открытую этажерку // Инженерный вестник Дона, 2020, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6396.

References

1. Gordeev V.N., Lantuk-Djashhenko A.I., Pashinskij V.A., Perel'muter A.V., Pichugin S.F. Nagruzki i vozdejstvija na zdanija i sooruzhenija [Loads and impacts on buildings and structures]. М.: ASV, 2007. 482 p.
 2. Rajzer V.D. Teorija nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii [Reliability theory in construction design]. М.: ASV, 1998. 304 p.
 3. Dubinskij S.I. Chislennoe modelirovanie vetrovyh vozdeystvij na vysotnye zdanija i komplekсы [Numerical modeling of wind impacts on high-rise buildings and complexes]. М.: 2010. 198 p.
 4. Serebrovskij F.L. Ajeracija naseleennyh mest [Aeration of populated areas]. М.: Strojizdat, 1985. 172 p.
 5. Gijasov Adham. Ploskostnye i prostranstvennye konstrukcii pokrytij zdaniy [Planar and spatial structures of building coverings]. М.: ASV, 2008. 144 p.
 6. Ai Z.T., Mak C.M. Atmospheric Environment, 77 (10), 2013. pp. 568–578.
 7. Kubilaya A., Deromea D., Blockenc B., Carmelieta J. Building and Environment, 61 (3), 2013. pp. 69–81.
 8. Ferziger J.H., Peric M. Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer, Berlin, 1996, 356 p.
-



9. Belostockij A.M., Akimov P.A., Afanas'eva I.N. Vychislitel'naja aerodinamika v zadachah stroitel'stva [Computational aerodynamics in construction problems]. M.: 2017. 720 p.
10. Simiu E., Skanlan R. Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzheniya [Impact of wind on buildings and structures]. M.: Strojizdat, 1984. 360 p.
11. Gijasov A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/4737.
12. Priss O.G. Inzhenernyj vestnik Dona, 2020, №4ю URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/N4y2020/6396.