

В.С. КУЗНЕЦОВ¹, А.А. ШУРУШКИН¹¹ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия

УСИЛИЯ В ЗДАНИЯХ ПРИЗМАТИЧЕСКОЙ ФОРМЫ ПРИ РАЗЛИЧНОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Аннотация. Рассматриваются особенности воздействия ветра на здание призматического типа при различных способах определения коэффициента давления ветра по высоте. Исследование выполнено на основе изучения основных положений нормативных документов, регулирующих проектно-конструкторскую деятельность в РФ, а также актуальных публикаций отечественных и зарубежных ученых, соответствующих исследованиям данного направления. Метод исследования - структурно-аналитический анализ с использованием корреляционных зависимостей исследуемых факторов. Приводятся аналитические зависимости для определения усилий от ветра при различных способах назначения коэффициента ветровой нагрузки по высоте здания и их графическая интерпретация. Работа основана на положениях отечественных строительных норм и соответствующих сведений, содержащихся в иных отечественных и зарубежных источниках. Для призматических зданий по высоте до 80 метров имеются участки, где усилия от основной ветровой нагрузки существенно зависят от метода ее определения. Проведенное исследование свидетельствует о неоднозначности, используемых в практике проектирования параметров ветровой нагрузки, допускающих возможность превышения или недогрузки конструкций или отдельных элементов.

Ключевые слова: железобетонные здания и элементы, фронтальная поверхность, коэффициент ветровой нагрузки, усилия от ветра.

V.S. KUZNETSOV¹, A.A. SHURUSHKIN¹¹National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia

INTERNAL FORCES IN THE FRAME OF BUILDING OF PRISMATIC FORM UNDER DIFFERENT DISTRIBUTION OF WIND PRESSURE

Abstract. The features of the effect of wind on a prismatic-type building with different methods of determining the coefficient of wind pressure along the height are considered. The study was carried out on the basis of studying the main provisions of regulatory documents governing design and development activities in the Russian Federation, as well as current publications of domestic and foreign scientists, corresponding to research in this area. The research method is structural and analytical analysis using the correlation dependences of the factors under study. Analytical dependencies for determining the wind forces for various methods of assigning the wind load coefficient along the height of the building and their graphic interpretation are given. The work is based on the provisions of domestic building codes and relevant information contained in other domestic and foreign sources. For prismatic buildings with a height of up to 80 meters, there are areas where the forces from the main wind load significantly depend on the method of its determination. The conducted research indicates the ambiguity used in the practice of designing the parameters of the wind load, allowing the possibility of excess or underloading of structures or individual elements.

Keywords: reinforced concrete buildings and elements, frontal surface, wind load coefficient, wind forces.

Введение

Активное развитие строительной отрасли требует совершенствования и обновления методов расчета строительных конструкций, что в полной мере касается и определения ветрового воздействия. Здания, в силу их протяженности и угловатости являются плохо обтекаемыми объектами, и воздушный поток сопротивляясь этим помехам, пытается закрутить здание, согнуть или опрокинуть. Многочисленные примеры ветровых воздействий на здания и сооружения с негативными последствиями регулярно публикуются в открытой печати и специальной литературе [1]. Классическим примером является обрушение в Англии в 1879 году Тейского моста. Основная причина катастрофы - прямой недоучет ветровой нагрузки: проектное давление ветра принято 47 кг/м^2 , а в момент разрушения достигло 188 кг/м^2 [2]. Сохраняется неопределенность в назначении и применении ветровых нагрузок и в настоящее время. Например, по данным наблюдений метеостанции МГУ, в 1984 году на высоте 10 м скорость ветра составляла 28 м/с, а последние годы московскими метеостанциями неоднократно фиксировались шквальные ветры со скоростью, превышающей 35 м/с [3]. Совокупность воздействия окружающей среды и желание максимально удешевить сооружение привели к чрезмерным колебаниям моста (танцующий мост) в Волгограде в 2010 году [4]. Побочными негативными факторами влияния ветра могут быть появление нестационарных потоков различной направленности, локальное изменение скорости ветра и т.д. [5,6,7].

Целью настоящего исследования является уточнение распределения ветрового воздействия по высоте и оценка его влияния на силовые факторы, воздействующие на здания.

Очевидно, что недооценка реальной ветровой нагрузки может привести к перегрузке отдельных элементов здания и созданию аварийной ситуации, недопустимой по требованиям [8], а переоценка ведет к созданию необоснованных запасов прочности, что увеличивает расход материалов и стоимость объекта в целом. Таким образом, работы, направленные на установление реальных значений ветровой нагрузки и особенностей их применения в прочностных расчетах, остаются актуальными и в современных условиях.

В работе ставились и решались следующие задачи.

- Изучить распределение коэффициентов ветровой нагрузки « k » по высоте для основной составляющей, согласно распределению, принятому в [9].
- Установить распределение коэффициентов ветровой нагрузки « k » для основной составляющей, согласно условному распределению, принятому в [10] и [11].
- Вычислить значения ярусных сил и изгибающих моментов в различных высотных сечениях от ветровых нагрузок для наветренной стороны здания расположенного в местности типа «В», с учетом установленных величин ветровых коэффициентов « k ».
- Выполнить сравнительный анализ полученных значений усилий в расчетных сечениях здания при различных распределениях коэффициентов ветровой нагрузки « k »
- Оценить полученные результаты, сформировать выводы и сделать соответствующие рекомендации.

Методы

Метод исследования - расчетно-аналитический, основанный на использовании статистических данных метеостанций Росгидромета, изложенных в [9,11], зарубежных источниках [5,12], нормативно-правовых документов РФ [8,13], а также на принципах сопротивления материалов. В качестве основного инструментария исследования применен комплексный сравнительный анализ результатов расчетов, включающий качественную и количественную оценку, основанную на основах механики твердого тела и теории вероятности.

В качестве объекта исследования рассмотрены здания, призматического очертания с размерами фронтальной ветровой поверхности $h \times d = (80 \times 80 \text{ м}), (80 \times 40 \text{ м})$ и $(80 \times 20 \text{ м})$, нагруженные нормальной к поверхности ветровой нагрузкой, различной конфигурации.

В настоящее время, согласно [11] нормативное значение ветровой нагрузки определяется как сумма средней W_m и пульсационной W_g составляющих (1):

$$W = W_m + W_g \quad (1)$$

В представленной работе W_g – пульсационная составляющая ветровой нагрузки не являлась предметом изучения и исключена из системного анализа.

В общем случае средняя составляющая ветровой нагрузки W_m определяется по формуле (2), где W_0 – нормативное значение ветрового давления, $k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z , c – аэродинамический коэффициент.

$$W_m = W_0 k(z_e) c \quad (2)$$

Для конкретного типа местности, фронтальное давление ветра W_0 и аэродинамический коэффициент «с» являются константами, не влияющими на результат исследования и исключены из протокола. Коэффициенты ветрового давления $k(z)$, установлены для различных типов местности и высотных отметок, на основе многолетних наблюдений и затабулированы в [11]. На рисунке 1 представлена графическая интерпретация изменений коэффициентов $k(z)$ в диапазоне высот от 0 до +80 м, что соответствует большинству объектов жилищного и гражданского строительства. В дальнейших исследованиях рассматривалось распределение «к» для местности типа «В». Вычисление значений коэффициентов ветрового давления, согласно [11] допускается производить по формуле (3).

$$k_{ze} = k_{10} (z_e/10)^{2\alpha}. \quad (3)$$

Здесь k_{10} – коэффициент ветрового давления, соответствующий высоте 10 м над уровнем земли (для местности типа «В» $k_{10}=0,65$); α – эмпирический коэффициент (для местности типа «В» $\alpha=0,2$).



Рисунок 1 - Табличные значения коэффициентов «к» для составляющей w_m и различных типов местности

Использование аналитической зависимости (3) позволяет установить точное значение коэффициента k_{ze} на любой высотной отметке.

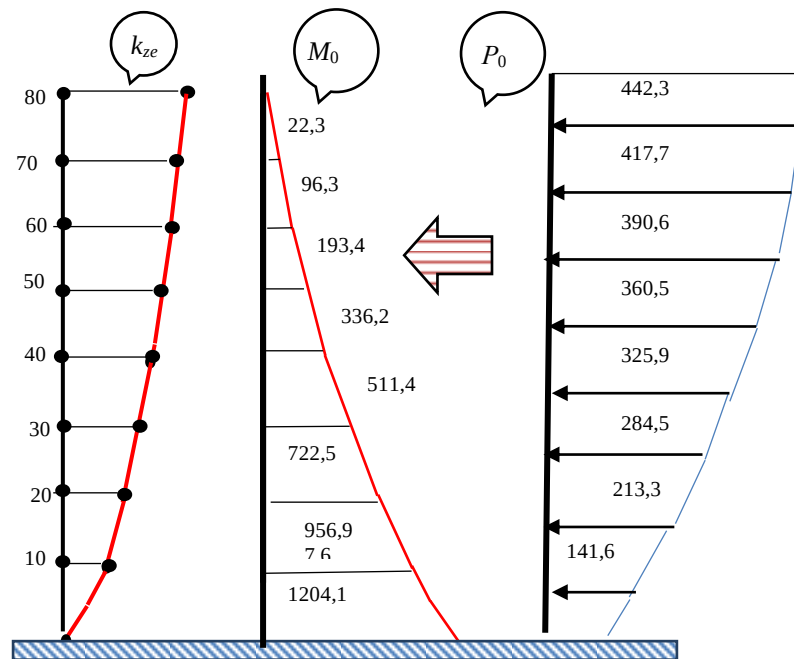


Рисунок 2 - Распределение моментов M_{ze} (кНм) и усилий P_{ze} (кН) по высоте при значениях коэффициента k_{ze}

Полное значение усилия от воздействия коэффициента ветровой нагрузки k_{ze} на любом расчетном отрезке в декартовой системе координат равно площади криволинейной трапеции, ограниченной графиком функции (3) и двумя прямыми $z_e=a$ и $z_e=b$, соответствующими расчетным высотным диапазонам.

Площадь криволинейной трапеции A_{ze} , в расчетном интервале $[a, b]$, определяется интегралом (4)

$$A_{ze} = k_{10} \int_a^b (z_e / 10)^{2\alpha} dz_e, \quad (4)$$

где, $(z_e/10)^{2\alpha}$ - подынтегральная функция; a и b - верхний и нижний пределы интегрирования, соответствующие расчетным высотным отметкам здания.

Усилие P_{ze} - обобщенная ярусная сила, собираемая с расчетной полосы, шириной 1 м в интервале высот $[a, b]$ и приложенная в центре рассматриваемого интервала. Для наветренной стороны здания ($c=0,8$) и местности типа «В» ($W_0=0,38$ кПа), усилие P_{ze} определялось по формуле (5).

$$P_{ze} = cw_0 k_{10} \int_a^b (z_e / 10)^{2\alpha} dz_e. \quad (5)$$

Принимая расчетный интервал $[a, b]$ в формуле (5) равным высоте этажа, можно получить классическое распределение поэтажных ярусных сил. В настоящей работе рассматривалось восемь укрупненных участков длиной 10 метров каждый, для которых, используя значения коэффициентов « k_{ze} » на фиксированных высотных отметках как значения ординат трапециевидной нагрузки, вычислялись значения усилий P_0 и изгибающих моментов M_0 . Результаты расчетов представлены на рисунке 2.

Графики позволяют легко определить суммарные и отдельные усилия с наветренной подветренной сторон, а также ярусные силы для отдельной грузовой полосы или полностью на фронтальную плоскость объекта исследования.

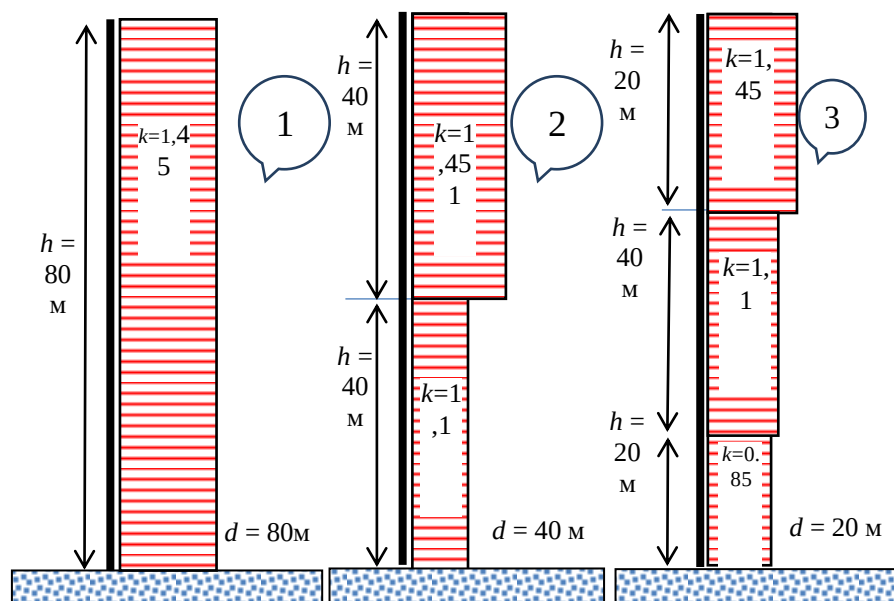


Рисунок 3 - Распределение коэффициента ветрового давления «к» по высоте при различных соотношениях размеров h и d фронтальной поверхности

В настоящее время, с целью более точного определения ветровой нагрузки, нормы [11] предлагают определять величины коэффициента $k(z_e)$ с учетом пропорций фронтальной поверхности и значения эквивалентной высоты z_e , которая назначается для различных отношений h к d (таблица 1). Здесь: z - высота от поверхности земли, d - фронтальный размер здания, перпендикулярный направлению ветра, h - высота здания. Настоящая схема значительно упрощает определение ветровых нагрузок и их использование в вычислительных комплексах типа *Lira*, *Skad* и др. Особенностью названных схем является скачкообразный переход от одного значения коэффициента ветрового напора к другому значению на фиксированных высотных отметках.

В качестве эталонной расчетной модели, принято здание, высотой 80 метров, загруженное ветровой нагрузкой в соответствии со схемой на рисунке 2, усилия (M_0 , P_0). Рассматривались и анализировались также усилия от ветровой нагрузки для зданий, призматического очертания с размерами фронтальной ветровой поверхности $h \times d = 80 \times 80$ м, усилия (M_1 , P_1); $h \times d = 80 \times 40$ м (M_2 , P_2) и $(80 \times 20$ м (M_3 , P_3), как наиболее соответствующие номенклатуре массового гражданского строительства. Для каждой модели представлены, соответствующие схемы приложения ветровой нагрузки (рисунок 3) и, в соответствии с (таблица 1.), вычислены коэффициенты k_{ze} . Численные значения изгибающих моментов и ярусных сил определялись для зданий, расположенных в III ветровом районе ($w_0 = 0,38$ кПа), с наветренной стороны ($c = 0,8$), на основании полученных схем приложения основной ветровой нагрузки и распределения коэффициента ветрового давления k_{ze} .

Таблица 1 - Величины z_e при различных значениях соотношениях h и d

	h/d	z_e	k_{ze}
а.	$h \leq d$	$z_e = h$	1,45
б.	$h \leq 2d$		
	$z \geq h-d$	$z_e = h$	1,45
	$0 < z < h-d$	$z_e = d$	1,1
в.	$h > 2d$		
	$z \geq h-d$	$z_e = h$	1,45
	$d < z < h-d$	$z_e = z$	1,1
	$0 < z \leq d$	$z_e = d$	0,85

Результаты исследования

Результаты исследования представлены в графической форме. Вычисленные значения M и P в графической форме изложены на рисунке 4 и рисунке 5, а численные значения усилий указаны в легенде к рисункам.

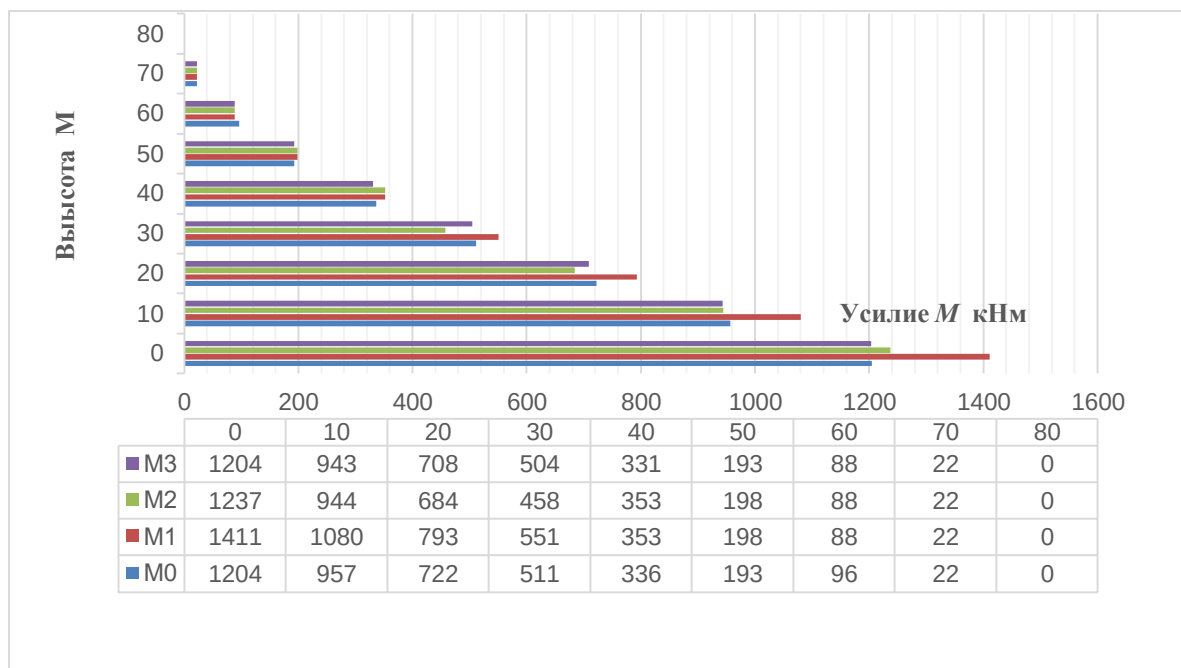


Рисунок 4 - Величины изгибающих моментов M при различных схемах приложения ветровой нагрузки

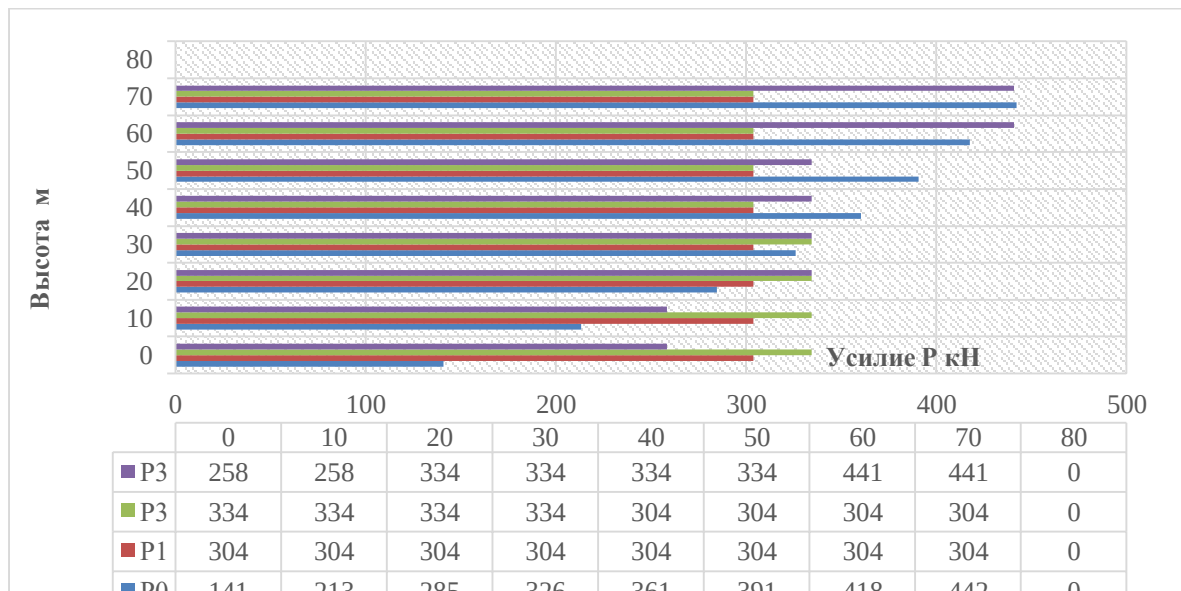


Рисунок 5 - Ярусные усилия P при различных схемах приложения ветровой нагрузки

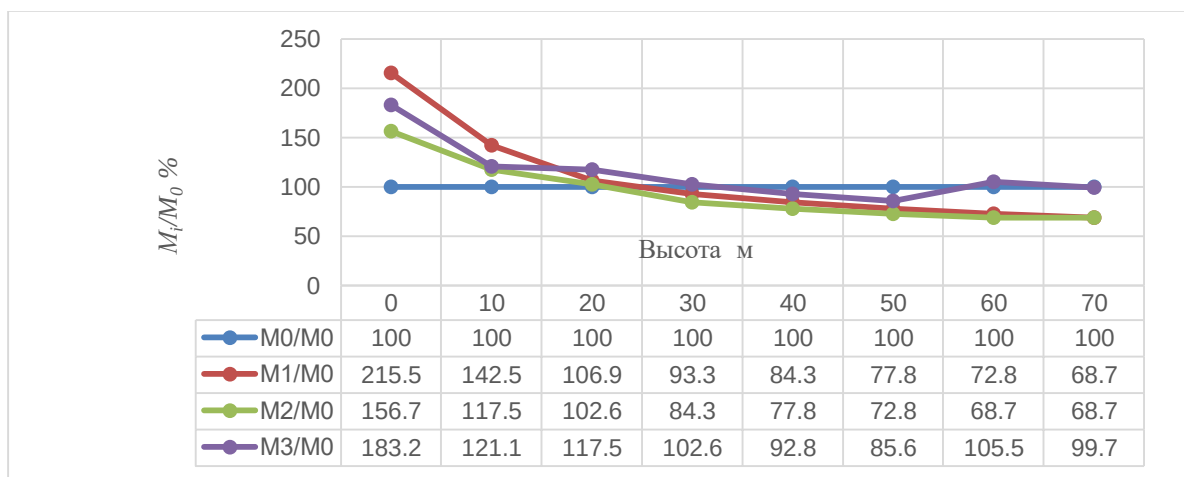


Рисунок 6 - Отношение M_i/M_0 для различных типов зданий и высотных отметок

Диаграмма (рисунок 4) свидетельствуют о неоднозначности оценок изгибающих моментов усилий от ветровой нагрузки на представленный класс зданий. Так, если принять значения изгибающих моментов, полученные в соответствии со схемой «0» за эталонные, то видно, что усилия от ветровых нагрузок зависят как от пропорций фронтальной поверхности модели ($h \times d$) так и соответствующих коэффициентов k_{ze} .

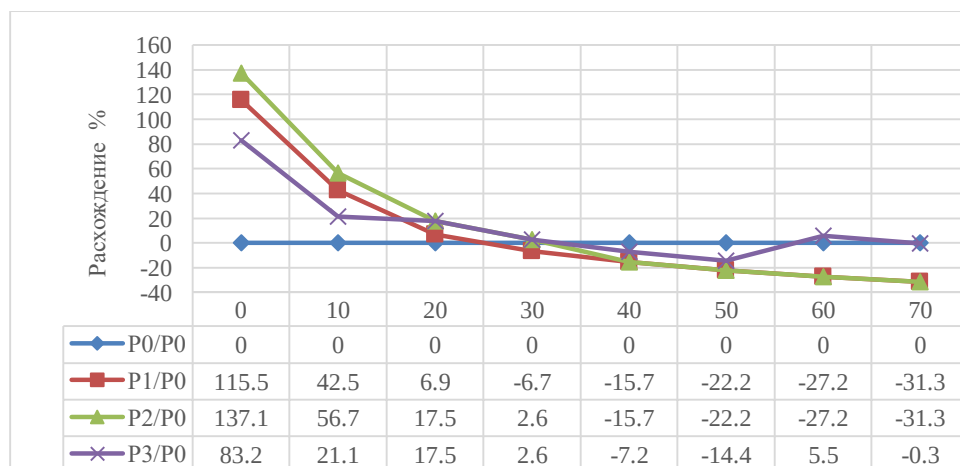


Рисунок 7 - Отношение P/P_0 для различных типов зданий и высотных отметок %

Диаграмма (рисунок 5) также показывает неоднозначность оценок ярусных сил от ветровой нагрузки для зданий с различными пропорциями фронтальной поверхности. Аналогично, приняв значения сил, полученных в соответствии со схемой «0» за эталонные, видно, что усилия от ветровых нагрузок существенно зависят как от пропорций фронтальной поверхности модели ($h \times d$) так и значений соответствующих коэффициентов k_{ze} .

Так для зданий типа 1 (80×80 м) имеют место значительные превышения изгибающих моментов в диапазоне высот от 0 до +30 м (215,5%) и недооценке выше +70 м (68,7%). Для зданий типа 2 (80×40 м) максимальное превышение моментов составляет 156,7% и недобор 68,7%, для здания типа 3 с размерами в плане (80×20 м) 183,2% и 99,7%, соответственно (рисунки 6, 7). Скачки значений моментов для схем №2 и №3 являются следствием изменения коэффициента при переходе с одной высотной отметки на другую.

Для поперечных (ярусных) сил также отмечается скачкообразное изменение, связанное с изменением коэффициента ветрового давления. Размах отклонений не менее значителен и

составляет в максимуме 137,1% для схемы типа 2 и 115,5% для схемы 1. На высоте 40 более метров значения поперечных сил меньше номинала (P_0) и достигают 31,3%.

Выводы

1. Для зданий призматического очертания в диапазоне высот от 0 до 80 метров имеются отдельные участки, где усилия от основной ветровой нагрузки существенно различаются, в зависимости от методики определения высотных коэффициентов.
2. Выявленная неоднозначность, используемых в практике проектирования распределения ветровой нагрузки, допускает возможность превышения или недогруженности отдельных элементов или конструкций в целом.
3. Представленные результаты позволяют уточнить распределение ветровых нагрузок на здания с различными пропорциями фронтальной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Обрушения зданий, мостов и дамб. <https://pointeresam.ru/fact/vnezapnoe-razrushenie-stroitelnykh-konstrukcij-v-rezultate-technogennykh-katastrof>.
2. Ротери Г. Катастрофа на мосту Тей: отчет следственного суда и отчет г-на Ротери об обстоятельствах, связанных с падением части моста Тей 28 декабря 1879 г. https://www.railwaysarchive.co.uk/documents/BoT_TayInquiry1880.pdf
3. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии. <https://apr.ru/article/14579>.
4. Танцующий мост в Волгограде: причины, аналогии, мероприятия. Часть 1. Причины // Интернет-журнал «Науковедение». 2015. Том 7. № 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tantsuyuschiy-most-v-volgograde-prichiny-analogii-meropriyatiya-chast-1-prichiny>.
5. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения. М.: Стройиздат, 1984. 360 с.
6. Дубинский С.И. Расчеты высотных сооружений при ветровом воздействии. http://old.inm.ras.ru/library/seminars/s9-mmgsdp/Dubinsky_100211.pdf.
7. Ким Д.А. Анализ ветрового воздействия на здания и сооружения // Инженерный вестник Дона. 2020. №12. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6699>
8. Федеральный закон № 384 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».
9. СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. М., 1985
10. СП 20.13330.2011 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2012.
11. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. М., 2016.
12. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия. (EN 1991-1-4:2005, IDT).
13. Федеральный закон от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ. «О техническом регулировании».

REFERENCES

1. Obrucheniya zdaniy, mostov i damb [Collapse of buildings, bridges and dams]. <https://pointeresam.ru/fact/vnezapnoe-razrushenie-stroitelnykh-konstrukcij-v-rezultate-technogennykh-katastrof>.
2. Rothery H. Tay bridge disaster. https://www.railwaysarchive.co.uk/documents/BoT_TayInquiry1880.pdf
3. Raschety vysotnykh sooruzheniy pri vetrovom vozddeystvii. <https://apr.ru/article/14579>.
4. Tantsuyushchiy most v Volgograd: prichiny, analogii, meropriyatiya. Chast' 1. Prichiny [Dancing bridge in Volgograd: reasons, analogies, activities. Part 1. Reasons]. Internet-zhurnal «Naukovedeniye». 2015. Tom 7. No 6. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tantsuyuschiy-most-v-volgograde-prichiny-analogii-meropriyatiya-chast-1-prichiny>.
5. Simiu E., Scanlan R. Vozdeystviye vetra na zdaniya i sooruzheniya [The impact of wind on buildings and structures]. Moscow: Stroyizdat, 1984. 360 p.
6. Dubinskiy S.I. Raschety vysotnykh sooruzheniy pri vetrovom vozddeystvii [Calculations of high-rise structures under wind action]. http://old.inm.ras.ru/library/seminars/s9-mmgsdp/Dubinsky_100211.pdf.
7. Kim D.A. Analiz vetrovogo vozddeystviya na zdaniya i sooruzheniya [Analysis of wind impact on buildings and structures]. Inzhenernyy vest-nik Dona. 2020. №12. <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n12y2020/6699>

8. Federal law of Russian Federation No 384 «Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti zdaniy i sooruzheniy» [Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures].
9. Building Code of USSR SNiP 2.01.07-85. Nagruzki i vozdeystviya [Loads and impacts]. Moscow, 1985
10. Building Code of RF SP 20.13330.2011 Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85* [Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85 *]. Moscow, 2012.
11. SP 20.13330.2016 Nagruzki i vozdeystviya. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.01.07-85*. [Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85 *]. Moscow, 2016.
12. Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions. (EN 1991-1-4:2005, IDT).
13. Federal law of Russian Federation. Introduced 27.12.2002, No 184-FZ. «O tekhnicheskoy regulirovaniy» [On technical regulation].

Информация об авторах:

Кузнецов Виталий Сергеевич

ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
кандидат технических наук, профессор кафедры Архитектурно-строительного проектирования.
E-mail: kuznetsovs@mgsu.ru

Шурушкин Алексей Александрович

ФГБОУ «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), г. Москва, Россия,
студент Мытищинского филиала НИУ МГСУ.
E-mail: shurushkin@bk.ru

Information about authors:

Kuznetsov Vitaly S.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia,
candidate of Technical Sciences, Professor of the Department of Architectural and Construction Design.
Email: kuznetsovs@mgsu.ru

Shurushkin Alexey A.

National Research Moscow State University of Civil Engineering (MGSU), Moscow, Russia,
student of the Mytishchi branch of the MGSU.
E-mail: shurushkin@bk.ru