

ДОСТИЖЕНИЯ НАУКИ – ПРОИЗВОДСТВУ



УДК 699.841

А.И. КАРАКОЗОВА, В.Л. МОНДРУС

АНАЛИЗ НАГРУЗОК НА ВЫСОТНЫЕ БАШЕННЫЕ СООРУЖЕНИЯ В СЕЙСМООПАСНЫХ РАЙОНАХ

Статья посвящена расчету высотных металлических решетчатых опор для нужд связи. Основное сочетание нагрузок для данного вида сооружений – весовое и ветровое, в редких случаях учитывается гололедная нагрузка. Однако в сейсмоопасных регионах страны также есть необходимость возведения башенных сооружений для передачи информации на расстоянии. Рассматриваются особенности расчета на сейсмическое и ветровое воздействие, позволяющие запроектировать оптимальное по весу сооружение во избежание лишних затрат ресурсов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: башня, опора связи, ветровое воздействие, сейсмическое воздействие, динамика, пульсации.

DOI 10.32683/0536-1052-2021-746-2-112-119

На сегодняшний день цифровое телевидение, мобильная связь и интернет распространились на все регионы России. Для передачи сигнала сети на большие расстояния требуются специальные конструкции – башенные и мачтовые опоры [1]. Как правило, эти конструкции являются металлическими, решетчатыми (пространственная ферма треугольного или квадратного в плане сечения) и опираются на железобетонные фундаменты. Башни и мачты используются для размещения на них антенного оборудования и инженерных сетей, что оказывается удобно по следующим причинам.

1. Конструкции достаточно «легкие» в сравнении с сооружениями аналогичной высоты из железобетона или из металла, но со сплошной структурой (не решетчатой).

2. Сооружение может быть запроектировано любой необходимой высоты и жесткости (для корректной работы оборудования крайне важна высота его установки, а также выполнение второго предельного состояния по линейным и угловым деформациям места крепления антенн).

3. Налажена система доступа к оборудованию: на конструкции имеются специальные лестницы и площадки. Безусловно, лифты, установленные на Останкинской или Эйфелевой башне, намного удобнее, но у сооружений связи нет цели столь частого подъема на них обывателей, да и упомянутые сооружения гораздо массивнее и «тяжелее».

© **Каракозова А.И., Мондрус В.Л., 2021**

4. По типовым проектам башен и мачт можно построить большое число сооружений, если предполагаемое место строительства подходит под проект по климатологическим характеристикам.

Действительно, помимо веса, основной нагрузкой для башен и мачт является климатологическое воздействие, главным образом, ветровое. Однако некоторые регионы страны являются сейсмоопасными. И даже сочетание сильных ветров и сильных землетрясений в одном и том же регионе не редкость, что, впрочем, не может помешать строительству объектов связи. Следует только правильно оценить действие этих природных явлений, что рассмотрено в ряде работ отечественных и зарубежных авторов [2–6].

Проектировщику следует обеспечить прочность, жесткость и устойчивость конструкций в условиях, которые диктует «Техническое задание на проектирование». А оно требует, чтобы опора связи выдерживала все неблагоприятные климатические факторы для любого региона страны, т.е. проходила проверку по прочности (первая группа предельных состояний) и деформативности (вторая группа предельных состояний).

В СП 20.13330.2018 «Нагрузки воздействия» (приложение Е, карта № 2) районирование территории Российской Федерации произведено на восемь ветровых районов по величине давления ветра (от Ia до VII). В СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах» (приложение А) содержатся списки районирования по типам сейсмической активности (7, 8, 9 баллов). При этом следует напомнить п. 5.1 СП 14.13330.2018 о том, что эти воздействия одновременно не учитываются, т.е. расчет на сочетание сеймики и ветра не требуется. Это порой «расслабляет» проектировщика и представляет собой опасность неучета некоторых важных факторов. Иногда результаты расчета на сейсмическое воздействие по величине преобладают над ветровыми нагрузками. Если это не учесть, то за короткий период сейсмической активности, даже не достигшей максимальной балльности, можно «потерять» опору связи.

Цель данной статьи найти соотношение между воздействием ветра и сеймики. Это поможет эффективно проектировать высотные сооружения с минимальным расходом строительных материалов (сталь для каркаса и железобетон для фундамента), что, безусловно, очень важно для серийных конструкций.

Ветровые нагрузки определяются в соответствии с СП 20.13330.2018 (раздел 11.1.8), где содержатся формулы по вычислению горизонтальных средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия [7].

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки определяется по формуле

$$W_m = W_0 k(z_e) c, \quad (1)$$

где W_0 – нормативное значение ветрового давления на высоте 10 м над поверхностью земли;

$k(z_e)$ – коэффициент распределения ветрового давления по высоте;

c – аэродинамический коэффициент.

Нормативное значение пульсационной составляющей ветровой нагрузки на сооружение (при условии, что $f_1 < f_l < f_2$ (где f_l – предельная частота, указанная в табл. 11.5 СП 20.13330.2018, f_1, f_2 – первая и вторая собственные частоты колебаний сооружения, устанавливаются расчетом)) вычисляется по формулам п. 11.18б:

$$W_p = W_m \xi \zeta k(z_e) v, \quad (2)$$

где ξ – коэффициент динамичности, определяется по рис. 11.1 СП 20.13330.2018 для соответствующего декремента колебаний d в зависимости от параметра e_1 ;

$$e_1 = \sqrt{\frac{\gamma_f W_0}{940 f_1}}; \quad (3)$$

$\zeta(z_e)$ – коэффициент пульсаций давления ветра, принимаемый по таблице 11.4 СП 20.13330.2018;

v – коэффициент пространственной корреляции пульсаций давления ветра (табл. 11.6 СП 20.13330.2018).

Нормативное значение полной ветровой нагрузки W на сооружение определяется как сумма средней W_m и W_p пульсационной [10] составляющих по формуле

$$W = W_m + W_p. \quad (4)$$

Сейсмические нагрузки устанавливаются в соответствии с СП 14.13330.2014 «Нагрузки воздействия» (раздел 5.5), где содержатся формулы по вычислению расчетной горизонтальной сейсмической нагрузки [8]. При слиянии формул (5.1) и (5.2) СП 14.13330.2018 получается следующее выражение для сейсмической нагрузки

$$S_{ij} = K_1 K_2 Q_k A \beta_i K_\psi \eta_{ij}, \quad (5)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений (коэффициент предельных состояний);

K_2 – коэффициент, учитывающий конструктивные особенности зданий и сооружений;

$Q_k = g m_i$ – вес здания или сооружения, отнесенный к точке k (вес массы m_i);

A – коэффициент, значения которого равны 0,1; 0,2; 0,4 соответственно для расчетной сейсмичности 7, 8, 9 баллов;

β_i – коэффициент динамичности, соответствующий i -му тону собственных колебаний зданий или сооружений и дифференцированный по грунтам I, II и III категорий;

K_ψ – коэффициент, зависящий от диссипативных свойств конструкций и оснований;

η_{ij} – коэффициент, зависящий от формы деформации здания или сооружения при его собственных колебаниях по i -му тону и от места расположения нагрузки.

Ветровая и сейсмическая нагрузки, определенные по формулам (1)–(4), а также вес конструкций и оборудования были приложены к конструкциям, расчет производился в ПК SCAD [9, 10]. Далее приводится таблица, в которую сведены полученные результаты расчета по двум указанным воздействиям (СП 20.13330.2018 и СП 14.13330.2018) [11]. Результаты даны в виде интегрированных суммарных ветровых и сейсмических величин нагрузок и усилий для решетчатых конструкций башенных сооружений высотой от 14 до 153 м (рис. 1).

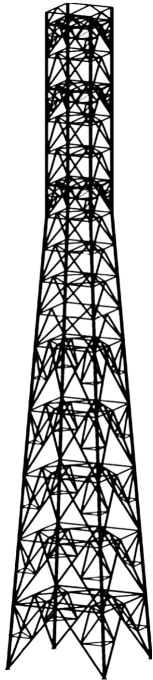


Рис. 1. Башня связи

Результаты расчета

Высота опоры, м	Ветровой нагрузки		Сейсмической нагрузки	
	Q_p , кН	$M_{изг}$, кНм	Q_p , Кн	$M_{изг}$, кНм
Ветровой район Ia, сейсмичность 7 баллов				
14	12	98	13	132
35	41	981	29	491
70	59	2453	44	1864
85	147	7259	118	8437
153	432	31 588	235	26 978
Ветровой район I, сейсмичность 7 баллов				
14	16	132	13	132
35	56	1344	29	491
70	79	3335	44	1864
85	211	9859	118	8437
153	608	42 870	235	26 978
Ветровой район II, сейсмичность 8 баллов				
14	20	167	29	363
35	73	1746	59	1050
70	108	4365	118	4709
85	275	12851	275	16677
153	795	55 917	598	70 436
Ветровой район III, сейсмичность 8 баллов				
14	28	206	29	363
35	98	1913	59	1050
70	128	5543	118	4709
85	304	16 187	275	16 677
153	1059	70 828	598	70 436
Ветровой район IV, сейсмичность 9 баллов				
14	33	284	46	589
35	117	2865	108	2060
70	166	7093	177	7750
85	361	20 876	461	34 335
153	1265	91 037	981	113 796
Ветровой район V, сейсмичность 9 баллов				
14	42	412	46	589
35	142	3581	108	2060
70	207	8829	177	7750
85	451	26 095	461	34 335
153	1579	111 834	981	113 796

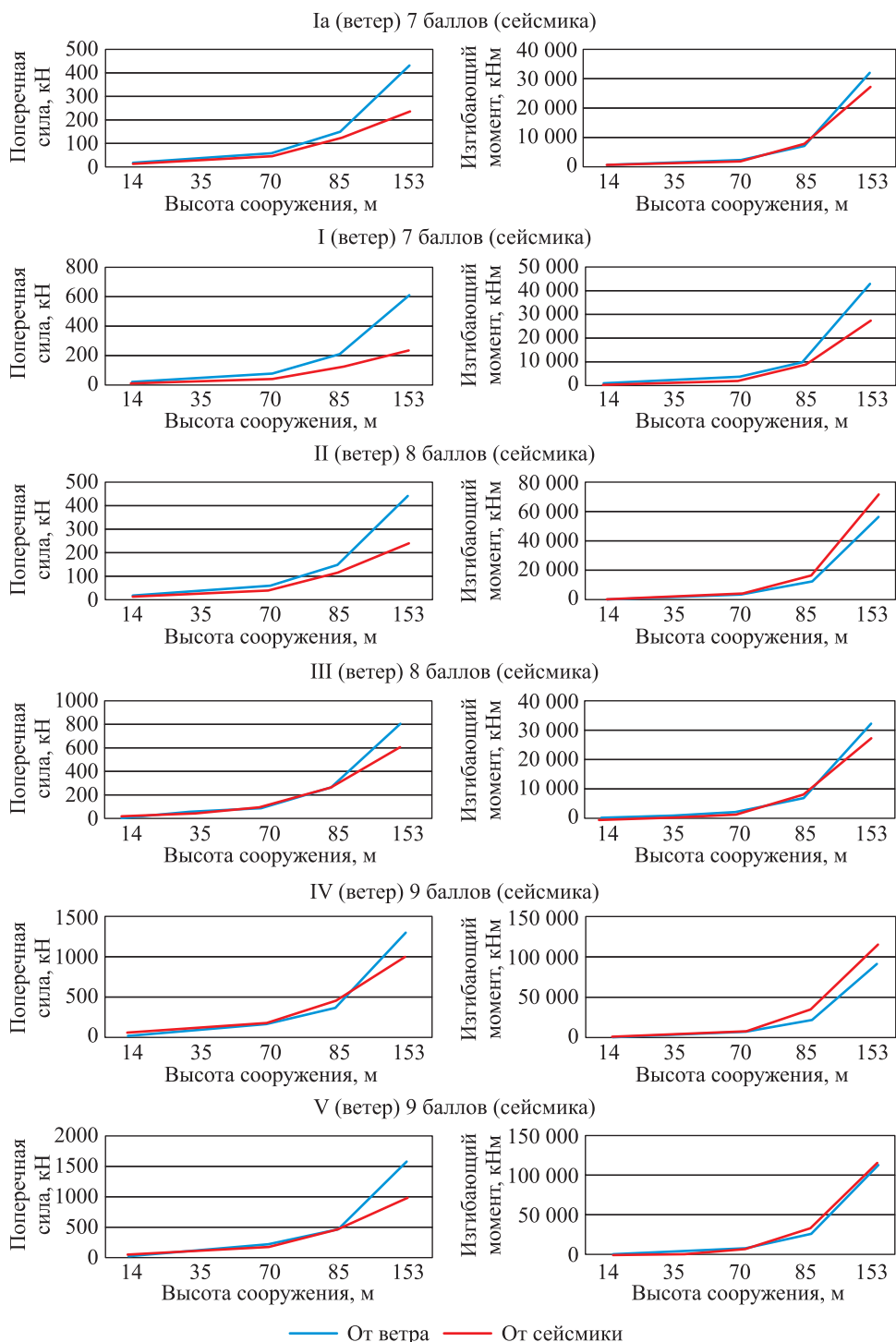


Рис. 2. Графики зависимости высоты сооружения и преобладающих усилий по ветровым и сейсмическим районам

В подобных конструкциях имеет значение суммарная полная нагрузка от ветровой или сейсмической нагрузки, которая действует горизонтально. Полученные от нее изгибающие моменты $M_{изг}$ и поперечные силы Q_p определя-

ют массу стали и железобетона, которые следует применить. Чем корректнее оценены эти величины, тем экономичнее получится проектное решение. Поэтому приводится сравнительная таблица, которая содержит значения усилий: $M_{изг}$ (суммарный изгибающий момент) и Q_p (суммарная поперечная сила), воспринимаемые фундаментом на отметке 0,00 м. Из нее видно, какой климатический фактор (ветровая или сейсмическая нагрузка) оказывает большее влияние в конкретной географической точке площадки строительства [11].

По таблице построены графики (рис. 2), на которых видно, что при строительстве в сейсмоопасном районе для башен небольшой высоты (до 30 м) и башен большой высоты (более 150 м) сейсмическая нагрузка является основной. Для башен средней высоты (от 30 до 150 м) основной, в подавляющем большинстве случаев, оказывается ветровая нагрузка.

Приведенные в таблице величины усилий могут помочь конструктору и расчетчику ориентироваться в том, какие из видов воздействий имеют наибольшее значение для высотных конструкций. С одной стороны, важно экономить используемые строительные материалы, с другой – оптимизация ни в коем случае не должна подменяться пренебрежением к тем видам климатических нагрузок на стадии проектирования, которые могут привести сооружение в аварийное состояние.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мондрус В.Л., Каракозова А.И. Об особенностях расчета башенных сооружений // Строительная механика и расчет сооружений. 2020. № 6. С. 56–60.
2. Гутникова В.А., Сетуха А.В. Моделирование сочетания сейсмических и ветровых нагрузок при проектировании высотных зданий // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2013. № 4. С. 24–31.
3. Куликов А.Н. Расчет сооружений на сейсмические воздействия и ветровую нагрузку с пульсационной составляющей / Волгоград. гос. архитектурно-строит. ун-т. Волгоград, 2008. 91 с.
4. Сабирова О.Б. Оценка коэффициентов сочетаний сейсмической и ветровой нагрузок // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018. № 6. С. 39–43.
5. Uğur Albayrak, Loai Morshid. Evaluation of seismic performance of steel lattice transmission towers // Civil Engineering Journal. 2020. No. 10. P. 2024–2044.
6. Каракозова А.И. Расчет высотных сооружений с низким конструкционным демпфированием и учетом воздействия пульсаций скорости ветра: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2013.
7. Гордеев В.Н., Лантух-Лященко А.И., Павшинский В.А., Перельмутер А.В., Пичугин С.Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения / под общ. ред. Перельмутера А.В. 3-е изд., перераб. М.: Изд-во АСВ, 2009. 480 с.
8. Xiao Ke Li, Zhihao Wang, Jian Liu, Fu Li Song. study on seismic performance of archaized steel tower // Applied Mechanics and Materials. 2013. October. P. 438–439; 1524–1528.
9. Holmes John D., Bekele Seifu A. Wind loading of structures. 4th edition. Book. 2020. October. 638 p.
10. Семенов А.А., Старцева Л.В., Маляренко А.А., Порываев И.А. Строительная механика. Применение ПК SCAD Office для решения задач динамики и устойчивости стержневых систем. М., 2018. 255 с.

11. *Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф.* Основы метода расчета предельных состояний. М.: Изд-во СКАД СОФТ, Изд-во АСВ, 2019. 240 с.

Каракозова Анастасия Ивановна, канд. техн. наук, доц.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Мондрус Владимир Львович, д-р техн. наук, проф.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Получено после доработки 12.11.2020

Karakozova Anastasiya Ivanovna, PhD, Ass. Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

Mondrus Vladimir L'vovich, DSc, Professor

National Research Moscow State University of Civil Engineering, Russia

ANALYSIS OF LOADS ON HIGH-RISE TOWER STRUCTURES IN A SEISMIC AREAS

High-rise metal supports for communication needs are designed mainly for a combination of weight and wind loads. However, in earthquake-prone regions of the country, there is also a need to transmit information at a distance. The article discusses the features of the calculation for seismic and wind effects, allowing to design an optimal structure in terms of weight to avoid unnecessary waste of resources.

Key words: tower, communication support, wind action, seismic action, dynamics, pulsations.

REFERENCES

1. *Mondrus V.L., Karakozova A.I.* Ob osobennostyakh rascheta bashennykh sooruzheniy [On the features of the calculation of tower structures]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and calculation of structures]. 2020. No. 6. Pp. 56–60. (in Russian)
2. *Gutnikova V.A., Setukha A.V.* Modelirovaniye sochetaniya seymicheskikh i vetrovykh nagruzok pri proektirovaniyi vysotnykh zdaniy [Modeling a combination of seismic and wind loads in the design of high-rise buildings]. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Safety of structures]. 2013. No. 4. Pp. 24–31. (in Russian)
3. *Kulikov A.N.* Raschet sooruzheniy na seymicheskiye vozdeystviya i vetrovuyu nagruzku s pul'satsionnoy sostavlyayushchey [Calculation of structures for seismic effects and wind load with a pulsation component]. Volgograd, 2008. 91 p. (in Russian)
4. *Sabirova O.B.* Otsenka koeffitsientov sochetaniy seymicheskoy i vetrovoy nagruzkok [Assessment of the coefficients of combinations of seismic and wind loads]. *Seysmostoykoye stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy* [Seismic construction. Safety of structures]. 2018. No. 6. Pp. 39–43. (in Russian)
5. *Uğur Albayrak, Loai Morshid.* Evaluation of seismic performance of steel lattice transmission towers. *Civil Engineering Journal*. 2020. No. 10. Pp. 2024–2044.
6. *Karakozova A.I.* Raschet vysotnykh sooruzheniy s nizkim konstruksionnym dempfirovaniyem i uchetom vozdeystviya pul'satsiy skorosti vetra: Dis. ... kand. tekhn. nauk [Calculation of high-rise structures with low structural damping and taking into account the effect of wind speed pulsations: Candidate's thesis]. Moscow, 2013. (in Russian)

7. *Gordeev V.N., Lantukh-Lyashchenko A.I., Pavshinsky V.A., Perelmuter A.V., Pichugin S.F.* Nagruzki i vozdeystviya na zdaniya i sooruzheniya [Loads and effects on buildings and structures]. Moscow, 2009. 480 p. (in Russian)
 8. *Xiao Ke Li, Zhihao Wang, Jian Liu, Fu Li Song.* Study on seismic performance of archaized steel tower. Applied Mechanics and Materials. 2013. October. Pp. 438–439; 1524–1528.
 9. *Holmes John D., Bekele Seifu A.* Wind loading of structures. 4th edition. Book. 2020. October. 638 p.
 10. *Semenov A.A., Startseva L.V., Malyarenko A.A., Poryvaev I.A.* Stroitel'naya mekhanika. Primeneniye PK SCAD office dlya resheniya zadach dinamiki i ustoychivosti sterzhnevyykh sistem [Structural mechanics. PC SCAD application for solving problems of dynamics and stability of rod systems]. Moscow, 2018. 255 p. (in Russian)
 11. *Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F.* Osnovy metoda rascheta predel'nykh sostoyaniy [Fundamentals of the method for calculating limit states]. Moscow, 2019. 240 p. (in Russian)
-