

Получена: 15.09.2017 г.

Приета: 05.12.2017 г.

ЕДНОВРЕМЕННО ДЕЙСТВИЕ НА ВЯТЪР И ОБЛЕДЯВАНЕ ВЪРХУ ЛЕКИ МЕТАЛНИ СЪОРЪЖЕНИЯ – АНАЛИЗ НА НОРМАТИВНАТА БАЗА

С. Жекова¹

Ключови думи: атмосферно обледяване, вятър, нормативно осигуряване, мачти

РЕЗЮМЕ

Направен е преглед и анализ на особеностите при комбиниране на товарите от вятър и обледяване в съответствие с нормативите на редица страни. Разгледана е степента на осигуреност, получена при различните методи за комбиниране и възможността за съпоставка между тях.

1. Въведение

Едновременното действие на вятър и обледяване е меродавно товарно състояние при леки стоманени конструкции, пример за които са мачтите за метеорологични измервания на големи височини. Последните достигат по настоящем височини до 140 m, а конструктивното им решение включва решетъчен ствол, поддържан от въжета в няколко направления и посоки. Съоръжението се състои от множество елементи с малки напречни сечения, които при условия на атмосферно обледяване могат лесно да увеличат размерите си значително, а оттам и размерите на обдуханата от вятъра площ. Натоварването от вятър в тези условия може да доведе до неколккратно по-големи ефекти върху конструкцията в сравнение със самостоятелното му действие.

В последните десет години, в рамките на сътрудничество между „Линк“ ООД и „СМЕ Уинд“ ЕООД, беше разработен български продукт на фамилия от метеорологични мачти с височини от 80 до 140 m, които с над 500 реализирани обекта намериха прило-

¹ София Жекова, инж. докторант, кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: s.zhekova@link-bg.net

жение не само в повечето европейски страни, но и в държави като САЩ, Канада, Грузия и др. Това наложи разглеждане, съпоставка и анализ на генерираната сигурност и надеждност на нормативното осигуряване при едновременно действие на вятър и обледяване в световен мащаб.

2. Базови принципи и особености на комбинацията от вятър и обледяване и генерираната от нея надеждност

2.1. При самостоятелно действие на вятър или обледяване

Нивото на сигурност и надеждност при самостоятелно действие на вятъра или обледяването се обезпечава чрез определяне на характеристична стойност на базовия параметър на въздействието с годишна вероятност срещу превишение 0,02 (т.е. 2%). Последното се изразява още като вероятност за превишение веднъж за период от 50 години, а самият период се нарича още „период на повторение“. Определянето на тази стойност, както и на количественото вероятностно разпределение на максимумите на базовия параметър (скорост на вятъра, дебелина на стъкловиден лед, маса на скрежа) е предмет на дългогодишни наблюдения и анализ в метеорологичните станции.

Ако всяка отделна година от периода на повторение T се разглежда като статистически независима величина, то за целия експлоатационен срок на конструкцията L , рискът r за превишение на характеристичната стойност на базовия параметър може да се изчисли така [1]:

$$r = 1 - \left[1 - \frac{1}{T} \right]^L. \quad (1)$$

Така при $T = L = 50$ год., вероятността за превишение във всяка отделна произволна година от периода е $(1/T)$, т.е. 2%, но в рамките на целия експлоатационен период от 50 години тази вероятност е 64%.

В метода по гранични състояния, прилаган не само от Еврокод но и в световен мащаб, изчислителната стойност на въздействието се обезпечава допълнително срещу възможно неблагоприятно отклонение чрез частен коефициент за сигурност на въздействията.

2.2. При едновременно действие на вятър и обледяване

Генерирането на сигурност и надеждност при едновременното действие на вятър и обледяване по същество е корелационен анализ на два независими случайни параметъра, при които се цели постигане на определения от норматива показател на надеждност. Този анализ, изведен на ниво нормативна методика за приложение в проектантската практика, се изразява в следното: въздействията от вятър и обледяване са променливи и вероятността да се проявят едновременно с пълните си характеристични стойности през време на базовия период е малка, поради което едното въздействие в комбинацията се приема за главно, а другото за съпътстващо. Последното има намалена стойност (част от характеристичната), която се определя от коефициента $\psi_{0,i}$ и може да се раз-

глежда още като отговаряща на друг фрактил от вероятностното разпределение на параметъра или имаща намален период на повторение.

За доказване на носимоспособността при крайно гранично състояние и дълготрайна изчислителна ситуация, в [2] е дефиниран следният метод за комбинация:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} \cdot G_{k,j} + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q,1} \cdot Q_{k,1} + \sum_{i \geq 1} \gamma_{Q,i} \cdot \psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}, \quad (2)$$

където $G_{k,j}$, P , $Q_{k,i}$ са характеристични стойности съответно на въздействието от постоянни товари, предварително налягане и променливи товари;

$\gamma_{G,j}$, γ_P , $\gamma_{Q,i}$ – съответните частни коефициенти за сигурност на товарите;

$\psi_{0,i} \cdot Q_{k,i}$ – стойности за комбинация на съпътстващо временно въздействие.

Изразът (2) илюстрира един основен принцип – заедно с постоянните въздействия може да бъде комбинирано само едно променливо въздействие с пълната му характеристична стойност, а останалите участват със „стойност за комбинация“, определена чрез коефициента $\psi_0 < 1$ като част от характеристичната.

В съответствие с гореизложените принципи в методиката на [3], която е приета от [4], [5] и [6], се препоръчват следните две комбинации при съчетание на вятър и обледяване:

„Доминиращ лед и съпътстващ товар от вятър“

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_{ice} \cdot Q_{k,ice} + \gamma_w \cdot k \cdot \psi_w \cdot Q_{k,w} \quad (3)$$

„Доминиращ вятър и съпътстващ товар от лед“

$$\gamma_G \cdot G_k + \gamma_w \cdot k \cdot Q_{k,w} + \gamma_{ice} \cdot \psi_{ice} \cdot Q_{k,ice}, \quad (4)$$

където $Q_{k,ice}$ и $Q_{k,w}$ е характеристична стойност съответно на обледяването и вятъра;

$\psi_{ice} = 0,3$ и $\psi_w = 0,5$ – коефициенти за получаване на стойност за комбинация съответно на обледяването и вятъра с годишна вероятност за превишение 0,33 (веднъж на три години), тогава когато те не са доминиращото въздействие в комбинацията. Посочените стойности са от [3]. В [4], [5] и [6] се определя $\psi_{ice} = \psi_w = 0,5$.

$k = (0,4 - 0,6)$ при стъкловиден лед – коефициент, който намалява налягането на вятъра при комбинация с лед.

Коефициентът k е една особеност на комбинацията между вятър и обледяване, а именно – вятърът никога не участва в комбинацията с пълната си характеристична стойност, дори когато неговото влияние е доминиращо. В Анекс „С“ на [4] се казва още, че „характеристичната стойност на налягането на вятъра, тогава когато възниква и атмосферно обледяване, е по-малка от същата във всички други ситуации“. Стойностите на коефициента k се увеличават с увеличаване на класа на обледяването, тъй като по-голямо ледено натрупване (по-висок клас лед) е с по-голяма вероятност да бъде последвано от високи скорости на вятъра [3].

По-долу е представен сравнителен анализ на изложената методика съгласно европейския [4] и международния стандарт [3] с нормативите на държави като Русия, САЩ и Канада. Отделно са разгледани нормативните предписания на Германия и Англия, тъй като под флага на „национални приложения“ към Еврокод те въвеждат без изменение

методики, съществували в техни по-стари нормативни документи, които са в разрез с предписания и методи, определени от Еврокод.

3. Европейски, руски и канадски норми – сравнителен анализ

В табл. 1 и табл. 2 в обобщен вид е представена комбинацията на обледяване и вятър съгласно разглежданите в доклада нормативи. В колони (4) и (7), съответно за обледяването и вятъра, е посочена в % частта от характеристичната стойност, с която въздействието участва в комбинацията определена чрез съответните коефициенти, приложени на ниво натоварване. В колони (5) и (8) е посочен периодът на повторение T в год. (там където е указан от норматива) на базовия параметър, който съответства на тази стойност за комбинация.

Таблица 1. Комбинация „Доминиращ вятър“ – сравнение

Норматив	Държава	Участие на обледяването			Участие на вятъра		
		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
(1)	(2)	γ_{ice}	Ψ	T , год.	γ_w	$k.\Psi$	T , год.
[3]	ISO	–	30%	3	–	(40 – 60)%	–
[4],[5],[6]	EU,BG	1,6 – 1,2	50%	3	1,6 – 1,2	(40 – 60)%	–
[7] отпада!	DE	1,5	до 70%	–	1,5	100%	50
[16] до [18]	UK	1,6 – 1,3*	–	2	1,6 – 1,3*	50%	–

* прилага се върху базовия параметър

Таблица 2. Комбинация „Доминиращ лед“ – сравнение

Норматив	Държава	Участие на обледяването			Участие на вятъра		
		(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
(1)	(2)	γ_{ice}	Ψ	T , год.	γ_w	$k.\Psi$	T , год.
[3]	ISO	–	100%	50	–	(20 – 30)%	3
[4],[5],[6]	EU,BG	1,6 – 1,2	100%	50	1,6 – 1,2	(20 – 30)%	3
[7] до [11]	DE	1,5	100%	50	1,5	60%	–
[12]	RU	1,4	100%	5	1,3	25%	–
[13]	CA	1,4	100%	50	1,45	50%	–
[14],[15]	USA	2,0*	100%	50	$\approx 1,5^{**}$	$\approx (10 – 20)\%$	–
[16] до [18]	UK	1,6 – 1,3*	100%	50	–	0%	0

* прилага се върху базовия параметър

** не се прилага в явен вид, а е получен чрез увеличената площ на обледяване

Комбинацията „Доминиращ вятър“ е отхвърлена от разглежданите не-европейски нормативни документи, а така също и от немския такъв. Нейна разновидност е съществувала в немския норматив [7], но бива отменена с въвеждане в сила на [8] и [9], които определят: „Пълният товар от лед се съчетава с 60% от налягането на вятъра“. Немският правилник за проектиране на радио кули и мачти [10] в свой анекс [11] оповестява: „При комбиниране с вятъра, товарът от лед трябва да бъде приет за доминиращ. Коефициентът за комбинация $\psi = 0,6$ да се приеме за вятъра. Не е нужно да се разглежда комбинация, в която вятърът е доминиращо въздействие“.

В комбинацията „Доминиращ лед“ товарът от обледяване участва с пълната си характеристична стойност, имаща период на повторение $T = 50$ год. Изключение прави руският норматив [12], където $T = 5$ год., което се свързва със значително по-ниски нива на надеждност. В допълнение на това, видно от табл. 2, участието на вятъра в комбинацията, определена от [12] е само с 25%, докато при немските нормативи от [7] до [11] то достига 60%. Разликата в така генерираните нива на осигуряване в немските норми е в пъти по-голяма от тази в руските.

До немските норми най-много се доближават канадските [13], с 50% участие на въздействието на вятъра в комбинацията.

Еврокод [4] заема междинно положение, но трябва да отбележим, че неговата комбинация „Доминиращ вятър“ за разглеждания клас мачти е меродавна спрямо препоръчаната пак в [4] комбинация „Доминиращ лед“. Ето защо [4] не може да бъде сравнен директно с нормативите, които не разглеждат комбинация „Доминиращ вятър“.

4. Особенности на американската нормативната база [14] и [15]

Американските нормативи [14] и [15] определят следната комбинация при едновременното действие на вятър и обледяване:

$$1, 2.D + 1, 0.D_g + 1, 0.D_I + 1, 0.W_I + 1, 0.T_I, \quad (5)$$

където D са постоянни товари на конструкцията, с изключение на въжетата;

D_g – постоянен товар на въжетата;

D_I – тегло на леда, изчислителна дебелина на леда;

W_I – съпътстващ товар от вятър за комбинация с обледяване;

T_I – товар от температура.

В (5) обледяването има доминиращо влияние и участва с пълната си номинална стойност. В (5) липсват в явен вид както коефициенти за сигурност по товарите, така и коефициенти за получаване на стойност за комбинация на съпътстващото въздействие. Това е една особеност на американските нормативи, която ще бъде по-долу предмет на разглеждане и дискусия.

В [14] и [15] е отчетен фактът, че връзката между дебелината на леденото покритие (при стъкловиден лед) и полученият товар от обледяване, изразяващ се в тегло на леда и обледена площ за m' , не е линейна. Следователно, когато коефициент на сигурност на товарите се прилага към определения вече товар от обледяване върху даден елемент, то в зависимост от неговия вид и геометричните размери ще се получат нееднозначни стойности за съответстващата дебелина на леда, а оттам и за генерираната степен

на осигуреност. Поради това в [14] и [15] коефициентът за сигурност на товарите се прилага на ниво базов параметър – т.е. към дебелина на стъкловидното обледяване. След като въздействието на вятъра се определи, базирайки се на така увеличената обледена площ, то автоматично получава своя коефициент на сигурност и не е необходимо такъв да се прилага допълнително (в явен вид).

Американските нормативи изискват номиналните стойности на базовите параметри на обледяването и вятъра да имат риск за превишение 64% за период от 50 години, а в крайно гранично състояние за същия период рискът да бъде сведен до 10%. Последното означава, че изчислителната стойност на базовият параметър има период на повторение 500 год. и годишна вероятност за превишение 0,002 (вж. формула (1)).

За постигането на предписаните нива на надеждност са предоставени таблици с „конвертиращи“ коефициенти, които се прилагат към базовите параметри на вятър и обледяване, определени с 50-годишен период на повторение. По смисъл употребата на конвертиращите коефициенти съвпада с тази на коефициентите за сигурност на товарите съгласно Еврокод. В табл. 3 е представена извадка на техните стойности при вятър и обледяване. Видно от табл. 3, при самостоятелно действие, изчислителните стойности на базовите параметри се получават след умножаване на номиналните съответно с 1,23 за вятъра и 2,0 за обледяването. При едновременното действие на вятър и обледяване, в съответствие с казаното по-горе, конвертиращ коефициент е нужно да се приложи само към обледяването.

Другата особеност на американските нормативи [14] и [15] е, че се определят две номинални стойности за скоростта на вятъра – такава в отсъствие на лед, и друга по-малка стойност за комбинация с обледяване. Не съществуват в явен вид коефициенти за комбинация, аналогични на разгледаните по-горе ψ и k . Счита се, че комбинацията от базовите параметри на вятъра, обледяването и температурата е еднозначно определена за всеки регион от картата за райониране на страната, тъй като вятър с определена скорост може да съпътства точно определено количество ледени натрупвания.

За целите на настоящия анализ ще отбележим, че скоростта на вятъра за комбинация с лед варира в повечето случаи от порядъка на 30 – 45% (приведено към скоростен напор съответно $\approx 10 - 20\%$) от стойността ѝ в отсъствие на лед, и само в отделни случаи достига по-малки или по-големи стойности. Важно е да се отбележи още, че американските норми определят директно пиковата скорост и скоростен напор на вятъра чрез прилагане на 3-секунден период на осредняване на порива.

Таблица 3. Извадка от таблици С6-3 и С10-1 на [15]

k_w	T , год.	k_{ice}	<p><i>Означения:</i></p> <p>T – период на повторяемост, год.</p> <p>k_{ice} – коефициент конвертиращ дебелината на стъкловидно обледяване, определена с $T = 50$ г. към други периоди на повторяемост;</p> <p>k_w – коефициент, конвертиращ пиковата скорост на вятъра, определена с $T = 50$ г. към други периоди на повторяемост.</p>
0,93	25	0,80	
1,00	50	1,00	
1,07	100	1,25	
1,14	200	1,50	
1,23	500	2,00	

5. Особенности на английската нормативната база [16], [17], [18]

Особеност на английските нормативи [16], [17] и [18] е определянето на две стойности за базовия параметър на обледяването. Пълната характеристична стойност е определена с годишна вероятност за превишение 0,02 и се използва единствено при самостоятелно действие на товар от обледяване, без участие на вятър в комбинацията.

Относно комбинираното действие на вятър и обледяване, за последното се определя намалена стойност на базовия параметър с годишна вероятност за превишение 0,5 (веднъж на две години). Стойността за комбинация, с която вятърът участва, се определя от коефициента $\psi = 0,5$, приложен към скоростния напор (или 0,707, приложен към базовата скорост на вятъра).

Подобно на американските норми, в английските норми коефициентът за сигурност на товарите се прилага на ниво базов параметър, но за разлика от тях – както към дебелината на обледяване, така и към скоростта на вятъра. Това на практика води до неговото дублиране по отношение на товара от вятър.

6. Изводи и заключение

При комбинирането на вятър и обледяване от съществено значение са две групи коефициенти, чиито методи за приложение варират в разглежданите нормативи:

- коефициенти за сигурност на товарите – прилагани в някои нормативи на ниво определен товар, а при други на ниво базов параметър на въздействието;
- коефициенти за получаване на стойност за комбинация – прилагани в явен вид или прилагане в неявен вид – чрез директно определяне на две стойности за базовите параметри съответно на вятъра [14], [15] или на обледяването [16], [17], [18].

Комбинацията „Доминиращ вятър“, съществуваща в [3] и [4] е отхвърлена от немските и всички не-европейски нормативни документи.

Англия и Германия въвеждат собствени методики за комбиниране на вятъра и обледяването, които са в разрез с основния текст на Еврокод [4].

При едновременното действие на вятър и обледяване съгласно анализираните нормативи са налице значителни различия (достигащи в пъти) в генерираните нива на сигурност и надеждност на проектираното съоръжение. С най-голяма степен на осигуреност са немските нормативи от [7] до [11], следвани от канадския [3], а с най-малка руският [12]. Междинни позиции заемат останалите дискутирани нормативи.

Невъзможно е да се извърши пълна съпоставка в генерираната сигурност и надеждност от разглежданите нормативи без цялостен конструктивен анализ на конкретното съоръжение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Holmes, J. D. Wind loading of structures, стр. 43.
2. EN 1990:2002; Eurocode 0: Basis of structural design.
3. ISO 12494:2017: Atmospheric icing of structures.
4. EN 1993-3-1; Eurocode 3: Design of steel structures-Part3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts.

5. БДС EN 1993-3-1: Еврокод 3. Проектиране на стоманени конструкции. Част 3-1: Кули, мачти и комини. Кули и мачти.
6. БДС EN 1993-3-1/NA: Еврокод 3. Проектиране на стоманени конструкции. Част 3-1: Кули, мачти и комини. Кули и мачти. Национално приложение на България.
7. DIN 1055-5 Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 5: Schnee und Eislasten, 07.2005.
8. DIN EN 1993-3-1; Eurocode 3: Design of steel structures-Part3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts.
9. DIN EN 1993-3-1/NA: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten-Teil 3-1 Türme, Maste und Schornsteine – Türme und Maste, Nationaler Anhang, 12. 2010.
10. DIN V 4131 Antennentragwerke aus Stahl, 11.2008/DIN V 4131 „Стоманени радио мачти и кули“ 11, 2008.
11. DIN V 4131 Antennentragwerke aus Stahl, Ausgabe 11. 2008, Auslegungen zu DIN V 4131 Antennentragwerke aus Stahl, Ausgabe 11. 2008, März 2011.
12. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия, Министерство регионального развития Российской Федерации, Москва, 2011.
13. S37-13 Antennas, towers, and antenna-supporting structures. Canadian Standards Association, November, 2013.
14. ANSI/TIA-222 G-2005. Structural Standard for Antenna Supporting Structures and Antennas, Telecommunications Industry Association, Standards and Technology Department, Arlington, VA 22201, USA.
15. SEI/ASCE 7-02, Minimum Design Loads for Buildings and other Structures, American Society of Civil Engineering, Second Edition, 49 CRF 193.2013.
16. BS 8100-1:1986; Lattice towers and masts. Part 1: Code of practice for loading, Civil Engineering and Building Structures Committee.
17. BS EN 1993-3-1; Eurocode 3: Design of steel structures-Part3-1: Towers, masts and chimneys – Towers and masts.
18. BS NA EN 1993-3-1 (2006) UK National Annex to Eurocode 3. Design of steel structures. Towers, masts and chimneys. Towers and masts.

WIND LOAD COMBINED WITH ATMOSPHERIC ICING ON STEEL LIGHTWEIGHT STRUCTURES – ANALYSIS OF THE NORMATIVE PROVISIONS

S. Zhekova¹

Keywords: atmospheric icing, wind load, normative provisions, mast

ABSTRACT

The major peculiarities in combining wind load along with atmosphere icing are reviewed according to the normative methodologies used in a number of countries. The level of reliability using different combinative approaches and their liability of comparison are under discussion.

¹ Sofiya Zhekova, Eng., PhD student, Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: s.zhekova@link-bg.net