



Получена: 07.05.2021 г.

Приета: 01.06.2021 г.

ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ВЕТРОВО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ВИСОКИ КОМИНИ СЪС СТОМАНЕНА НОСЕЩА КОНСТРУКЦИЯ. ЧАСТ 1: ПРОБЛЕМЪТ

Ст. Райков¹, Н. Рангелов², Д. Динев³

Ключови думи: комин, ветрово въздействие, вихрово възбуждане, число на *Scruton*, интензивност на турбулентността

РЕЗЮМЕ

В доклада се представя анализ на поведението при ветрово въздействие на два еднотипни високи комина с височина съответно 120 m и 140 m, при по-ниския от които се наблюдават опасно големи трептения напречно на посоката на вятъра. Въз основа на направения анализ се доказва, че причина за това са резонансни явления вследствие на вихрово възбуждане.

Основен параметър, характеризиращ склонността на дадена конструкция към появата на резонансни трептения от вихрово възбуждане и големината на амплитудата на тези трептения, е числото на *Scruton*. Чрез подходящи изчислителни модели са извършени теоретични изследвания на съоръженията съгласно различни методики. Получените резултати доказват, че действително 120-метровият комин е застрашен от трептения с големи амплитуди с “lock-in” ефект. При по-високия комин теоретично също се оказва, че се получават резонансни трептения от вихрово възбуждане в направление, напречно на посоката на вятъра, но амплитудите са незначителни и отговарят на нормативните изисквания. Това се дължи на факта, че числото на *Scruton* за този комин се оказва със сравнително висока стойност.

¹ Станислав Райков, гл.ас. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

² Николай Рангелов, проф. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: rangelov_fce@uacg.bg

³ Добромир Динев, доц. д-р инж., кат. „Строителна механика“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg

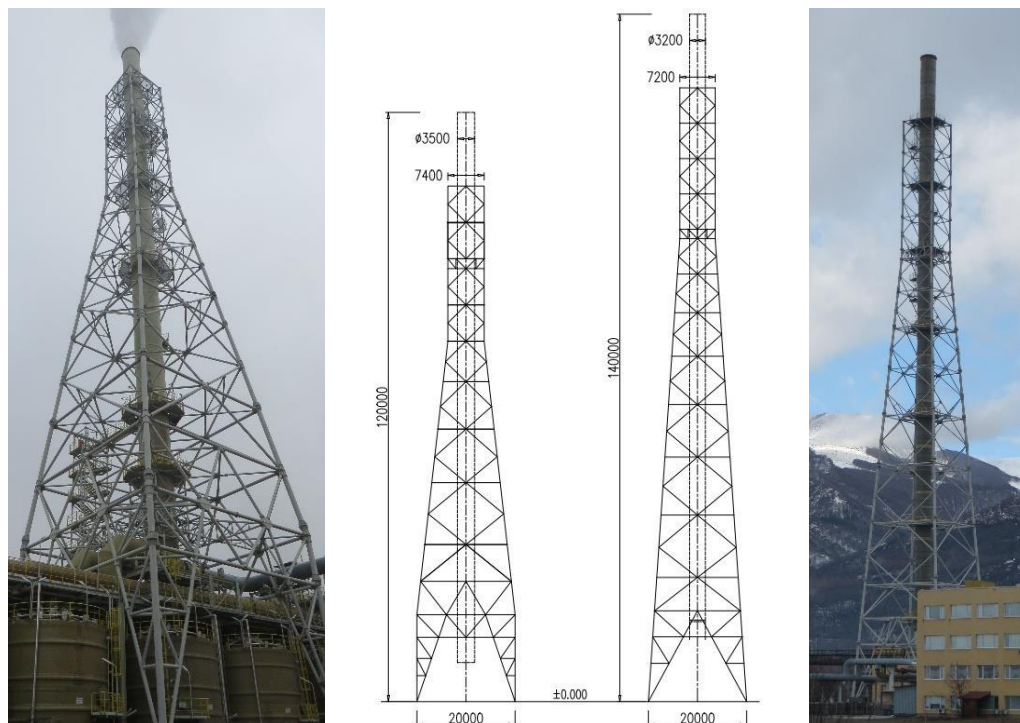
1. Въведение

Изследвано е поведението на два високи комина със стоманена решетъчна носеща конструкция и коминно тяло от стъклопласт (GFRP). Първият комин е с височина 120 метра, а вторият – с височина 140 метра. Композиционното решение на носещата конструкция на двата комина е абсолютно идентично. Разположени са на една и съща площадка, при напълно еднакви експлоатационни условия – натоварване от вятър, сняг, сеизмично въздействие и т.н.

Въпреки това, вследствие на разликата в диаметъра на тръбата на двата комина, както и на различните характеристики на двете конструкции – коравина, маса и, респективно, собствени честоти на свободни трептения, те имат коренно различно поведение най-вече що се отнася до появата на резонансни трептения от вихрово възбуждане при ветрово въздействие. Наблюдаваното поведение на двата комина е изследвано теоретично чрез съответните изчислителни модели и съгласно различни норми и стандарти за проектиране. Резултатите са сравнени помежду си, както и с реалното поведение на съоръжението. Направени са изводи относно корелацията между теоретичните постановки и наблюдаваните на практика явления.

2. Обща информация за двата изследвани комина

2.1. Общи данни



Фиг. 1. Общ вид на двата комина: вляво – 120 m и вдясно – 140 m

Основните параметри на двете съоръжения – необходимата височина с оглед на удовлетворяването на нормативните изисквания за концентрацията на вредните вещества в приземния слой на атмосферата, диаметър на комина, необходим за гарантиране на естествена тяга при извеждането на газовете и минимално използване на принудена тяга, материал за изграждане на коминната тръба, предвид агресивността на извежданите газове и т.н., са определени в технически доклад по части „Технология” и „ОВиК”. Композиционното решение на стоманената конструкция е съобразено с тези основни параметри и спецификата на подпирането на GFRP тръбата по височина. Конструкцията е решетъчна, решена основно с тръбни сечения и ограничено използване на отворени напречни сечения при обслужващите площадки и опорите на тръбата. Стъклопластовата тръба стъпва на стоманената конструкция на кота +96,200 m. Допълнително, през приблизително равни разстояния, са реализирани шест подпирания за хоризонтални товари, при които вертикалното движение на тръбата не е възпрепятствано, последното от които е на нивото на горния край на стоманената кула (кота +125,000 m).

2.2. Наблюдавано поведение и причина за изследването

Причина за провеждане на настоящото изследване се явява поведението на пониския, 120-метров комин, след въвеждането му в експлоатация. Наблюдавани са значителни трептения на комина и носещата конструкция при ветрово въздействие със скорост на вятъра, по-ниска от проектната за района. Въпреки че за по-високия, 140-метров комин, няма данни за подобен проблем, той също е изследван с оглед на прилагането на превантивни мерки, ако това се окаже необходимо.

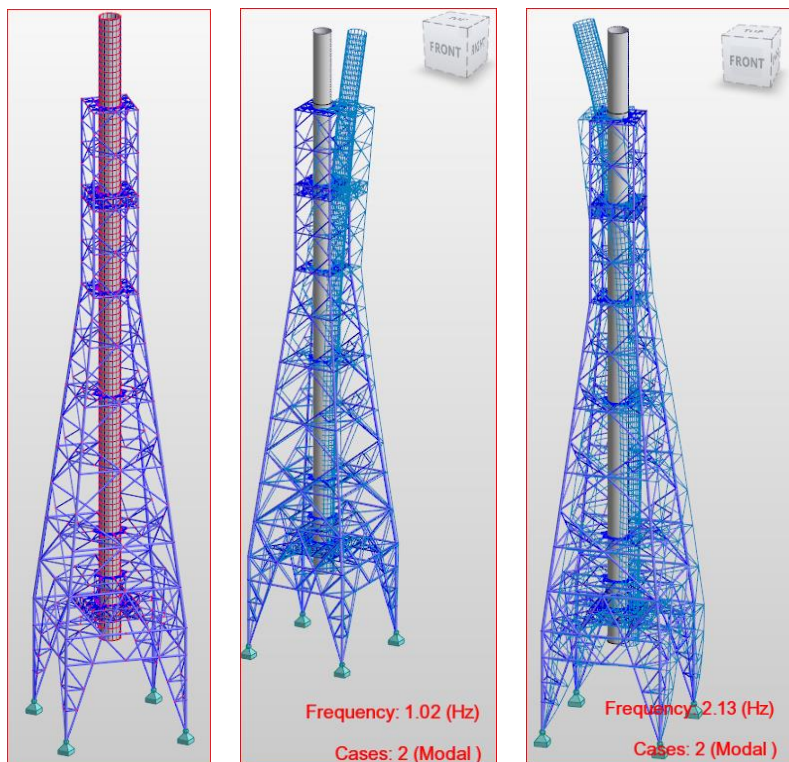
3. Използвана методика

Основна цел на изследването е оценка на поведението на 120-метровия комин при ветрово въздействие и получаване на резултати за глобалното поведение на комина с оглед на изясняването на характера, вида и причините за появата на наблюдаваните трептения на конструкцията, както и оценка на възможността подобно поведение да се наблюдава при по-високия комин. Използваната методика е насочена към оценка на глобалното поведение на съоръжението при ветрово въздействие и, най-вече, към поведението му в напречно на посоката на вятъра направление. Основа за тази насока на изследването са предоставените данни (основно записи от видео наблюдение), от които става ясно, че наблюдаваните значителни трептения на конструкцията най-вероятно са свързани с появата на ветрови резонанс от вихрово възбуждане.

3.1. Изчислителни модели

Разработените изчислителни модели целят установяването на динамичните характеристики на конструкцията – естествени честоти, периоди и собствени форми на свободно трептене, които са основа на направените теоретични изчисления за ветрово въздействие. Направени са изчислителни модели, които да отговарят на т.нар. „проектна“ изчислителна ситуация – с характеристики на материалите и елементите, които съответстват на приетите по време на проектирането. Разработени са и модели в т.нар. „реална“ изчислителна ситуация, възможно най-близки до реално изпълнената конструкция – с характеристики на материалите и елементите, получени от последващи изпитвания и

определени съгласно производствените чертежи на стоманената конструкция и стъкло-пластовата тръба. Някои основни резултати са показани на фиг. 2.



Фиг. 2. Изчислителен модел и основни форми на свободно трепене за 120-метровия комин

3.2. Теоретична основа

Ветровото въздействие върху високи и стройни съоръжения с цилиндрична форма има две основни компоненти, които се разглеждат независимо една от друга. Това са натоварването от вятър по посока на въздействието и трептенията в напречно направление от вихрово възбуждане.

Въздействието върху съоръжението по направление на вятъра се дефинира в почти всички съвременни норми и стандарти за проектиране на базата на известния модел на *Davenport* [7], съгласно който ветровото натоварване се представя от средна (статична) и пулсационна компонента. Предвид тази обща основа получените резултати за натоварването и съответно преместванията на конструкцията по направление на вятъра, очаквано са близки.

Резонансните трептения на конструкциите в напречно направление, вследствие на вихрово възбуждане, са резултат от взаимодействието на няколко ефекта, които са представени накратко тук. Основните механизми, водещи до появата на напречни трептения, са свързани с турбулентността на въздушния поток, вихровото възбуждане и взаимодействието между движението на конструкцията и въздушния поток. Възбуждането на трептения в напречна посока като следствие на турбулентността на вятъра е значително само при конструкции с голяма дължина след точката на отделяне на въздушния поток

(afterbody), например мостове, плоски покриви и самолетни крила и няма практическо значение в конкретния случай. Съществени са вихровото възбуждане и взаимодействието между конструкцията и въздушния поток.

При последователното образуване на вихри от две срещуположни страни на съоръжението се формира хармонично изменящо се променливо хоризонтално натоварване в направление, перпендикулярно на посоката на вятъра. Това натоварване води до появата на принудени трептения на конструкцията в напречно направление. Натоварването има собствена честота, която съвпада с честотата на формиране на вихрите. Когато честотата на формиране на вихрите съвпадне със собствената честота на свободни трептения на конструкцията, амплитудата на трептенията на съоръжението става значителна. Това се случва при т. нар. критична скорост на вятъра.

При съоръжения с малка еквивалентна маса и нисък конструктивен коефициент на затихване, движението на конструкцията се синхронизира с доминантната честота на формиране на вихрите и трептенията продължават в значителен период от време, независимо от флукуациите на скоростта на вятъра. Явлението се нарича „блокиране“ на трептенията (“lock-in”). Основна характеристика на “lock-in” ефекта е появата на трептения с големи амплитуди при значително по-широк диапазон от скорости на вятъра, а не само при критичната скорост.

От друга страна, при своето движение, съоръжението си взаимодейства с въздушния поток, който предизвиква напречното натоварване върху конструкцията. Това взаимодействие се нарича аероеластично и при конструкции с по-малка коравина води до появата на допълнително натоварване в напречна посока, което се суперпонира с компонента на ветровото натоварване, дължащ се на формирането на вихрите. Експериментално е показано, че увеличаването на големината на амплитудата на трептенията води до увеличаване на корелационната дължина на съоръжението.

В смисъла на описаното по-горе ветрово натоварване F_w , предизвикващо трептения на конструкцията в направление на натоварването, се състои от инерционно натоварване, пропорционално на ускорението на съоръжението и отрицателно аеродинамично затихване, пропорционално на скоростта на движение на съоръжението:

$$F_w = -m_a \ddot{\xi}_{def} - \zeta_a \dot{\xi}_{def}, \quad (1)$$

където $\ddot{\xi}_{def}$ е ускорението, $\dot{\xi}_{def}$ е скоростта на движение на конструкцията, m_a е допълнителната маса на въздуха и ζ_a е аеродинамичното затихване.

За повечето строителни конструкции допълнителната маса на въздуха m_a е малка, отнесена към собствената маса на съоръжението, и първият член може да се пренебрегне. Основно влияние има отрицателното аеродинамично затихване ζ_a , което има най-висока абсолютна стойност при скорости на вятъра, близки до критичната. При малки амплитуди (до 5 – 10% от широчината на съоръжението) зависимостта между натоварването и скоростта на движение може да се приеме с достатъчна точност за линейна, докато при по-големи амплитуди на трептенията тежестта на нелинейните компоненти на отрицателното аеродинамично затихване значително нараства.

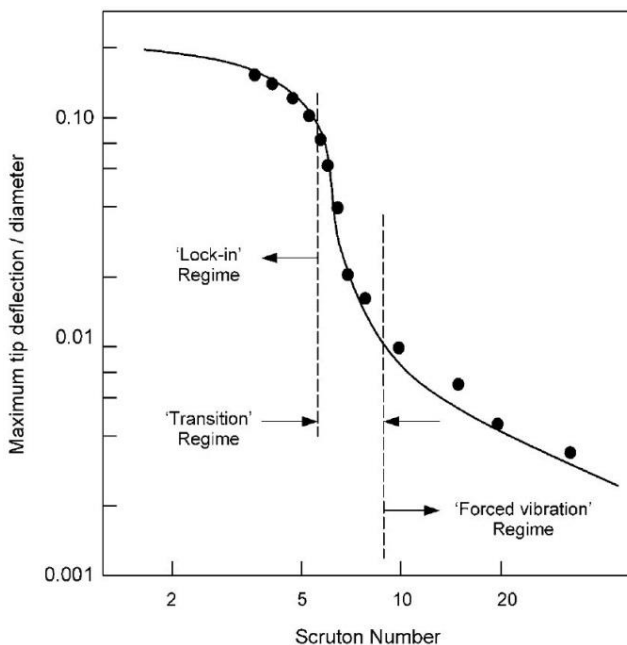
Основен параметър, характеризиращ склонността на дадена конструкция към появата на резонансни трептения от вихрово възбуждане и големината на амплитудата на тези трептения, е числото на *Scruton*:

$$Sc = \frac{4\pi\zeta_s m_0}{\rho_a d^2}. \quad (2)$$

Както е видно, то е функция на коефициента на затихване на конструкцията ζ_s , еквивалентната маса m_0 , плътността на въздуха ρ_a и диаметъра на съоръжението d .

От изброените параметри за разглежданото съоръжение е неизвестна стойността на коефициента на затихване ζ_s . В проведените теоретични изчисления е направен анализ на литературни данни за коефициента на затихване на подобни конструкции. Така полученият резултат е използван като основен в изчисленията, но като допълнителна референция са взети предвид и конкретните стойности, посочени в използваните стандарти за проектиране.

Съгласно [8], при ниски стойности на числото на *Scruton* е характерна появата на трептения със значителна амплитуда в широк диапазон от скорости на вятъра, близки до критичната. Това се дължи както на отрицателното аеродинамично затихване, така и на “lock-in” ефекта – вж. фиг. 3.

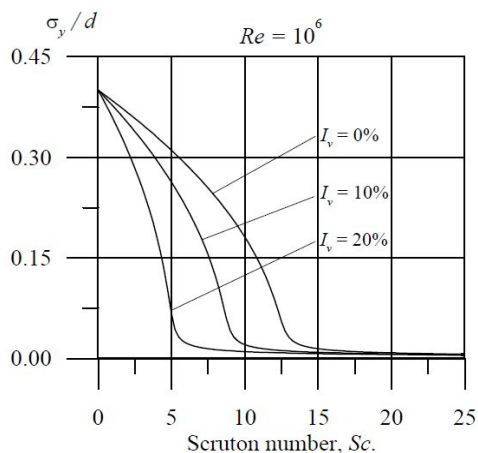


Фиг. 3. Режимы на трептения в напречна посока за кръгли кули и комини съгл. [8]

Интензивността на турбулентността на вятъра $I_v(z)$ е другият параметър, който оказва значително влияние върху поведението на дадена конструкция в напречно направление при ветрово въздействие. Това влияние е подробно описано в литературата [8 ÷ 11] и свързва наличието на ламинарен въздушен поток с ниска турбулентност с появата на по-големи амплитуди на трептенията при равни други условия – вж. фиг. 4.

За теоретично изследване на трептенията на конструкциите в напречно направление са разработени няколко модела, от които понастоящем основно се използват два – този на *Ruschevayh* [12], както и моделът, предложен от *Vickery* и *Clark* [13] и разработен в последствие от *Vickery* и *Basu* [8, 15, 16]. Подробна информация за тези изчислителни модели може да се намери в цитираната литература.

За целите на настоящото изследване са използвани теоретични модели, които са дефинирани в действащи норми за проектиране [1, 17 ÷ 20].



Фиг. 4. Влияние на $I_v(z)$ върху амплитудата на трептенията съгл. [11]

В БДС EN 1991-1-4 са дадени два подхода за оценка на амплитудите на трептенията от вихрово възбуждане. Националният анекс към [17] изисква да се използва т.нар. подход 1, който на практика е прехвърлен без изменения от [21] в Еврокод и се основава на модела на *Ruschevayh* [12]. В различни изследвания [9, 10] е показано, че този теоретичен модел дава занижени резултати за амплитудите на трептенията, особено при ниски стойности на $I_v(z)$.

Изчислителните модели в [18 ÷ 20], са разработени въз основа на модела на *Vickery* и *Basu*. От тях единствено в [19] е отчетено влиянието на интензивността на турбулентността на вятъра. Изследване, проведено в последните години [10], заключава, че амплитудите на трептенията, получени съгласно [18], са по-високи от реалните, докато [19] дава най-точни резултати.

Получените в настоящото изследване резултати потвърждават тези заключения.

4. Основни резултати

4.1. По направление на вятъра – 120-метров комин

Изследването на конструкцията за ветрово въздействие по направление на вятъра е направено съгласно изискванията на [1, 17 ÷ 19]. Изчисленията са направени само за 120-метровия комин, като съвсем очаквано не дават резултати, които да са индикация за проблеми в експлоатацията на съоръжението.

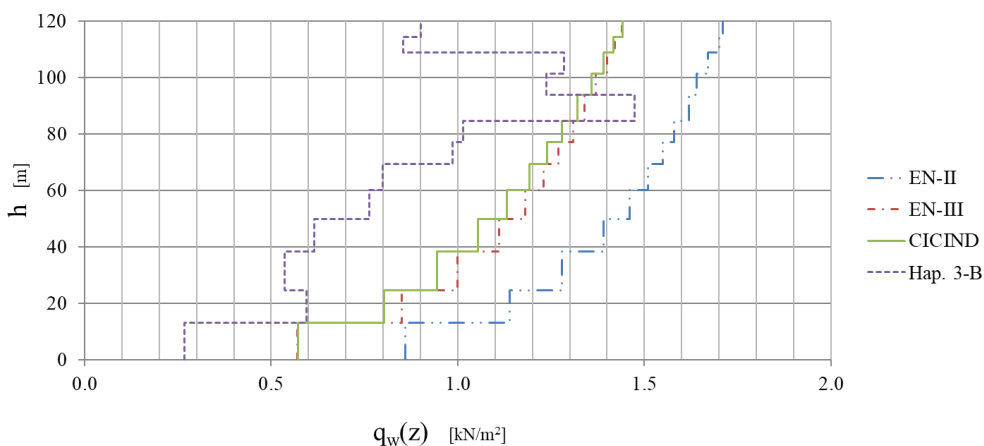
Всички изброени нормативни документи изискват отчитането на пулсационната компонента на натоварването. Изчислителните процедури се различават, но резултатите са сходни. Основната разлика се получава от определянето на категорията на околния терен. Както е добре известно още от изследванията на *Jensen* [22], грапавостта на терена има основно влияние върху интензивността на турбулентността на вятъра, а оттам и върху големината и характера на ветровото натоварване.

При определянето на натоварването съгласно [1] е избрана местност тип В, която по-добре съответства на околния терен от двете възможности, дефинирани в българските норми. Трябва да се отбележи, че в това отношение [1] значително отстъпва на съвременните стандарти за определяне на натоварвания от вятър.

В [17] категориите терен са пет на брой. В изчисленията са получени резултати за категории II и III. Това е направено предвид факта, че теренът около комина има различен характер в различните направления. Като цяло той попада в категория III, но наличието на големи депа (хвостохранилища) на североизток и северозапад налагат отчитането и на терен II категория.

В [18, 19] са дефинирани три категории терен – I, II и III. Те са близки до дефинираните в Еврокод [17]. По-малкият брой категории е продиктуван от обединяването на категории 0 и I от [17] в една обща, както и отпадането на категория IV, доколкото не се очаква да се проектират и строят високи индустриални стоманени комини в урбанизирани райони. При изчисленията за комина е приет терен категория II. Това е продиктувано основно от изричното изискване на [19] при възможност за избор между две категории винаги да се избира по-ниската.

Определеното съгласно различните нормативни документи натоварване по направление на вятъра е показано схематично на фиг. 5.



Фиг. 5. Натоварване на 120-метровия комин по направление на вятъра според [17, 19, 1] в зависимост от категорията на терена (вж. табл. 1)

Преместванията на горния край на комина, определени за натоварването, представено на фиг. 5, са дадени в табл. 1. Разгледан е само случаят на натоварване в направление, успоредно на главните оси на конструкцията (условно 0°). Преместванията ще бъдат малко по-големи при натоварване под ъгъл 45°, но предвид факта, че натоварването по направление на вятъра не е меродавно за поведението на комина, този вариант не е разглеждан.

Таблица 1. Преместване на върха на 120-метровия комин по направление на вятъра

Стандарт	Категория терен	$\Delta_{top,w}$, см	$\Delta_{top,w} / D$	$\Delta_{top,w} / H$
Наредба 3/2004 г. [1]	В	17,0	0,049	1/706
EN 1991-1-4 + NA [17]	II	27,1	0,077	1/443
	III	22,5	0,064	1/533
CICIND Model Code [19]	II	22,3	0,064	1/538

Получените резултати показват, че преместванията на съоръжението по направление на вятъра са малки – от порядъка на $(0,05 - 0,077)D$ или $(1/433 - 1/706)H$ за различните варианти на определяне на натоварването. Очаквано може да се заключи, че натоварването по направление на вятъра не е меродавно за поведението на комина.

4.2. В напречно направление – 120-метров комин

Наблюдаваното поведение на 120-метровия комин при ветрово въздействие се дължи на резонансни трептения в напречно на посоката на вятъра направление. За оценка на поведението на съоръжението са направени изчисления, основани на теоретичните модели, описани накратко в точка 3.2.

Определени са критичната скорост на вятъра, числото на Scruton и максималната амплитуда на трептенията в напречна посока съгласно [1, 17 ÷ 20].

Получените резултати са систематизирани в табл. 2 и са последователно анализирани в настоящата точка.

Таблица 2. Основни резултати в направление, напречно на посоката на вятъра – 120-метров комин

Стандарт	Категория терен	$I_v(z)$	v_{cr} m/s	δ_s	ζ_s	Sc	y_{max} cm
Наредба 3/2004 г.	-	-	20,65	0,05	0,007958	-	38,3
EN 1991-1-4 + NA	-	-	19,83	0,03	0,004775	3,42	36,2
CICIND MC 2002	-	0,100	17,85	0,0519	0,00826	6,38	110,2
CICIND MC 2010	I	0,104	17,85	0,0519	0,00826	6,38	117,7
	II	0,128					93,7
	III	0,162					25,4
AS/NZS 1170.2:2002	-	-	-	0,0314	0,005	3,74	46,8

4.2.1. Критична скорост на вятъра (v_{cr})

Критичната скорост на вятъра, при която амплитудата на трептенията достига максималната си стойност, зависи от три параметъра – диаметъра на комина, първата собствена честота на свободни трептения на съоръжението и числото на *Strouhal*. Най-висока стойност е получена съгл. [1]. Разликата между резултатите от [17] и [18, 19] се дължи на различната стойност на числото на *Strouhal* – съответно 0,18 в [17] и 0,20 в [18, 19].

Основната стойност на базовата скорост на вятъра за съоръжението е 28,0 m/s, което съответства на средната скорост на вятъра в горната третина на комина, която е определяща за поведението му при вихрово възбуждане, от порядъка на 35 – 40 m/s съгласно различните стандарти и категории терен. Независимо от известните разлики в получените стойности за критичната скорост на вятъра, основният извод от получените резултати е, че тя е значително по-ниска от проектната скорост, т.е. има условия за честа поява на резонансни трептения на съоръжението.

4.2.2. Число на *Scruton* (Sc)

Както беше изяснено в точка 3.2, числото на *Scruton* е функция на коефициента на затихване на конструкцията ζ_s , еквивалентната маса m_0 , плътността на въздуха ρ_a и диаметъра на съоръжението d , и се явява основният индикатор за големината на очакваните амплитуди на трептенията на комина. Еквивалентната маса и диаметърът на комина са едни и същи при определянето на числото Sc съгласно всички стандарти. Разликите в получените стойности се установят най-вече в резултат на приетата в различните норми стойност на конструктивния коефициент на затихване ζ_s , съответно логаритмичен декремент δ_s , както и в малки разлики в обемното тегло на въздуха ρ_a – в някои норми се отчита надморската височина и т.н.

Трябва да се подчертае, че стойността на ζ_s не може да бъде получена теоретично, а само чрез натурно изпитване на конструкцията. В нормите за проектиране са дадени стойности, които са получени чрез статистическа обработка на бази от данни за затихването на реални конструкции.

Независимо от това, че получените стойности на числото на *Scruton* се изменят в определен диапазон в зависимост от нормите, спрямо които са получени (3,42 – 6,38), те са твърде ниски и дават индикация за очакваното поведение на комина. Малки амплитуди на трептенията, съответно малки инерционни сили и диапазони на напреженията се получават при $Sc > 15$ [10, 19]. При стойности $Sc < 8$ се очаква появата на трептения със значителна амплитуда, а при $Sc < 5$ освен амплитуди с големи стойности е характерна и появата на “lock-in” ефекта, при който трептенията се възбуждат в широк диапазон от скорости на вятъра, близки до критичната и продължават в значителни периоди от време, независимо от стохастичната промяна на скоростта на вятъра.

Като обобщение на изложеното до тук, получените стойности на числото на *Scruton* показват, че коминът очаквано изпада във ветрови резонанс, което предполага задължителна проверка на умора на носещата стоманена конструкция.

4.2.3. Максимална амплитуда на трептенията (y_{max})

Получените стойности за амплитудите на трептенията в напречна посока съгласно различните стандарти очаквано са със значителни разлики. Сравнение между използваните методики и коментар за очакваните разлики и достоверност на резултатите са правени в различни публикации [9, 10]. Най-точни резултати се получават съгласно теоретичния модел, изложен в [19], тъй като той е единственият, който отчита влиянието на интензивността на турбулентността на вятъра върху поведението на комина. Това е потвърдено и от реалното поведение на съоръжението. Измерените амплитуди на трептенията при скорости на вятъра, близки, но по-ниски от критичната, потвърждават очакваната амплитуда съгласно [19] – 93,7 cm при достигане на v_{cr} .

Допустимата стойност на амплитудата на резонансно трептение на комина съгласно изискванията на [19 и 23] е 10% от диаметъра на комина, което в случая съответства на 35,0 cm.

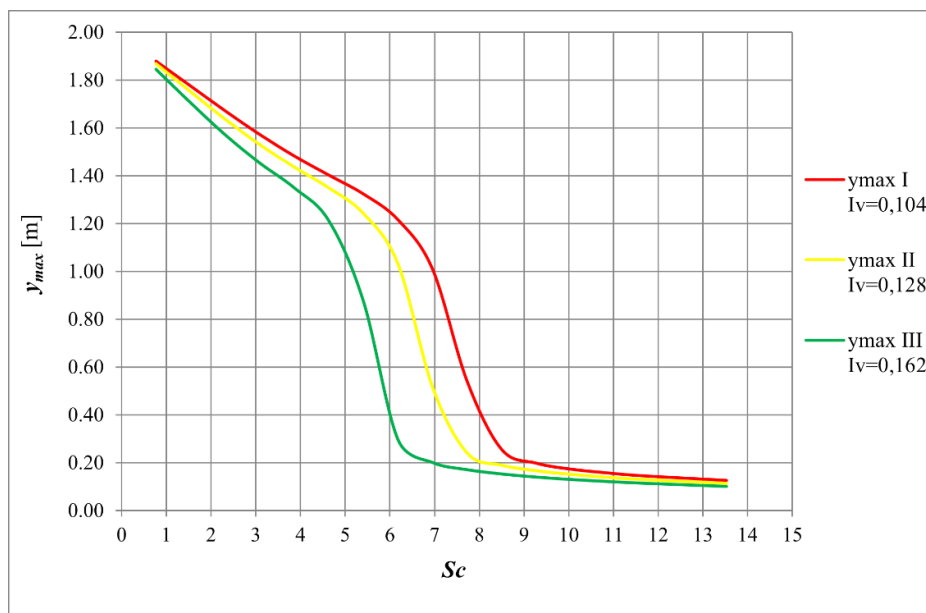
В този смисъл, съгласно всички използвани стандарти за проектиране се получават недопустимо големи амплитуди на трептенията. Допълнително, реално измерените са в порядъка на 53 – 68 cm, при това при скорости на вятъра, по-ниски от критичната.

Трябва да се отбележи, че при измерените амплитуди на трептенията, особено при теоретично очакваните за критична скорост на вятъра, се получават инерционни сили в напречно направление, които са дори по-големи от натоварването по посока на вятъра. В този смисъл, при наблюдаваните амплитуди на трептенията конструкцията вероятно е

подложена на циклично натоварване с диапазони на напреженията, значително надвишаващи границата на умора.

4.2.4. Влияние на $I_v(z)$

На фиг. 6 е показана зависимостта на големината на амплитудата на свободни трептения на върха на комина от числото на *Scruton* при различни стойности на интензитета на турбулентността $I_v(z)$, получена съгласно [19].



Фиг. 6. Зависимост на y_{\max} от Sc и $I_v(z)$ – 120-метров комин

Показаните на фиг. 6 зависимости демонстрират големите стойности на амплитудите при ниска стойност на Sc , независимо от вида на терена. В същото време, при равни други условия, по-ниската турбулентност на вятъра води до по-големи амплитуди при една и съща стойност на Sc .

4.3. В напречно направление – 140-метров комин

Очакваното поведение на комина при ветрово въздействие и евентуалната поява на резонансни трептения в напречно на посоката на вятъра направление са оценени чрез изчисления, основани на теоретичните модели, описани накратко в точка 3.2. Използвана е само методиката, заложена в [19], тъй като при изследването на 120-метровия комин е ясно показано, че тя дава резултати, които имат най-добра корелация с реалното поведение на изследваните съоръжения.

Теоретично са определени критичната скорост на вятъра, числото на *Scruton* и максималната амплитуда на трептенията в напречна посока. Резултатите са определени на базата на динамичните характеристики на конструкцията, получени от изчислителните модели. Получените резултати са систематизирани в табл. 3 и са последователно анализирани в настоящата точка.

Таблица 3. Основни резултати в направление, напречно на посоката на вятъра – 140-метров комин

Стандарт	Категория терен	$I_v(z)$	v_{cr} , m/s	δ_s	ζ_s	Sc	y_{max} , cm
СICIND MC 2010	I	0,102	12,05	0,0519	0,00826	10,14	11,2
	II	0,125					9,9
	III	0,157					8,5

4.3.1. Критична скорост на вятъра (v_{cr})

Критичната скорост на вятъра, при която амплитудата на трептенията достига максималната си стойност, зависи от три параметъра – диаметъра на комина, първата собствена честота на свободни трептения на съоръжението и числото на *Strouhal*. Получената стойност за критичната скорост на вятъра е 12,05 m/s и отразява ниската първа собствена честота на свободни трептения на конструкцията ($f_1 = 0,75$ Hz).

Основната стойност на базовата скорост на вятъра за съоръжението е 28,0 m/s, което съответства на средната скорост на вятъра в горната третина на комина, която е определяща за поведението му при вихрово възбуждане, от порядъка на 40 – 45 m/s съгласно различните стандарти и категории терен. Основният извод от получените резултати е, че критичната скорост на вятъра е значително по-ниска от проектната скорост, т.е. има условия за честа поява на резонансни трептения на съоръжението.

4.3.2. Число на Scruton (Sc)

Получената стойност на числото на Scruton е сравнително висока и дава индикация за малки амплитуди на резонансните трептения на комина при критична скорост на вятъра.

4.3.3. Максимална амплитуда на трептенията (y_{max})

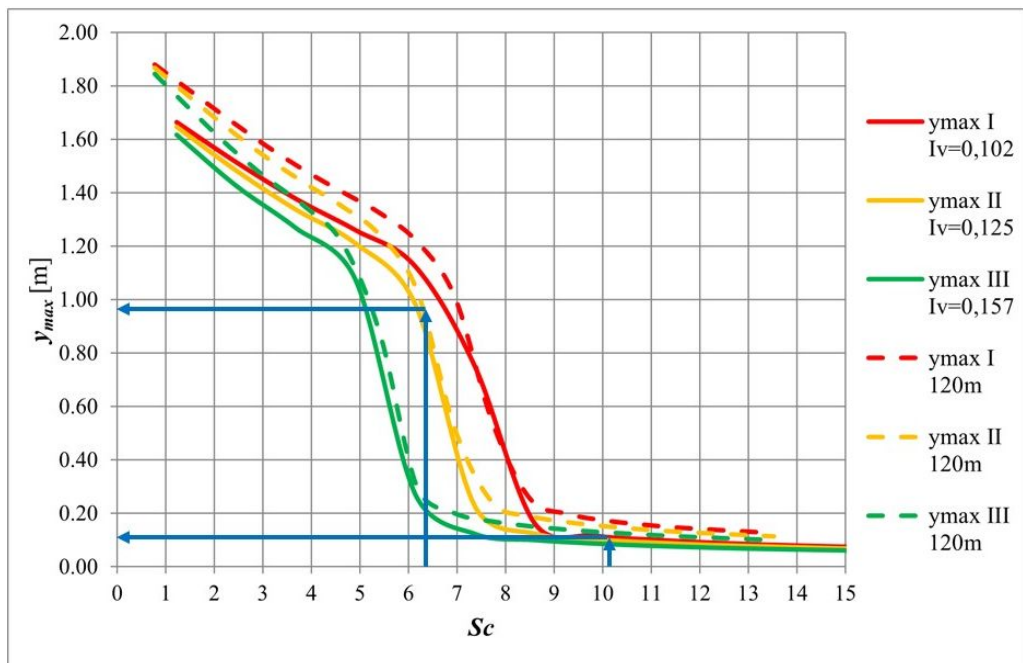
Получените стойности за амплитудите на трептенията в напречна посока са ниски и за трите възможни категории терен, като варират в границите 8,5 ÷ 11,2 cm. Това е потвърдено и от реалното поведение на съоръжението – не са наблюдавани трептения със значителна амплитуда, въпреки че критичната скорост на вятъра е много ниска.

Допустимата стойност на амплитудата на резонансно трептение на комина съгласно изискванията на [19 и 23] е 10% от диаметъра на комина, което в случая съответства на 32,0 cm. В този смисъл, дори най-големите теоретично получени амплитуди – за терен категория I – са близо 3 пъти по-малки от допустимите.

Трябва да се отбележи, че при получената ниска критична скорост на вятъра е необходимо да се направят проверки за умората за елементите на конструкцията поради появата на инерционни сили в напречно направление. В същото време, поради много малките амплитуди на трептенията, инженерният опит сочи, че тези проверки е много вероятно да бъдат удовлетворителни.

4.3.4. Влияние на $I_v(z)$

На фиг. 7 е показана зависимостта на големината на амплитудата на резонансните трептения на върха на комина от числото на Scruton при различни стойности на интензитета на турбулентността, получена съгласно [19].



Фиг. 7. Зависимост на y_{\max} от Sc и $I_v(z)$ – 140-метров комин и 120-метров комин

Показаните на фиг. 7 зависимости демонстрират ниските стойности на амплитудите при висока стойност на Sc , независимо от вида на терена. Видно е, че за конкретния комин се очакват малки амплитуди, предвид получената стойност $Sc = 10,14$. На графиката за сравнение с пунктирани линии са показани и зависимостите, получени за 120-метровия комин, за който бе получено число на Scruton $Sc = 6,38$. Съпоставката ясно и категорично обяснява различното наблюдавано поведение на двата комина.

5. Заключение

Получените теоретично резултати за поведението на 120-метровия комин със стоманена носеща конструкция потвърждават напълно наблюдаваното реално поведение на съоръжението. При критична скорост на вятъра, която е значително по-ниска от проектната, се получават резонансни трептения на комина от вихрово възбуждане в направление, напречно на посоката на вятъра. Амплитудите на резонансните трептения на комина са значително по-големи от допустимите съгласно нормативните изисквания. Това се дължи на факта, че числото на Scruton за комина е с много ниска стойност, което е индикация, че отрицателното аеродинамично затихване е по-голямо от конструктивното затихване на съоръжението. Това води и до появата на т.нар. “lock-in” ефект, при който се наблюдават трептения с големи амплитуди не само при критичната, а в значително по-широк диапазон от скорости на вятъра. Влияние върху големината на трептенията има и фактът, че преобладаващата посока на вятъра с компоненти от север, североизток и северозапад, съвпада с части от терена, при които няма съществени препятствия поради наличието на големи депа за отпадъци. Това води до ниски стойности на интензитета на турбулентността на вятъра, а ламинарният поток е свързан с по-големи амплитуди на

трептенията. При получените стойности на амплитудите на свободни трептения на комина се получават големи инерционни сили, които са от порядъка и по-големи от въздействието по посока на вятъра.

Възможните варианти за намаляване на трептенията на комина са три:

- Чрез използване на настроен масов, вискозен или друг тип демпфер (виброгасител). При този вариант се проектира настроен виброгасител, чиято основна функция е да повиши значително коефициента на затихване на конструкцията (обикновено се търси получаване на стойност на $\zeta_s > 0,02$). При това, числото на *Scruton* нараства пропорционално на затихването. При стойности на $Sc > 15$ се очаква трептенията да бъдат с много малки стойности (от порядъка на $0,05D$), при което пропорционално намаляват и инерционните сили, респективно диапазоните на напреженията при проверка на умора.
- Чрез използване на аеродинамични мерки за възпрепятстване на образуването на вихри, които активират резонансното реагиране на конструкцията. Подробно описание на различни системи от този вид е дадено в [14]. При използването на подобни мерки се увеличава значително натоварването в посоката на вятъра. В този смисъл е удачно да се направи анализ дали е възможно да се намали височината на комина (в случая – чрез скъсяване на GRP-тръбата), предвид необходимата височина с оглед на удовлетворяването на нормативните изисквания за концентрацията на вредните вещества в приземния слой на атмосферата. Чрез намаляване на височината на комина се цели намаляване на въздействието в най-горната и най-тежко натоварена част на съоръжението, което да компенсира появата на т.нар. „спойлери“. Трябва да се има предвид, че при получените стойности за числото на *Scruton* е възможно използването на аеродинамични мерки да няма достатъчно голям ефект.
- Чрез промяна на диаметъра на комина в горната третина от височината му. По този начин се увеличава значително числото на *Scruton* и се постига същият ефект, както при първия вариант. Трябва да се направи проверка дали това е възможно от гледна точка на естествената тяга при извеждането на газовете и минималното използване на принудена тяга (вентилатори), съответно да се оцени влиянието на подобна мярка върху експлоатационните разходи за комина.

Получените теоретично резултати за поведението на 140-метровия комин също потвърждават наблюдаваното реално поведение на съоръжението. При критична скорост на вятъра, която е значително по-ниска от проектната, се получават резонансни трептения на комина от вихрово възбуждане в направление, напречно на посоката на вятъра. В същото време, в този случай амплитудите на резонансните трептения на комина са незначителни и отговарят на нормативните изисквания. Това се дължи както на факта, че числото на *Scruton* за комина е със сравнително висока стойност, което е индикация, че конструктивното затихване на съоръжението е достатъчно голямо, така и на ниската критична скорост на вятъра, при която и енергията на флуидния поток не е голяма. При получените стойности на амплитудите на резонансни трептения на комина се получават малки инерционни сили и проверката на умора най-вероятно няма да бъде меродавна за носещата стоманена конструкция.

ЛІТЕРАТУРА

1. Naredba № 3 za osnovnite polozhenia za proektirane na konstruktsiite na stroezhite i za vazdeystviyata varhu tyah, 2004.
2. Normi za proektirane na stomaneni konstruktsii, BSA, 1987.
3. Naredba № RD-02-20-2/27.01.2012 za proektirane na sgradi i saorazhenia v zemetrasni rayoni.
4. Normi za proektirane na betonni i stomanobetonni konstruktsii (obn., DV, br. 17 ot 1987; izm. № 2, DV, br. 17 ot 1993, izm. № 3, DV, br. 3 ot 1996 i izm. № 4, DV, br. 49 ot 1999).
5. Naredba № 1 za proektirane na plosko fundirane (obn., DV, br. 85 ot 1996) i Normi za proektirane na plosko fundirane.
6. Normi za proektirane na pilotno fundirane (publ., BSA, br. 6 ot 1993).
7. *Davenport, A. G.* The response of slender line-like structures to a gusty wind. Proc. Soc. Civ. Engineers, vol. 23, pp. 389–408, (1962).
8. *Vickery, B. J., Basu, R. I.* Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part I. Development of a mathematical model for two-dimensional conditions. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, pp. 49–73, (1983).
9. *Niemann, H.-J., Lupi, F and Hoeffler, R.* “Vibrations of Chimneys under the Action of the Wind”, Proceedings of the 9th International Conference of Structural Dynamics, EUROLYN, (2014).
10. *Verboom, G. K., van Koten, H.* Vortex Excitation: Three Design Rules Tested on 13 Industrial Chimneys. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 98: 145–154, (2010).
11. *Hansen, S. O.* Vortex-Induced Vibrations of Structures. Proceedings of the Structural Engineers World Congress, November 2-7, 2007, Bangalore, India, (2007).
12. *Ruscheweyh, H.* Ein verfeinertes, praxisnahes Berechnungsverfahren wirbelerregter Schwingungen von schlanken Baukonstruktionen im Wind. Aeroelastische Interferenzwirkung zwischen benachbarten schlanken Baukonstruktionen. Beiträge zur Anwendung der Aeroelastik im Bauwesen. Heft 20. Innsbruck/Lausanne, (1986).
13. *Vickery, B. J., Clark, A. W.* Lift of across-wind response of tapered stacks. Proc. Am. Soc. Civ. Eng. J. Struct. Div. St 1, 1–19, (1972).
14. *Zdravkovich, M.* Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7, pp. 145-189, (1981).
15. *Vickery, B. J., Basu, R. I.* Across-wind vibrations of structures of circular cross-section. Part II. Development of a mathematical model for full-scale application. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 12, pp. 75–97, (1983).
16. *Vickery, B. J., Basu, R. I.* Simplified approach to the evaluation of the acrosswind response of chimneys. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14, pp. 153–166, (1983).

17. BDS EN 1991-1-4:2008 – Actions on structures, General actions, Wind action.
18. CICIND Model Code for Steel Chimneys, 2002.
19. CICIND Model Code for Steel Chimneys, 2010.
20. AS/NZS 1170.2:2002 – Structural design actions. Part 2: Wind actions.
21. DIN 4133, 1991. Schornsteine aus Stahl. Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstrasse 6, 1000 Berlin, 30.
22. Jensen, M. The model law for phenomena in the natural wind. *Ingenioren* 2: 121–128, (1958).
23. EN 1993-3-2:2006 – Design of steel structures – Part 3-2: Towers, masts and chimneys – Chimneys.

BEHAVIOUR OF TALL CHIMNEYS WITH STEEL SUPPORTING STRUCTURE UNDER WIND LOADING. PART 1: THE PROBLEM

St. Raykov¹, N. Rangelov², D. Dinev³

Keywords: chimney, wind action, vortex shedding, Scruton number, turbulence intensity

ABSTRACT

The behaviour of two industrial chimneys under wind loading is analyzed. Both chimneys are located at the same site and have very similar structural systems, diameter (3,5 m and 3,2 m), and height (120 m and 140 m, respectively). Nevertheless, the 120 m chimney exhibits large deformations under wind load while for the taller chimney such behaviour is not observed. The theoretical analysis confirms that across wind vibrations due to vortex excitation is the reason for that.

The tendency for a structure to exhibit resonance vibrations due to vortex shedding and the scale of the amplitude of such vibrations is best described by the Scruton number. Relevant mechanical models and several different theoretical methods are used to describe and analyze the behaviour of both chimneys. The results confirm that the 120 m chimney is expected to exhibit large deformations under lock-in effects. The same applies to the taller chimney, but its amplitudes are very small and comply with the normative requirements. This is based on the fact that the Scruton number for the taller chimney is relatively high.

¹ Stanislav Raykov, Chief Assist. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: raykov_fce@uacg.bg

² Nikolay Rangelov, Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: rangelov_fce@uacg.bg

³ Dobromir Dinev, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Structural Mechanics”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: ddinev_fce@uacg.bg