



Получена: 08.05.2021 г.

Приета: 21.05.2021 г.

ПОВЕДЕНИЕ ПРИ ВЕТРОВО ВЪЗДЕЙСТВИЕ ВЪРХУ ВИСОКИ КОМИНИ СЪС СТОМАНЕНА НОСЕЩА КОНСТРУКЦИЯ. ЧАСТ 2: РЕШЕНИЕТО

Ст. Райков¹, Н. Рангелов², Д. Динев³

Ключови думи: високи комини, виброгасител, TLD, безопасен експлоатационен срок

РЕЗЮМЕ

Докладът е продължение на Част 1, в която теоретично се потвърждават наблюдаваните много големи трептения напречно на посоката на вятъра на 120-метров комин със стоманена носеща конструкция, причинени от резонансни явления вследствие на вихрово възбуждане. Съоръжението се оказва в състояние, опасно за експлоатация.

В доклада (Част 2) е направен преглед и анализ на три групи възможни решения на проблема. Окончателно се препоръчва използване на подходящ виброгасител. По предложение на авторите избраното от възложителя решение е настроен флуиден демпфер TLD (tuned liquid damper), разработен от специализиран консултант. Неговата ефективност се доказва не само теоретично, но и от последващата експлоатация на комина, при която не се наблюдават трептения с голяма амплитуда.

На основата на теоретично установеното поведение на комина с монтирания демпфер, по методиката на БДС EN 1993-1-9 [1] е извършена оценка на безопасния експлоатационен срок на съоръжението. За определянето на някои от необходимите параметри са използвани и методики и препоръки на CICIND Model Code [4, 5].

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.

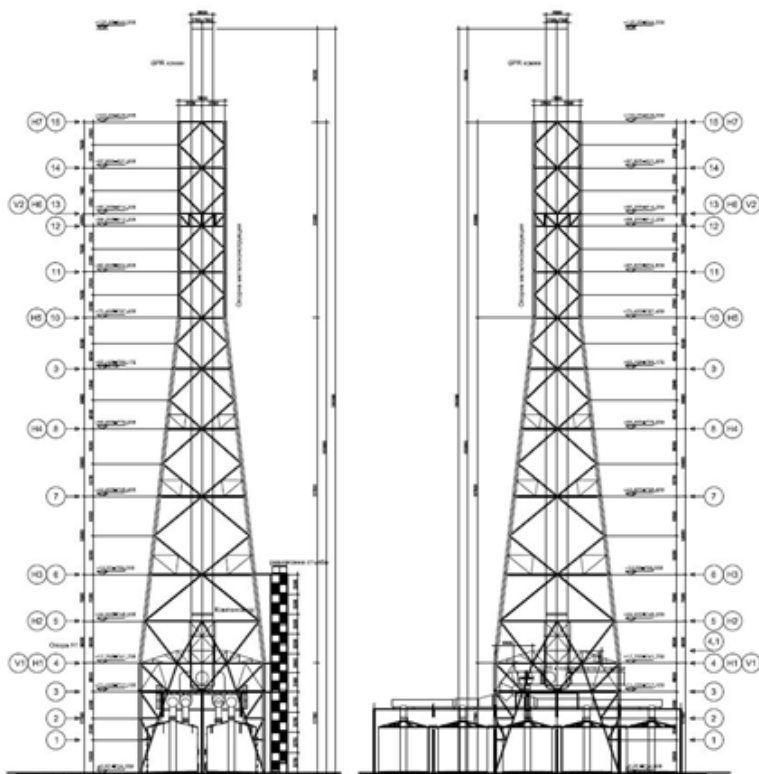
² Николай Рангелов, проф. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: rangelov_fce@uacg.bg.

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

Настоящият доклад е продължение на Част 1, в която теоретично се потвърждават наблюдаваните много големи трептения напречно на посоката на вятъра на 120-метров комин със стоманена носеща конструкция, причинени от резонансни явления вследствие на вихрово възбуждане.

Съоръжението представлява комин с константен диаметър на тръбата 3,50 m от GFRP (стъклопласт), окачен на стоманена опорна конструкция и укрепен от нея (фиг. 1). Стоманената конструкция е изпълнена от кръгли кухи профили (CHS), а монтажните снаждания на отделните секции са конструирани с фланцеве съединения с предварително напрегнати високоякостни болтове (съединения категория D).



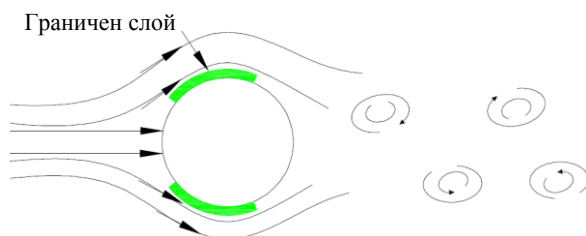
Фиг. 1. Общ вид на съоръжението

Анализът на глобалното поведение на съоръжението при ветрово въздействие, представен в предходния доклад (Част 1), потвърждава напълно наблюдаваното реално поведение на съоръжението и доказва, че наблюдаваните значителни трептения на конструкцията са свързани с появата на резонанс от вихрово възбуждане. Такива резонансни трептения на конструкции в напречно направление са резултат от взаимодействието на няколко ефекта, свързани със специфичното въздействие на вятъра и реагирането на съоръжението. Така основните механизми, водещи до поява на напречни трептения, са свързани с турбулентността на въздушния поток, вихровото възбуждане и взаимодействието между движението на конструкцията и въздушния поток.

2. Мерки и възможни решения за намаляване на трептенията

За да се изяснят възможните решения за намаляване на трептенията и механизмът на тяхното действие, ще изясним накратко същността на явлениято, пораждащо проблема.

Основен фактор за възникване на големи трептения в напречно направление е вихровото възбуждане. 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 (фиг. 2). 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. Тя от своя страна зависи от скоростта на вятъра. 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 v_{cr} .



Фиг. 2. Механизъм 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* (вж. Част 1 на доклада). Съгласно дефиницията на това число, основните фактори, характеризиращи явлениято, са коефициентът на затихване на конструкцията, еквивалентната маса и диаметърът на съоръжението.

На фона на казаното по-горе са възможни няколко типа решения, които променят или резонансното реагиране, или вихровото въздействие от вятър. Те могат да бъдат обобщени така:

(1) Чрез използване на масов, вискозен или друг подобен тип **виброгасител**. При този вариант се проектира специално настроен виброгасител, чиято основна функция е да повиши значително коефициента на затихване на конструкцията, при което числото на *Scruton* нараства пропорционално на затихването. Така се получава по-голяма стойност на числото на *Scruton*, при която трептенията ще бъдат с много малки амплитуди. Съответно, пропорционално намаляват и инерционните сили вследствие масата на съоръжението, а оттам и диапазоните на напреженията.

(2) Чрез използване на **аеродинамични мерки** за нарушаване на ламинарния въздушен поток, при което се възпрепятства образуването на вихрите (вж. фиг. 2), които активират резонансното реагиране на конструкцията. Подробно описание на различни системи от този вид е дадено в [3]. Това са различни по форма прави или спираловидни спойлери, разположени по цилиндричната тръба. Най-често това са спирални спойлери, поставени в горната третина от височината на комина, реализирани чрез шини.

Това решение е ефективно в етапа на проектиране, но в конкретния случай на вече изпълнено съоръжение то има съществен недостатък. Наличието на спойлери увеличава значително натоварването в посоката на вятъра. Следователно, прилагането на подобно решение е единствено възможно ако се намали височината на комина чрез

скъсяване на GFPR-тръбата. Това би целяло намаляване на въздействието в най-горната и най-тежко натоварена част на съоръжението, което да компенсира увеличения товар от вятър вследствие на добавените спойлери.

(3) Чрез промяна на **диаметъра на комина** в горната третина от височината му. По този начин може значително да се увеличи числото на *Scruton* и да се постигне желаният ефект. В такъв случай трябва да се направи проверка дали това е възможно от гледна точка на естествената тяга при извеждането на газовете и минимално използване на принудена тяга, и да се оцени влиянието на подобна мярка върху експлоатацията на съоръжението.

3. Решението

Вземането на окончателно решение трябва да отчита неговата себестойност, технологичната възможност за временно преустановяване на производствения процес, ако това е необходимо, технологичната възможност за намаляване на височината или на диаметъра в горната част на комина, технологичните възможности за производство, монтаж, монтаж на нови елементи или устройства по конструкцията на комина, както и не на последно място – сроковете за изпълнение, тъй като съоръжението е окачествено като опасно за експлоатация.

Анализът с отчитане на горните фактори води до категоричния извод, че единственото целесъобразно решение е прилагане на виброгасител (демпфер). Прилагане на аеродинамични мерки е на практика невъзможно без съществени изменения по самия комин, които в случая се оказват недопустими. Освен това, при получените стойности за числото на *Scruton* е възможно използването на аеродинамични мерки да няма достатъчно голям ефект.

Възможни са различни видове виброгасители от принципно два типа. При единия тип масови демпфери принципът на действие е с настроена маса (TMD, Tuned Mass Damper). При комини масата най-често е във формата на пръстен около тръбата на комина, подходящо захваната към нея. В конкретния случай от две от офериращите фирми беше предложено решение с масов махаловиден демпфер. При него механичното гасене на трептения става чрез махало (в случая вградено в контейнер) с определена настроена маса (честота на свободни трептения), свързана с пружини към основната част. Следователно, при този тип виброгасител има механични движещи се части, които изискват известно поддържане, и съществува – макар и малка – теоретична възможност устройството да спре да функционира след време.

Другото възможно решение, предложено от другите две офериращи фирми, е настроен флуиден демпфер (TLD, Tuned Liquid Damper), при който ролята на движеща се маса се изпълнява от флуид, т.е. затихването се реализира чрез инертността на плискащата се течност. Основно предимство на този тип виброгасители е, че при тях няма движещи се части, няма износване и в този смисъл такова устройство теоретично няма как да спре да функционира. Такива демпфери не изискват никаква поддръжка. По тази причина, като окончателно решение бе избран именно такъв демпфер, разположен върху най-горната площадка на опорната конструкция (фиг. 3).

Демпферът бе проектиран от специализирана френска консултантска фирма. Тъй като виброгасителят се настройва по първата собствена честота на съоръжението, особено важна е нейната точна оценка. Освен по теоретичен път (определена независимо от авторите и от консултантската фирма), тя бе доказана и чрез наблюдаването на резонансното поведение на комина по направените записи. Така първата честота на свободни

трептения на съоръжението бе окончателно установена като $f_1 = 1,02 \text{ Hz}$. Впоследствие, с отчитане на добавената маса на демпфера, тя се промени на $0,93 \text{ Hz}$.



Фиг. 3. Горна площадка и потенциално място за разполагане на виброгасители

Демпферът представлява стоманена листовка конструкция, подходящо касетирана, за да се раздели плискащата се течност (в случая антифриз) в отделни малки „резервоари“, разположени на три нива. В случая ключово е нивото на течността, затова са предвидени ревизионни отвори за проверка (фиг. 4).



Фиг. 4. Монтиран демпфер при горната площадка на опорната конструкция

Интересно е, че скоро след пускането на виброгасителя в експлоатация възникна подходяща ситуация за натурна проверка на неговата ефективност – ветровит ден и вятър с опасни пулсации до 18 m/s . Наблюденията на съоръжението доказаха, че проблемът е решен и не се забелязват никакви видими отклонения на съоръжението, т.е. демпферът е отлично настроен и напълно погасява трептенията.

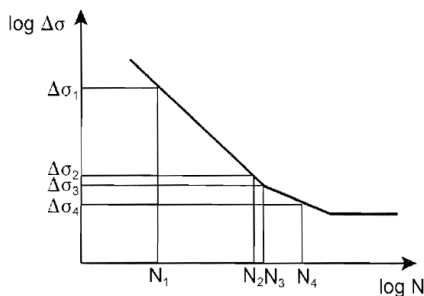
Друга интересна особеност е, че демпферът играе роля за намаляване на въздействието по посоката на вятъра. Теоретично бе доказано, че общото намаляване на ефектите от ветрови въздействия компенсира добавеното тегло на демпфера като натоварване върху стоманената конструкция.

4. Оценка на безопасния експлоатационен срок на съоръжението

4.1. Общи положения

Поради претърпените от съоръжението няколко тежки резонансни явления възниква въпросът за неговия безопасен експлоатационен срок. При анализа трябва да се отчете и по-нататъшното поведение на комина при намалена амплитуда на трептения в резултат на ефективно функциониращия виброгасител. При нормална поддръжка и мониторинг на конструкцията, единствен фактор за това остава проблемът умора вследствие индуцирани от вятъра напречни вибрации и съответно оценката на умора по метода на безопасния експлоатационен срок съгласно БДС EN 1993-1-9 [1], както и БДС EN 1993-3-1 [2] и CICIND Model Code [4, 5].

Оценката на ресурса на умора става чрез зависимости между диапазоните на изменение на напреженията при константна амплитуда $\Delta\sigma$ и броя цикли до разрушаване, представени в логаритмичен вид. Така зависимостите $\log(\Delta\sigma) - \log(N)$, известни като $S-N$ линии, се оказват по части линейни и позволяват директна оценка на безопасния експлоатационен срок (ресурс на умора), изразен чрез брой цикли (фиг. 5).



Фиг. 5. Отчитане на ресурса на умора като брой цикли при различни диапазони $\Delta\sigma$

4.2. Приложими категории на детайли

За правилната оценка на ресурса на умора е особено важна правилната категоризация на детайлите, които пораждат концентрация на напреженията и са потенциални източници на уморни пукнатини. Различни „типични“ детайли са дадени в таблици 8.* на [1], съответно [2] реферира към тях като ги систематизира. На практика не винаги детайлите в разглеждана конструкция могат да намерят директни аналози в цитираните таблици, поради което се налага известна експертна оценка на основата на принципите на подобие и аналогията.

При разглежданата конструкция конструктивните детайли са значително по-сложни от дадените в таблиците за умора. На фиг. 6 са илюстрирани някои характерни детайли от стоманената конструкция, демонстриращи значително многообразие (но и много добро качество на изпълнение на заварените съединения).

Обзорът на цитираните таблици и прилагането на принципите на аналогията води до следните приложими таблични детайли:

- (1) Възлени на решетъчни конструкции с тръбни профили, при $t_0 \geq 2t_i$:
 - К, N с междина: категория 90;
 - К със застъпване: категория 71;
 - N със застъпване: категория 71.

- (2) Фланцеви съединения със заваръчни шевове с пълен провар: категория 71.
- (3) Бази на колони (съгласно SICIND [4, 5]): категория 71.
- (4) Присъединени чрез заваряване ребра: категория 71 или 80.



Фиг. 6. Детайли на възли от стоманената конструкция

Като меродавна и представителна за цялата конструкция може да се приеме категория на детайлите 71 и стандартна $S-N$ зависимост с параметри: $\Delta\sigma_C = 71,0$ МПа, $\Delta\sigma_D = 52,33$ МПа, $\Delta\sigma_L = 28,73$ МПа.

4.3. Диапазони на напреженията

Диапазоните на изменение на нормалните напрежения $\Delta\sigma$ се определят като диапазони на номиналните напрежения. Съгласно БДС EN 1993-3-2 [2] следва да се използват максималните диапазони.

За да се получат усилията, респективно напреженията, само от трептенията напречно на посоката на вятъра, е използвана методиката на SICIND [4, 5]. При нея се определят съответни на честотата на трептенията ($f_1 = 0,93$ Hz) и на максималното преместване на върха (проектно $y_{\max} = 0,053$ m) инерционни сили. От тези сили се определят

номиналните напрежения σ_x в елементите на стоманената конструкция. Тъй като трептенията са симетрични (хармонични), то очевидно диапазоните на изменение на напреженията се получават като $\Delta\sigma = 2\sigma_x$. По този начин максималният диапазон на номиналните напрежения в меродавния елемент е получен като $\Delta\sigma = 30,1$ МПа.

4.4. Безопасен експлоатационен срок

За случая на константен диапазон на изменение броят цикли, определящ безопасния експлоатационен срок, се получава от съответната $S-N$ зависимост по формулите (1):

$$N(\gamma_{Mf} \Delta\sigma) = [\Delta\sigma_C / \Delta\sigma]^3 \times 2 \times 10^6 \quad \text{при } \Delta\sigma \geq \Delta\sigma_D,$$

$$N(\gamma_{Mf} \Delta\sigma) = [\Delta\sigma_D / \Delta\sigma]^5 \times 5 \times 10^6 \quad \text{при } \Delta\sigma_D > \Delta\sigma > \Delta\sigma_L, \quad (1)$$

$$N(\gamma_{Mf} \Delta\sigma) = \infty \quad \text{при } \Delta\sigma \leq \Delta\sigma_L.$$

Трансформирането на броя цикли в безопасен експлоатационен срок T в години може да стане по емпиричната формула, дадена в SICIND Model Code 2002 [4], която, съответно преобразувана, има вида:

$$T = \frac{N}{1,26 \times 10^7 f_1 A e^{-A^2}}. \quad (2)$$

Във формулата $f_1 = 0,93$ Hz е първата собствена честота на свободни трептения, а $A = 4v_{cr} / v_{max} = 4 \times 17,85 / 41,7 = 1,712$ е параметър, който отчита отношението на критичната скорост на вятъра и максималната такава.

По този начин, при условно разгледани различни нива на сигурност, са получени резултатите, дадени в табл. 1.

Таблица 1. Брой цикли и безопасен експлоатационен срок

Ниво на сигурност	Брой цикли	Безопасен експлоатационен срок	Остатъчен експлоатационен срок*
– Експлоатационно (условно, с приет $\gamma_{Mf} = 1,0$)	$8,0 \times 10^7$	74,8 години	64 години
– Малки последици от разрушаване ($\gamma_{Mf} = 1,15$)	$4,0 \times 10^7$	37,4 години	32 години
– Големи последици от разрушаване ($\gamma_{Mf} = 1,35$)	$1,8 \times 10^7$	16,8 години	14 години

* Вж. по-долу.

Допълнително се налага известен коментар относно изчерпвания ресурс на умора до монтирането на демпфера. Изглежда, че такава оценка е трудно осъществима, тъй като, макар и в кратък период от време, съоръжението е работило при други условия и съответното изследване би следвало да се извърши при различни предпоставки.

В резултат на наблюденията на поведението на съоръжението може да се заключи, че сумарното време на наблюдавани значителни резонансни трептения е било не повече от $1\frac{1}{2}$ до 2 часа. Трептенията са били с честота, равна на първата собствена честота

преди инсталиране на демпфера, т.е. 1,02 Hz. Следователно може да се приеме, че са се реализирали общо $N_0 \approx 7000$ цикъла с голяма (резонансна) амплитуда. Наистина, това е относително малък брой цикли, като се има предвид, че в $S-N$ линиите „мярката“ е милиони цикли, но реализираните трептения са предизвикали доста големи диапазони на изменение на напреженията $\Delta\sigma_0$. На основата на тези обстоятелства е направена експертна оценка, че изчерпаният уморен ресурс е 15%. Тогава, като се приложи правилото на Palmgren–Miner за линейно сумиране на повредите [6], полученият експлоатационен срок може да се приведе към остатъчен при предпоставката, че от общия индекс на повредата $D = 1,0$ е изваден изчерпаният ресурс (0,15), т.е. оставащият ресурс е 0,85. Това означава, че полученият експлоатационен срок следва просто да се умножи по 0,85. Така са получени (закръглени) стойностите в най-дясната колона на табл. 1.

На основата на горните резултати и анализ са изготвени препоръки и програма за мониторинг на съоръжението, които тук не се представят.

5. Заключение

Представеният доклад е продължение на Част 1, в която се анализира случай на много големи трептения напречно на посоката на вятъра на 120-метров комин със стоманена носеща конструкция, причинени от резонансни явления вследствие на вихрово възбуждане.

В тази Част 2 е направен преглед и анализ на възможни решения на проблема. Окончателно се препоръчва използване на подходящ виброгасител. По предложение на авторите избраното от възложителя решение е настроен флуиден демпфер TLD (tuned liquid damper), разработен от специализиран консултант. Неговата ефективност се доказва не само теоретично, но и от последващата експлоатация на комина, при която не се наблюдават трептения с голяма амплитуда.

На основата на теоретично установеното поведение на комина с монтирания демпфер е извършена оценка на безопасния експлоатационен срок на съоръжението. За целта е направена „експертна“ категоризация на детайлите на стоманената конструкция, определени са диапазоните на нормалните напрежения и накрая е извършена съответната оценка в контекста на умора.

ЛИТЕРАТУРА

1. BDS EN 1993-1-9: Evrokod 3: Proektirane na stomaneni konstruksii. Chast 1-9: Umora. CEN, 2005.
2. BDS EN 1993-3-1: Evrokod 3: Proektirane na stomaneni konstruksii. Chast 3-1: Kuli, macti i komini – kali i macti. CEN, 2006.
3. Zdravkovich, M. Review and Classification of Various Aerodynamic and Hydrodynamic Means for Suppressing Vortex Shedding. // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 7, 1981, pp. 145-189.
4. CICIND Model Code for Steel Chimneys, 2002.
5. CICIND Model Code for Steel Chimneys, 2010.
6. Kühn, B., M. Lukić, A. Nussbaumer, H.-P. Günther, R. Helmerich, S. Herion, M. H. Kolstein, S. Wallbridge, B. Androic, O. Dijkstra, Ö. Bucak. Assessment of Existing Steel

Structures: Recommendations for Estimation of Remaining Fatigue Life. Background documents in support to the implementation, harmonisation and further development of the Eurocodes, Joint report prepared under the JRC – ECCS cooperation agreement for the evolution of Eurocode 3 (programme of CEN / TC 250), 2008.

BEHAVIOUR OF TALL CHIMNEYS WITH STEEL SUPPORTING STRUCTURE UNDER WIND ACTION. PART 2: THE SOLUTION

St. Raykov¹, N. Rangelov², D. Dinev³

Keywords: tall chimneys, dampers, TLD, safe life assessment

ABSTRACT

This paper is a continuation of Part 1, where the observed very large across-wind vibrations of a 120-m chimney with steel supporting structure are theoretically confirmed to be caused by resonance phenomena due to vortex shedding. Thus, the structure is proven dangerous.

In this contribution, an overview and analysis are made of three groups of possible solutions of the problem. Eventually, an appropriate damper is proposed to be installed. Based on the suggestions by the authors, the device selected by the owner is a tuned liquid damper (TLD), designed by a specialised consulting firm. The effectiveness of the damper is proven not only theoretically, but also during the subsequent operation of the facility, when no visible oscillations have been observed following the installation of the damper.

Based on the theoretically determined behaviour of the chimney with TLD installed, following the method of EN 1993-1-9, an assessment of the safe life of the structure is performed. Some parameters in this context have been determined using methods and recommendations of CICIND Model Code.

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.