

Получена: 29.08.2017 г.

Приета: 04.12.2017 г.

## НЯКОИ ОСОБЕНОСТИ ПРИ ПРОЕКТИРАНЕ НА СТОМАНЕН СИЛОЗ С ОБЕМ $V = 110 \text{ m}^3$

Л. Здравков<sup>1</sup>

*Ключови думи:* стоманен силоз, композиция, сеизмично въздействие, ефективна ширина

### РЕЗЮМЕ

Стоманен силоз за съхранение на хидратна вар с обем  $V = 110 \text{ m}^3$  е построен в циментов завод в България. Той има следните основни елементи – плосък покрив, цилиндрично тяло и конична разтоварваща фуния. Върху покрива е монтиран филтър, а под фунията – вибрационно устройство, което осигурява цялостно изпразване на съоръжението. С цел транспортиране на хидратната вар, под силоза е поставен стоманен шнек с диаметър  $\varnothing 219$ . За осигуряване на възможността за безконфликтно поставяне и обслужване на шнека, силозът е монтиран върху връхна конструкция от прътови елементи. Конструкцията може да има различен вид и композиция. Независимо от вида ѝ, тя поражда концентрирани меридианни сили в цилиндричното тяло на силоза. В резултат, тънкостенната черупка може да загуби местна устойчивост.

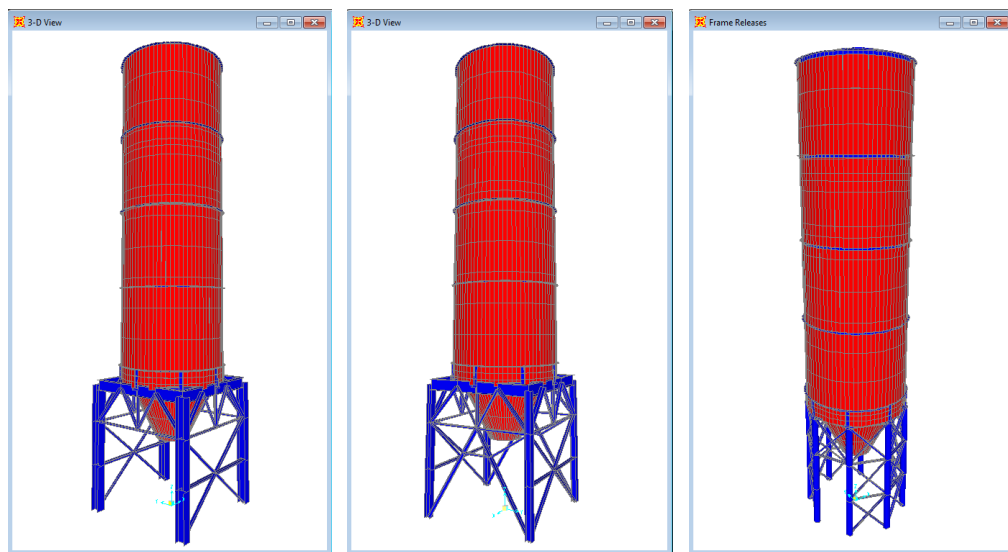
В статията по-долу ще бъдат показани някои характерни особености, които следва да бъдат взети предвид при анализа и проектирането на това интересно съоръжение.

### 1. Композиция на носещата конструкция под силоза

Стоманената конструкция под силозното тяло може да има различна композиция и геометрия, всяка от които е свързана с използване на различни носещи елементи, възли и разход на материал. Разгледаните три варианта са показани на фиг. 1:

---

<sup>1</sup> Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции“, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov\_fce@uacg.bg



*а) четири колони и греди между тях  
X-връзки в едната равнина  
и рамки в другата*

*б) четири колони и греди между тях  
X-връзки в едната равнина  
и λ-връзки в другата*

*в) осемтръбни колони  
X-връзки между тях*

**Фиг. 1. Варианти на носещата конструкция под силоса**

Показаните на фиг. 1а,б решения се характеризират със следното:

- вертикалните колони са само четири на брой;
- между колоните са поставени хоризонтални греди, които осигуряват „стъпване“ на цилиндричното тяло на силоса в 8 точки;
- в равнината на шнека са „развити“ вертикални X-връзки, понасящи хоризонталните товари;
- в другата равнина, перпендикулярно на шнека, са оформени стоманени рамки, виж фиг. 1а, или са поставени λ-връзки, вж. фиг. 1б. По този начин се осигурява свободен монтаж и достъп до шнека.

Показаното на фиг. 1в решение е със следните особености:

- непосредствено под цилиндричното тяло са поставени 8 тръбни колони;
- тъй като колоните са в директен контакт със силоса, отпада необходимостта от поставянето на допълнителни хоризонтални греди;
- за понасяне на хоризонталните товари между колоните са поставени вертикални X-връзки. За преминаване на шнека и лесен достъп до него в две от полетата са премахнати част от връзките.

Всяко едно от разгледаните по-горе вариантни решения е свързано с различни сечения, респективно – тегла на елементите. Всяко има своите предимства и недостатъци.

Но липсата на греди при последното решение е предпоставка то да бъде най-икономично откъм разход на материал и възлите между елементите да са еднообразни, и сравнително прости.

Може би не е случайно, че когато под силозите не преминават голямогабаритни превозни средства, много често носещата конструкция под силоза е изградена само от колони и вертикални връзки.

## 2. Оразмеряване за сеизмично въздействие

Районът, където е изградено съоръжението, се характеризира като сеизмичен. За понасяне на хоризонталните въздействия между колоните са поставени вертикални връзки, вж. фиг. 1в. Ако те са с X-образно очертание, при клас на дуктилност DCM може да се приеме коефициент на поведение  $q \leq 4,0$  [4]. Отчитайки нерегулярността на конструкцията на силоза по височина, стандарт БДС EN 1998-4 [5] изисква определеният по БДС EN 1998-1:2005 [4] коефициент  $q$  да бъде умножен по 0,7. В резултат, горната граница на коефициента на поведение  $q$  на силоза, при X-връзки и клас на дуктилност DCM, ще бъде:

$$q_{[2]} = q_{[1]} \cdot 0,7 = 4,0 \cdot 0,7 = 2,8. \quad (1)$$

Отчитайки факта, че силозът ще се експлоатира на открито, в агресивна производствена среда, е прието минималното сечение на диагоналните пръти във вертикалните X-връзки да бъде съставено от два профила L50×5. Носещата им способност на опън се определя чрез израза:

$$N_{t,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 2,4,8 \frac{23,5}{1,05} = 214,9 \text{ kN}, \quad (2)$$

в който  $A = 2,4,8 = 9,6 \text{ cm}^2$  е площта на съставеното от два ъглови профила L50×5 стоманено сечение;

$f_y = 23,5 \text{ kN/cm}^2$  – характеристичната стойност на границата на провлачане на стомана S235;

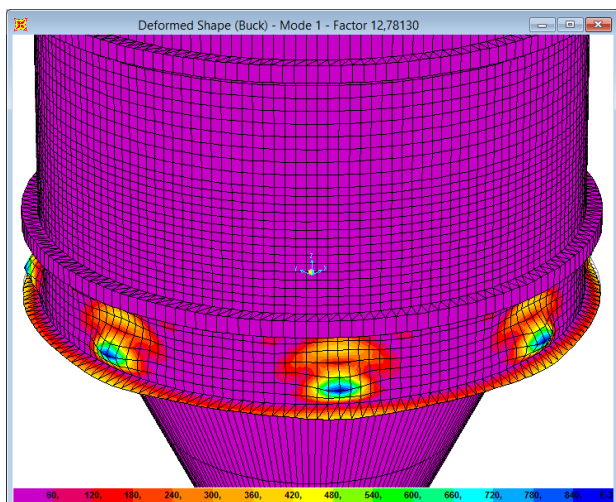
$\gamma_{M0} = 1,05$  – частен коефициент на сигурност по материал.

Изчислителното усилие в диагонал от X-връзката при земетръс, при приет коефициент на поведение  $q = 1,5$ , е със стойност  $N_{Ed} = 185,35 \text{ kN}$ , т.е.  $N_{t,Rd} > N_{Ed}$ . От където следва, че при земетръс вертикалните X-връзки ще останат еластични, няма да провлачат и няма да разсейват енергия. Силозът ще „работи“ в еластичен стадий и коефициент на поведение  $q = 2,8$  остава недостижим. Посочената в Наредба № РД-02-20-2 [6] стойност за коефициента на реагиране  $R = 0,30$ , т.е.  $q = 1/R = 3,33$  е още по-висока, респективно – още по-нереалистична.

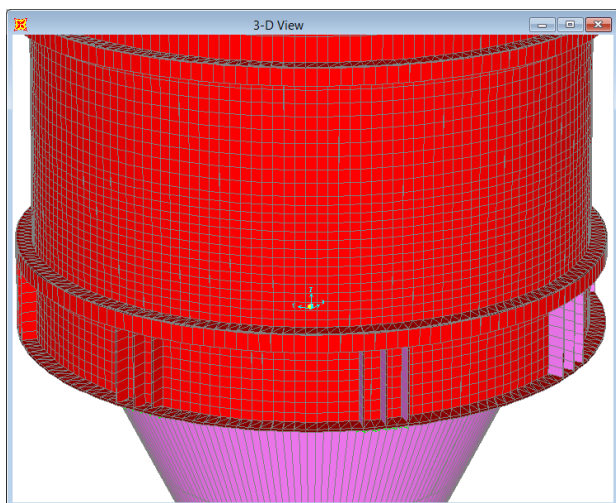
Пряко последствие от принуденото оразмеряване с  $q = 1,5$  са по-големите усилия в стоманените елементи на силоза, в анкерните болтове и във фундамента под него, в сравнение с проектиране при  $q = 2,8$ . Въпреки че, усилията са по-големи, но са по-близо до реалността.

### 3. Ефективна ширина на натисковата зона

Цилиндричното тяло на силоза е „стъпило“ направо върху 8 тръбни колони. Това решение води до появата на 8 концентрирани сили в тънкостенната черупка в меридианно направление. За да се предотврати загубата на устойчивост от осов натиск в черупката, каквато е показана на фиг. 2, над колоните са поставени допълнителни закоравяващи ребра, вж. фиг. 3. Те значително намаляват склонността на цилиндричната черупка да губи устойчивост. При направеното с помощта на програмния продукт SAP 2000 [8] числено изследване, коефициентът на загуба на устойчивост в първия случай  $k = 12,781$ , а във втория –  $k = 25,165$ , вж. фиг. 5.



Фиг. 2. Загуба на устойчивост в цилиндричното тяло на силоза над опорите, от осов натиск



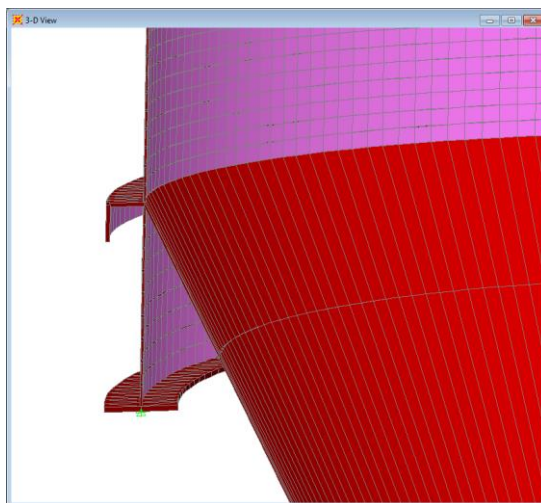
Фиг. 3. Закоравяване на цилиндричното тяло на силоза чрез поставяне на вертикални ребра

При силози, които са подпрени на отделни опори без пръстеновидна греда, стандарт БДС EN 1993-4-1:2007 [3] предписва минималната височина  $L_{\min}$  на ребрата да бъде:

$$L_{\min} = 0,4r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \frac{1}{n(n^2 - 1)}}, \quad (3)$$

където  $r$  е радиусът на цилиндричното тяло на силоза;  
 $t$  – дебелината на цилиндричната черупка;  
 $n$  – броят на опорите по обиколката на черупката.

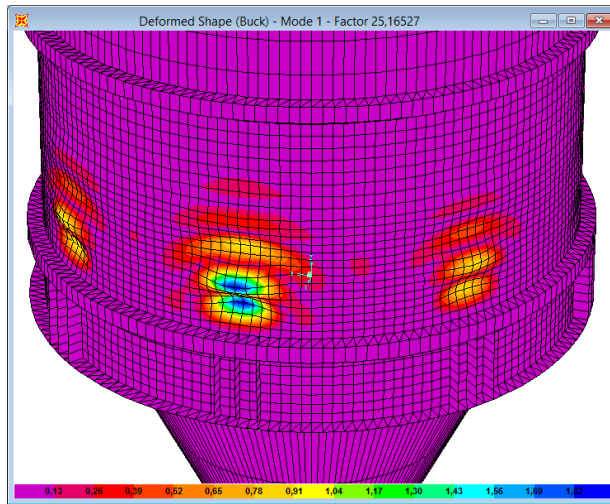
В този случай изправящата фуния е снабдена към цилиндричното тяло на известно разстояние от долния му ръб, вж. фиг. 4. Височината на снаждане е съобразена с минималната височина  $L_{\min}$  на ребрата. При такова решение има възможност колоните да бъдат поставени центрчно под цилиндричното тяло, т.е. в тях и в цилиндъра да не се пораждат огъващи моменти.



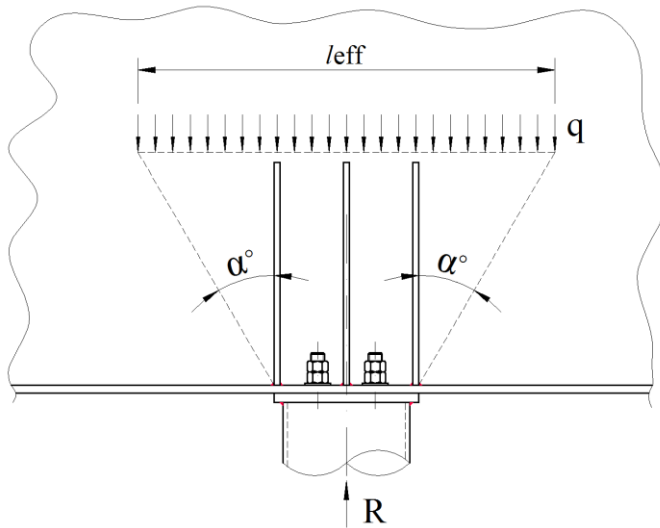
Фиг. 4. Снаждане на цилиндричното тяло с разтоварващата фуния

Закоравяващите ребра, поставени над опорите, предотвратяват изкорубването на черупката непосредствено над мястото на прилагане на концентрираните сили. Но това не означава, че в зоната над ребрата, били те и с височина по-голяма от минималната  $L_{\min}$ , загубата на устойчивост на черупката е предотвратена, вж. фиг. 5.

Цилиндричното тяло трябва да бъде проверено за изкорубване при меридианен (осов) натиск съгласно методиката, посочена в стандартите БДС EN 1993-1-6:2007 [2] или БДС EN 1993-4-1:2007 [3]. Предвид дискретните опори, в цилиндричното тяло ще се появят концентрирани осови сили. Те ще се разпространяват под някакъв ъгъл  $\alpha$  спрямо вертикалната ос, вж. фиг. 6, и плавно ще намаляват по височина. Стойността на ъгъла е в пряка зависимост от ефективната ширина  $l_{\text{eff}}$ . Очевидно, колкото този ъгъл е по-голям, толкова по-голяма ще е широчината  $l_{\text{eff}}$ , респективно меридианните напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  ще са по-малки.



Фиг. 5. Загуба на устойчивост в цилиндричното тяло на силота над закоравяващите ребра от осов натиск



Фиг. 6. Ъгъл  $\alpha$  на разпространение на натисковите усилия в цилиндрична черупка и ефективна ширина  $l_{eff}$

Ъгълът  $\alpha$  на разпространение на натисковите сили в черупката, дължащи се на опорните реакции  $R$ , може да бъде определен по формулата:

$$\alpha = \arctg\left(0,5 \frac{l_{eff} - s_s}{z}\right), \quad (4)$$

където  $s_s$  е широчината на прилагане на силата (товарния печат);

$l_{eff}$  – ефективната ширина на разпространение на натисковите сили;

$z$  – разстоянието от приложната точка на силата  $R$  до изследваното сечение.

За съжаление цитираните по-горе стандарти [2] и [3] не дават информация нито за стойностите на ъгъла  $\alpha$ , нито за ефективната широчина  $l_{\text{eff}}$ . Единствено в БДС EN 1993-1-5:2005 [1] има записана формула за определяне на  $l_{\text{eff}}$  при местен натиск в равнината на стоманена плоча. Тя има вида:

$$l_{\text{eff}} = s_e \sqrt{1 + \left( \frac{z}{ns_e} \right)^2}, \quad (5)$$

в който:

$$s_e = s_s + 2t_f, \quad (6)$$

$$n = 0,636 \sqrt{1 + \frac{0,878a_{\text{st},1}}{t_w}}, \quad (7)$$

$t_f$  – дебелината на пояса, в който е приложена силата;

$t_w$  – дебелината на стеблото на стоманената плоча;

$a_{\text{st},1}$  – площта на брутно напречно сечение на ребрата, условно „размазана“ по широчината  $s_e$ .

Формула (5) е валидна, когато е изпълнено неравенство (8). В противен случай приносът на закоравяващите ребра се пренебрегва.

$$s_{\text{st}}/s_e \leq 0,5, \quad (8)$$

където  $s_{\text{st}}$  е осовото разстояние между надлъжните ребра.

Тук въпросът е дали тази формула за равнинни плочи е приложима при цилиндрични черупки, каквито са силозите? Или да се използват резултатите на *Whitmore* [9], публикувани в далечната 1952 г., посочващи, че ъгълът на разпространение  $\alpha = 30^\circ$ ? За да намери отговор на тези въпроси, авторът е създал пространствен изчислителен модел на силоза, ползвайки програмния продукт ANSYS [7]. При моделирането на съоръжението са направени следните приемания:

- вътрешен диаметър на цилиндричното тяло –  $D = 3485$  mm;
- височина на цилиндричното тяло  $h_c = 10\,950$  mm;
- използвана стомана – S235;
- всички елементи са въведени като черупки (shell181) с техните реални дебелини;
- максималният размер на крайните елементи е 50 mm;
- прътовата конструкция под силозното тяло е симулирана само с колоните си, които са 8 бр., и са запънати към фундамента;
- вертикалното натоварване е равномерно разпределено и е приложено към горния ръб на цилиндричното тяло;
- изследването е проведено с отчитане на влиянието на преместванията, причинени от натоварването, т.е. с отчитане на ефектите от втори ред.

За облекчаване на изчисленията е използвана опцията symmetry, която позволява да се изследва само част от конструкции, имащи ос на симетрия и симетрично натоварване.

След извършения анализ са отчетени нормалните меридианни напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  над опората, по цялата височина на цилиндричното тяло. Знаейки дебелината  $t$  на черупката и стойността на опорната реакция  $R$ , ефективната ширина  $l_{eff}$  може да бъде определена по формулата:

$$l_{eff} = \frac{R}{\sigma_{x,Ed} t}, \quad (9)$$

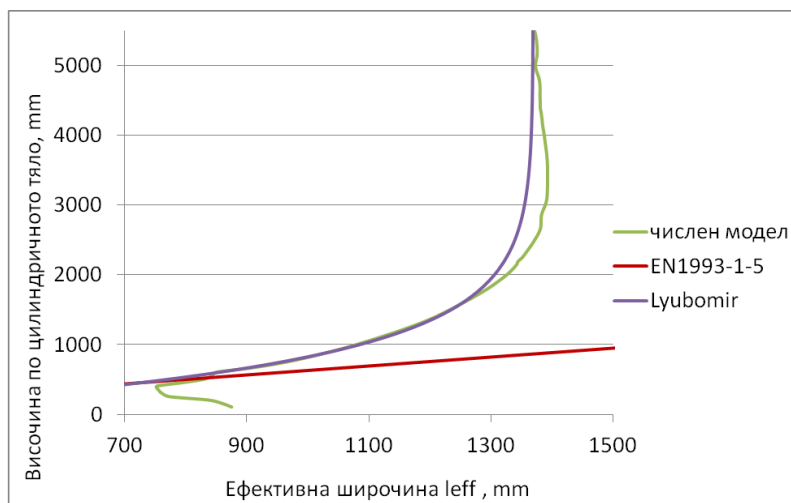
където  $R$  е вертикалната реакция в опората, вж. фиг. 6;

$\sigma_{x,Ed}$  – меридианните нормални напрежения на височина  $z$  на цилиндричното тяло;

$t$  – дебелината на цилиндричната стоманена черупка.

За сравнение, ефективната ширина  $l_{eff}$  на натисковата зона над опората е определена и съгласно формула (5) от БДС EN 1993-1-5:2005 [1].

От получените по формули (5) и (9) резултати са построени графики, показващи изменението на  $l_{eff}$  по височина на цилиндричното тяло, вж. фиг. 7.



Фиг. 7. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  по височина на цилиндричното тяло

Очевидно, има съществени разлики между ефективните широчини  $l_{eff}$ , респективно напреженията  $\sigma_{x,Ed}$ , определени от числовия модел на силоза и по стандарт БДС EN 1993-1-5:2005 [1].

За конкретния силоз за гасена вар, с обем  $V = 110 \text{ m}^3$  и 8 колони под него, авторът е извел аналитичен израз за определяне на стойностите на  $l_{eff}$  по височина. Той има вида:

$$l_{eff} = s_e e^{-\frac{kz}{l-s_e}} + l \left( 1 - e^{-\frac{kz}{l-s_e}} \right), \quad (10)$$

където  $s_e$  е минимална ширина, определя се по формула (5);



$e = 2,71828$  – Неперово число;

$k = 1,9$  – корекционен коефициент, валиден за конкретния силос. Неговото предназначение е да калибрира резултатите на формула (10) към получените чрез числени модели и/или натурни експерименти за конкретен силос;

$z$  – вертикално разстояние между опората на цилиндричното тяло и разглежданото сечение от цилиндричната черупка;

$l$  – хоризонталното разстояние между опорите, по дъгата. Определя се чрез израза:

$$l = \frac{2\pi r}{n_c}, \quad (11)$$

в който  $r$  е радиусът на средната повърхнина на цилиндричното тяло на силоза;

$n_c$  – броят на колоните (опорите) под цилиндричното тяло.

Според показаното във от фиг. 7, че ефективната широчина  $l_{\text{eff}}$  не нараства линейно, може да се направи изводът, че ъгълът на разпространение  $\alpha$  също не е постоянен по височина. Той има най-големи стойности при основата и постепенно намалява по височина.

## 4. Заключение

Коефициентът на поведение  $q$  при сеизмично въздействие не е с постоянна стойност, а зависи от вида и сечението на вложените елементи. Когато те са по-мощни от необходимото, разсейване на сеизмична енергия може и да не се случи. И докато стандарт БДС EN 1998-4:2006 [5] допуска намаляване на стойностите на  $q$ , в зависимост от дисипиращите елементи, то в Наредба № РД-02-20-2 [6] стойността на  $q = 3,33$  е фиксирана и не може да бъде намалявана. Необосновано големите стойности на  $q$  в Наредбата водят до следното:

- резултатните разрезни усилия от земетръс в елементите на силоза са невярно ниски;
- опънните и срязващите усилия в анкерните болтове, респективно във фундамента, се получават неколkokратно по-ниски от реалните.

Закоравяващите ребра, поставени над опорите, предотвратяват изкорубването на черупката непосредствено над мястото на прилагане на концентрираните сили. Това не означава, че в зоната над ребрата, били те и с височина по-голяма от минималната, загубата на устойчивост на черупката е предотвратена.

Разликата между стойностите на ефективната широчина  $l_{\text{eff}}$ , получени чрез числено изследване, и определените по формула (5) от БДС EN 1993-1-5:2005 [1], при този силос е значителна. Поради тази причина авторът не би препоръчал използване на формула (5) за определяне на  $l_{\text{eff}}$  при цилиндрични стоманени силози.

## ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-5:2005, Проектиране на стоманени конструкции. Пълностенни конструктивни елементи, юни 2007.

2. БДС EN 1993-1-6:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Якост и устойчивост на черупкови конструкции.
3. БДС EN 1993-4-1:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Силози.
4. БДС EN 1998-1:2005, Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Общи правила, сеизмични въздействия и правила за сгради.
5. БДС EN 1998-4:2006, Проектиране на конструкциите за сеизмични въздействия. Силози, резервоари и тръбопроводи.
6. Наредба № РД-02-20-2 за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони, ДВ, бр. 13 от 2012 г.
7. ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, the U.S.A.
8. SAP 2000, Structural analysis program. Computers and Structures, Inc.
9. *Whitmore, R. E.* Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No. 16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, May 1952.

## **SOME SPECIFIC FEATURES OF DESIGNING A STEEL SILO WITH $V = 110 \text{ m}^3$ CAPACITY**

**L. Zdravkov<sup>1</sup>**

*Keywords: steel silo, composition, earthquake impact, effective width*

### **ABSTRACT**

A steel silo for storage of lime with volume  $V = 110 \text{ m}^3$  is mounted in a cement plant in Bulgaria. It has the following main elements – a flat roof, a cylindrical body and a conical discharge hopper. On the roof a filter is mounted and under the hopper – a vibration device, which ensures complete emptying of the plant. In order to transport the hydrated lime beneath the silo, a steel screw with a diameter  $\text{Ø}219$  has been placed. To provide the opportunity for conflict-free insertion and service of the screw, the silo is mounted on a supporting structure built of frame elements. The structure may be of a different kind and composition. Irrespective of its kind, it generates concentrated meridional forces in the cylindrical body of the silo. As a result, the thin-walled shell may lose its local stability.

The paper shows some specific features which should be taken into account in the analysis and design of this interesting facility.

---

<sup>1</sup> Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnenski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov\_fce@uacg.bg