

## ВЛИЯНИЕ НА МЕЖДИННИТЕ ПРЪСТЕНИ И НА ВИСОЧИНАТА НА „ПОЛАТА” ВЪРХУ ЕФЕКТИВНАТА ШИРОЧИНА НА НАТИСКОВАТА ЗОНА ВЪВ ВЪЗЕЛА КОЛОНА - ЦИЛИНДРИЧНО ТЯЛО НА СТОМАНЕН СИЛОЗ

Л. Здравков<sup>1</sup>

*Ключови думи:* стоманен силоз, междинни пръстени, натискава зона, ефективна широчина

### РЕЗЮМЕ

Стоманените силози са интересни, комплексни съоръжения. Когато те са повдигнати над земята, в тях се съчетават листови и прътови елементи. В местата на снаждане на 2-та типа елементи възникват напрежения с големи стойности, които могат да доведат до местна загуба на устойчивост на тънкостенните черупки. Един от дискуссионните въпроси е как да се определи ефективната широчина  $l_{eff}$  на разпространение на натисковите напрежения от опорите по височина. За съжаление, референтните стандарти БДС EN 1993-1-6:2007 и БДС EN 1993-4-1:2007 не дават отговор на този въпрос. Очевидно влияещите фактори са много и трудно могат да бъдат обхванати в един аналитичен израз и / или таблица.

В настоящото изследване авторът е анализирал влиянието на:

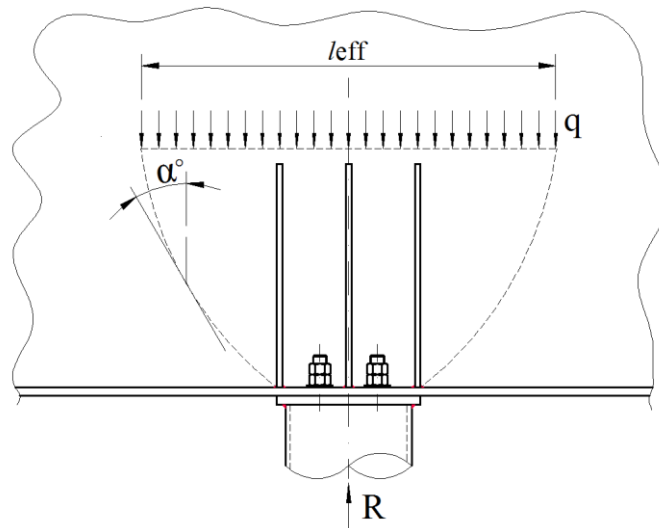
- наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло;
- положение на изпразващата фуния по височина.

### 1. Въведение

При аналитично (ръчно) решение на стоманените силози, цилиндричното тяло следва да бъде проверено за изкорубване при меридианен (осов) натиск съгласно методиката, посочена в стандартите БДС EN 1993-1-6:2007 [2] и 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, виж фиг. 1, и плавно ще намаляват по височина. Стойността на ъгъла е в пряка зависимост с ефективната широчина  $l_{eff}$ . Очевидно, колкото този ъгъл е по - голям, толкова по - голяма ще е ефективната широчина  $l_{eff}$  в черупката, респективно меридианните напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  ще са по - малки.

---

<sup>1</sup> Любомир Здравков, доц. д-р инж., УАСГ, София 1046, бул. „Христо Смирненски” №1, корпус «Б», ет. 7, каб. 733, e-mail: [zdravkov\\_fce@uacg.bg](mailto:zdravkov_fce@uacg.bg)



**Фиг. 1. Ъгъл  $\alpha$  на разпространение на натисковите усилия в цилиндрична черупка и ефективна ширина  $l_{eff}$**

За съжаление цитираните по - горе стандарти [2] и [3] не дават информация нито за стойностите на ъгъла  $\alpha$ , нито за  $l_{eff}$ . Единствено в стандарт БДС EN 1993-1-5:2005 [1] има записана формула за определяне на  $l_{eff}$  при местен натиск, но тя е приложима за стоманени плочи. Не е препоръчително тя да се използва при цилиндрични черупки [5].

В свое изследване от 2016 г авторът се е опитал да определи влиянието на следните параметри върху разпределението на меридианните нормални напрежения по височина, респективно върху ефективната ширина  $l_{eff}$ :

- наличие на вертикални закоравяващи ребра;
- наличие на конична изпразваща фуния;
- влияние на вътрешното налягане по стената.

За съжаление, в изследването си от 2016 г авторът не е имал възможността да анализира влиянието на:

- наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло;
- положение на изпразващата фуния по височина (височината на „полата“).

Целта на настоящата статия е този пропуск да бъде запълнен.

## 2. Числено изследване

За да намери отговор на поставените по - горе въпроси, авторът е направил няколко пространствени изчислителни модела на стоманен силос, ползвайки програмния продукт ANSYS [6]. Силозът е със следните размери:

- а) обем  $V = 110 \text{ m}^3$
- б) съхраняван продукт - гасена вар;
- в) вътрешен диаметър  $D = 3\,485 \text{ mm}$ ;
- г) височина на цилиндричното тяло  $h_c = 10\,950 \text{ mm}$ ;
- д) брой на поясите по височина - 5 бр.;
- е) дебелина на 1-и пояс  $t_{s,1} = 7 \text{ mm}$ , а на останалите -  $t_{s,2} = 6 \text{ mm}$ ,  $t_{s,3} = t_{s,4} = t_{s,5} = 4 \text{ mm}$ ;
- ж) брой колони под силоза - 8 бр. ;
- з) използвани материали - стомана S235, съгласно БДС EN 10025-2 [4].

При моделирането на съоръжението са направени следните приемания:

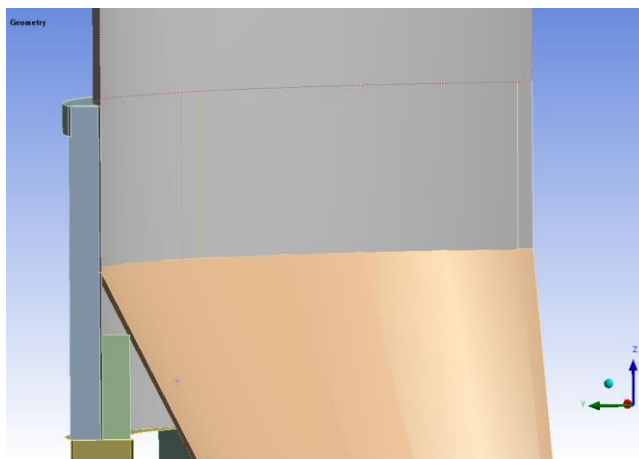
- всички елементи са въведени като черупки (shell181) с техните реални дебелини;
- максималният размер на крайните елементи е 50 mm;
- прътовата конструкция под силозното тяло е симулирана само с колоните си, които са 8 бр., и са запънати към фундамента;

- при изследваните варианти на силоза, с едно изключение изпразващата фуния е снадена към цилиндричното тяло на известно разстояние от долния му ръб, виж фиг. 2. Това решение позволява гредите или колоните на връхната конструкция да бъдат поставени точно под цилиндричното тяло, т.е. в него да не се пораждат допълнителни огъващи моменти.

- 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 2-ри 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.



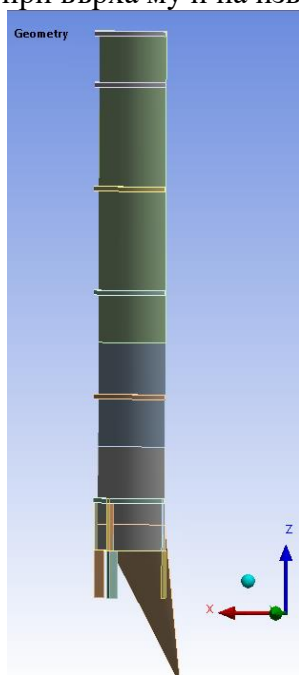
**Фиг. 2. Снаждане на цилиндричното тяло с разтоварващата фуния**

Над колоните, отвътре и отвън на цилиндричното тяло, са поставени закоравяващи ребра.

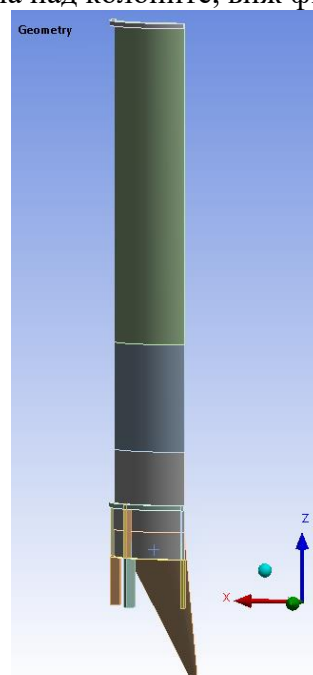
С цел да се отчете ефекта от междинните пръстени, изследването е проведено при следните конструктивни решения:

а) по цилиндричното тяло на силоза са поставени множество пръстени, както междинни, така и при върха на съоръжението, виж фиг. 3 - а);

б) по цилиндричното тяло на силоза няма междинни пръстени. Такива закоравяващи елементи има само при върха му и на известна височина над колоните, виж фиг. 3-б).



а) цилиндрично тяло с множество междинни пръстени



б) цилиндрично тяло без междинни пръстени

**Фиг. 3. Закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.**

Нормалните меридианни напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , породени от вертикален товар  $F_x$ , са отчитани във възли над опорите, 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:

$$l_{eff} = \frac{R}{\sigma_{x,Ed} \cdot t}, \quad (1)$$

където:

$R$  е вертикалната реакция в опората, виж фиг. 1, предизвикана от вертикалния товар  $F_x$  ;  
 $\sigma_{x,Ed}$  - осовите мембранни нормални напрежения по височината на цилиндричното тяло;  
 $t$  - дебелината на цилиндричната стоманената черупка.

Ъгълът  $\alpha$  на разпространение на натисковите сили в черупката, виж фиг. 1, дължащи се на опорните реакции  $R$ , се определя по формулата:

$$\alpha = \arctg\left(0,5 \cdot \frac{l_{eff} - s_s}{z}\right), \quad (2)$$

в която:

$s_s$  е широчината на опората;

$z$  - вертикалното разстояние между приложната точка на опорната реакция  $R$  и възелът, където се отчитат меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ .

С цел да се отчете ефекта от междинните закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло, са изследвани 6 силоза. Те имат различни височини на присъединяване на фунията към цилиндричното тяло. При половината от тях са поставени междинни пръстени. Специфичните особености на изследваните силози са посочени по - долу:

#### **Силоз № 1**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 1100$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm, срещу фунията, има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

#### **Силоз № 2**

Аналогичен на **Силоз № 1**, но по цилиндричното тяло са поставени 4-и междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100x10, заварен на ребро.

#### **Силоз № 3**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 550$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

#### **Силоз № 4**

Аналогичен на **Силоз № 3**, но по цилиндричното тяло са поставени 4-и междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100x10, заварен на ребро.

#### **Силоз № 5**

- а) коничната фуния е поставена на  $h = 0$  mm над опората;
- б) на височина  $h = 1100$  mm има пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени само отвън на цилиндричното тяло;
- в) няма междинни закоравяващи пръстени по цилиндричното тяло.

### Силоз № 6

Аналогичен на Силоз № 5, но по цилиндричното тяло са поставени 4-и междинни закоравяващи пръстена. Те са изпълнени от ъглов профил L100x10, заварен на ребро.

За да се отчете ефекта от височината на пръстеновидната греда, коничната фуния и пръстенът от ъглов профил L100x10 са поставени на 3-и различни височини над опората - при  $h = 1100 \text{ mm}$ ,  $h = 800 \text{ mm}$  и  $h = 500 \text{ mm}$ . Вертикалните закоравяващи ребра достигат до закоравяващия пръстен, т.е. до горния пояс на пръстеновидната греда.

Отчитайки факта, че при изследвания силос с обем  $V = 110 \text{ m}^3$  и осем опори, поставянето на междинни пръстени няма практически ефект, такива не са поставяни.

### Силоз № 7

- а) коничната фуния е поставена на височина  $h = 800 \text{ mm}$  над опората;
- б) срещу нея, на същата височина, е поставен пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло, над колоните;

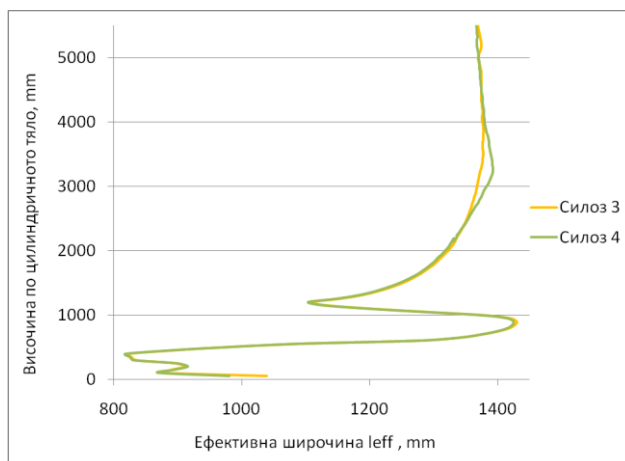
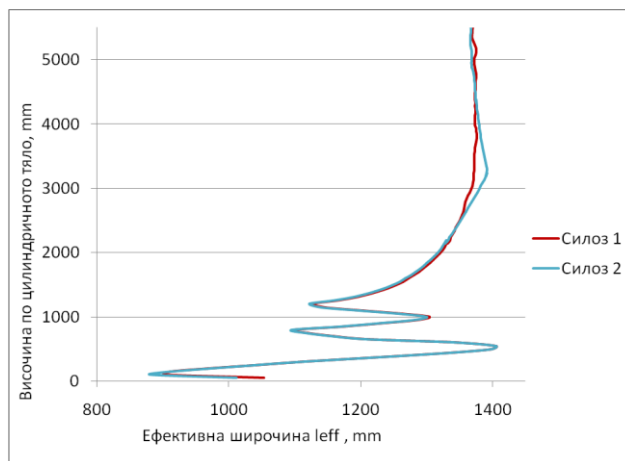
### Силоз № 8

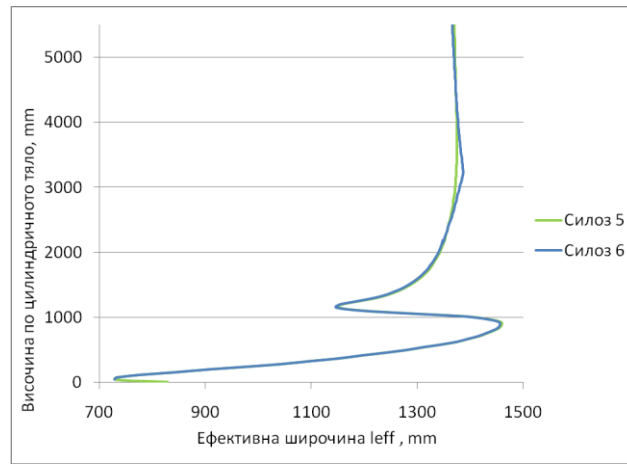
- а) коничната фуния е поставена на височина  $h = 500 \text{ mm}$  над опората;
- б) срещу нея, на същата височина, е поставен пръстен, до който достигат вертикални закоравяващи ребра. Те са поставени отвън и отвътре на цилиндричното тяло, над колоните.

## 3. Резултати

### 3.1. Отчитане на ефекта от наличието на междинни пръстени по цилиндричното тяло

От графиките на фиг. 4 се вижда, че при силос с 8 колони (опори), поставянето на междинни пръстени по височина оказва много малко влияние върху мембранните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , респективно ефективната ширина  $l_{eff}$ .





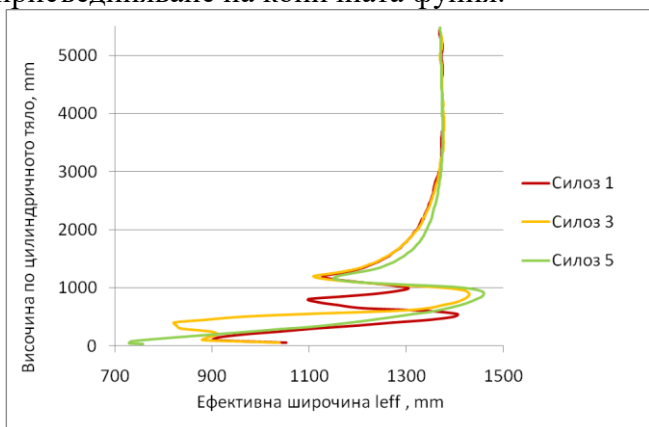
**Фиг. 4. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  в зависимост от наличието на междинни закоравяващи пръстени**

При силози 2, 4 и 6, на височини  $h = 2500 \div 4000$  mm, са изчислени ефективни широчини  $l_{eff}$  по - големи от максималната възможна стойност  $l_{eff,max} = 1368,6$  mm. Подобен феномен е отчетен и в изследване на *Knoedel* и *Ummenhofer* [7]. Най-вероятно това разминаване с реалността да се дължи на факта, че на достатъчно голяма височина стойностите на напреженията  $\sigma_{x,Ed}$  между опорите стават по - големи от тези над тях, виж фиг. 7. От там и ефективната ширина  $l_{eff}$ , определена по формула (1) се получава нереалистично голяма.

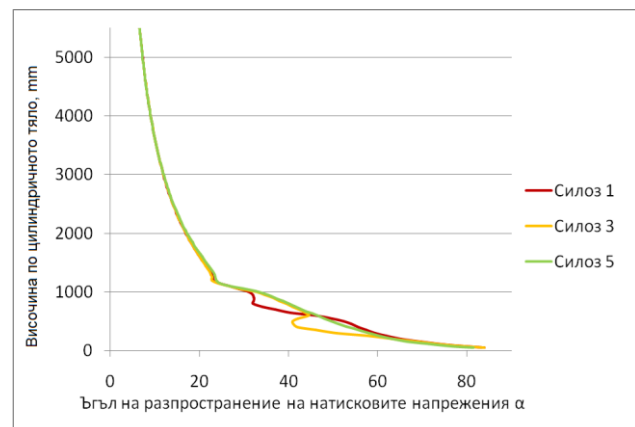
### 3.2. Отчитане на ефекта от различната ниво на присъединяване на коничната фуния

От графиките на фиг. 5 се вижда, че снаждането на коничната фуния с цилиндричното тяло в неговия долен ръб (Силоз № 5) води до по - бързо изравняване на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  над пръстена на височина  $h = 1100$  mm. При снаждане на фунията на ниво  $h = 1100$  mm и  $h = 550$  mm, почти няма разлика в нормалните напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , респективно в ефективната ширина  $l_{eff}$ .

В цилиндричната черупка над най - долния пръстен, до който достигат вертикалните ребра, ъгълът на разпространение  $\alpha$  на натисковите напрежения не зависи от мястото на присъединяване на коничната фуния.



а) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$



б) изменение на ъгъла на разпространение  $\alpha$

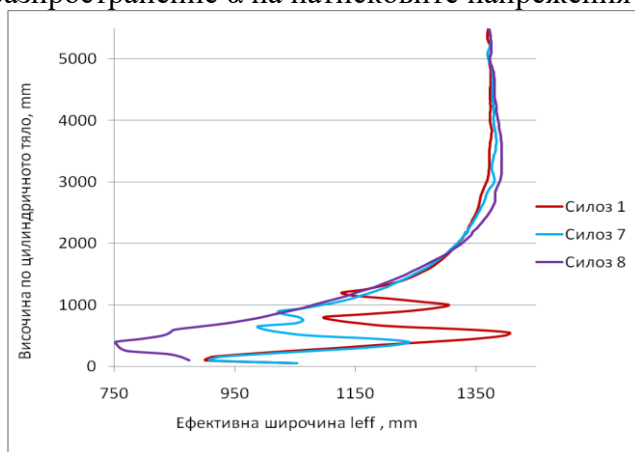
**Фиг. 5. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  и на ъгъла на разпространение  $\alpha$  в зависимост от нивото на присъединяване на коничната фуния**

### 3.3. Отчитане на ефекта от различната височина на пръстеновидната греда

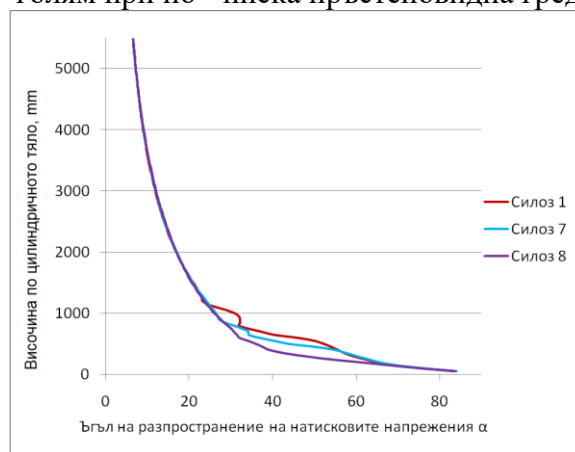
Очевидно, колкото по - ниско е поставен опорния пръстен, до който достигат вертикалните закоравяващи ребра, толкова по - малка ще е стойността на  $l_{eff}$  над въпросния пръстен, виж фиг. 6. Освен това при по-ниската „пола“ са изчислени ефективни широчини  $l_{eff}$  по - големи от максималната възможна стойност  $l_{eff,max}$

В зоната над най - високо поставения опорен пръстен, т.е.  $h > 1100$  mm, разликите в стойностите на  $l_{eff}$  и  $\alpha$  са малки.

В зоната под най-високо поставения опорен пръстен, т.е.  $h < 1100$  mm, ъгълът на разпространение  $\alpha$  на натисковите напрежения е по - голям при по - ниска пръстеновидна греда .



а) изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$



б) изменение на ъгъла на разпространение  $\alpha$

**Фиг. 6. Изменение на ефективната ширина  $l_{eff}$  и на ъгъла на разпространение  $\alpha$  в зависимост от нивото на опорния пръстен**

Видимо стойностите на ъгъла  $\alpha$  намаляват по височина. Но за щастие, ефективната ширина  $l_{eff}$  нараства, виж фиг. 4 и фиг. 6. Практическото последствие от което е, че ако стойностите на  $l_{eff}$  бъдат определени за точка, намираща се на разстояние  $l_R$  над закоравяващия пръстен, до който достигат вертикалните ребра, и те бъдат използвани впоследствие при аналитични изчисления, тези стойности ще са консервативни, в посока на сигурността.

Разстоянието  $l_R$  се определя чрез израза [2]:

$$l_R = 0,1.L \leq 0,16r \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} \quad , \quad (3)$$

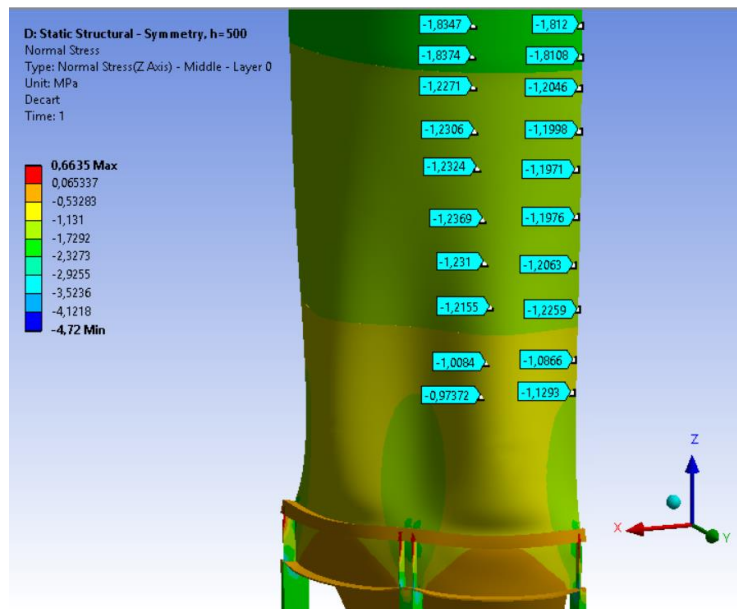
където:

$L$  е разстоянието между пръстените, укрепващи цилиндричното тяло на силоза;

$r$  - радиусът на цилиндричното тяло;

$t$  - дебелината на цилиндъра.

Интересен ефект е наблюдаван в настоящото изследване - при отдалечаване от опорите би следвало да има изравняване на стойностите на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  в едно хоризонтални сечение, но всъщност това не се случва. Нещо по - вече, на достатъчно голяма височина стойностите на напреженията  $\sigma_{x,Ed}$  между опорите стават по - големи от тези над тях, виж фиг. 7.



Фиг. 7. Изменение на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  по височина

#### 4. Заключение

От настоящото изследване, проведено с един сравнително малък стоманен силос, но в 8 различни варианта, могат да се направят следните изводи:

- при условие, че се запазва положението на закоравяващия пръстен, до който достигат вертикални опорни ребра, промяната на мястото на закрепване на фунията към цилиндъра оказва много слабо влияние;

- при силоси с малък диаметър и 8 колони, междинните пръстени оказват пренебрежимо малко влияние върху разпределението на меридианните (осовите) натискови напрежения ;

- ъгълът на разпространение  $\alpha$ , определен за напрежения  $\sigma_{x,Ed}$ , отчетени непосредствено над закоравяващия пръстен, до който достигат вертикалните ребра, е в границите  $\alpha = 25^{\circ} \div 40^{\circ}$ . С други думи използването на резултатите на *Whitmore* [8], посочващи, че ъгълът  $\alpha = 30^{\circ}$ , е достатъчно добро при първоначалните "ръчни" изчисления на стоманени силоси. След тяхното провеждане следва да се създаде и анализира пространствен изчислителен модел. При него вече ще бъдат определени реалните стойности на напреженията в зоната на опорите;

- ъгълът на разпространение  $\alpha$  намалява при нарастване на височината  $z$ , но ефективната ширина  $l_{eff}$  непрекъснато нараства до достигане на максималната си стойност;

- не се наблюдава цялостно изравняване на стойностите на меридианните нормални напрежения  $\sigma_{x,Ed}$  в едно хоризонтално сечение.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-5:2007, Проектиране на стоманени конструкции. Пълностенни конструктивни елементи.
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. Силоси.
4. БДС EN 10025-2:2005, Горещовалцовани продукти от конструкционни стомани. Част 2: Технически условия на доставка за нелегирани конструкционни стомани.
5. Здравков Л. А., Някои особености при проектиране на стоманен силос с обем  $V = 110 \text{ m}^3$ , Международна юбилейна научна конференция „75 години УАСГ“, София, 2017.
6. ANSYS, Inc., Canonsburg, Pennsylvania, the U.S.A.



7. Knödel, P. and Ummenhofer, T., Silos with stepped wall thickness on local supports, Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium 2009, Valencia.

8. Whitmore, R. E., Experimental Investigation of Stresses in Gusset Plates, Bulletin No. 16, Engineering Experiment Station, University of Tennessee, May 1952.

## **INFLUENCE OF INTERMEDIATE RINGS AND HEIGHT OF SKIRT ON EFFECTIVE WIDTH OF COMPRESSION ZONE IN JUNCTION COLUMN - CYLINDRICAL SHELL OF STEEL SILO**

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

*Key words: steel silo, intermediate rings, compression zone, effective width*

### **ABSTRACT**

Steel silos are interesting, complicated facilities. When they are raised above the ground, they combine shell and frame elements. In places of join of the 2 types of elements, stresses arise with very high values. It may leads to local loss of stability of thin-walled shells. One discussion point is how to determine the effective width  $l_{eff}$  of distribution of compressive stresses of supports by height of shell. Unfortunately, reference standards БДC EN 1993-1-6: 2007 and БДC EN 1993-4-1: 2007 do not give an answer to this question. Obviously there are a lot of influencing factors and is very difficult to be covered in an analytical expression and / or table.

In his research the author has analyzed the impact of:

- the presence of the intermediate stiffening rings on the cylindrical shell;
- position of discharge hopper by height.

---

<sup>1</sup> Lyubomir Zdravkov, PhD, associate professor, civil engineer, UACEG, Sofia 1046, №1 „Hristo Smirnensky” str., floor 7, office 733, e-mail: [zdravkov\\_fce@uacg.bg](mailto:zdravkov_fce@uacg.bg)