



## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ НА НОСІЙНУ ЗДАТНІСТЬ КОНІЧНОЇ ОБОЛОНКИ СТАЛЕВОЇ ЛІЙКИ БУНКЕРА КОНЦЕНТРАТУ ВУГІЛЛЯ

**В. П. Мушанов, І. В. Роменський, Д. І. Роменський**

*Донбаська національна академія будівництва і архітектури*

*вул. Державіна 2, 86123, м. Макіївка, Україна.*

*E-mail: mvf@dgasa.dn.ua*

*Отримана 27 червня 2008; прийнята 24 вересня 2008.*

**Анотація.** У статті розглянуті основні питання підвищення надійності конічної металевої лійки бункера. Розглянуто основні підходи до дослідження напружено-деформованого стану металевої лійки бункера. Виконано аналітичний розрахунок напружено-деформованого стану (лійки бункера) з використанням ідеалізованої розрахункової схеми за методикою, запропонованою в БНіП II-23-81\* «Сталеві конструкції та норми проектування» і Посібнику «З розрахунку та проектування залізобетонних, сталевих і комбінованих бункерів». Так само виконаний чисельний розрахунок напружено-деформованого стану (лійки бункера) з використанням звичайної елементної оболонки телескопічної конструкції з урахуванням впливу крайового ефекту в місцях нахльосту за допомогою розрахункового комплексу SCAD. Зроблено аналіз напружено-деформованого стану безмоментної конічної оболонки без обліку згинального моменту, а також з урахуванням його впливу, обумовленого нахльостом у місцях телескопічного сполучення царг і викликаного цим фактором явища крайового ефекту. На підставі виконаного аналітичного й чисельного розрахунку зроблені висновки й подані рекомендації з розрахунку й проектування.

**Ключові слова:** металева конструкція лійки бункера, крайовий ефект, напружено-деформований стан, безмоментна оболонка телескопічної конструкції, аналітичні й чисельні методи розрахунку.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ НА НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ КОНИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ СТАЛЬНОЙ ВОРОНКИ БУНКЕРА КОНЦЕНТРАТА УГЛЯ

**В.Ф. Мушанов, И.В. Роменский, Д.И. Роменский**

*Донбасская Национальная Академия Строительства и Архитектуры*

*ул. Державина 2, 86123, г. Макеевка, Украина.*

*E-mail: mvf@dgasa.dn.ua*

*Получена 27 июня 2008; принята 24 сентября 2008.*

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные вопросы повышения надежности конической металлической воронки бункера. Рассмотрены основные подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния металлической воронки бункера. Выполнен аналитический расчет напряженно-деформированного состояния (воронки бункера) с использованием идеализированной расчетной схемы по методике, предложенной в СНиП II-23-81\* "Стальные конструкции и нормы проектирования" и "Руководстве по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров". Выполнен численный расчет напряженно-деформированного состояния (воронки бункера) с использованием конечно элементной оболочки телескопической конструкции с учетом влияния краевого эффекта в местах нахлеста при помощи расчетного комплекса SCAD. Произведен анализ напряженно-деформированного состояния

безмоментной конической оболочки без учета изгибающего момента, а также с учетом его влияния, обусловленного нахлестом в местах телескопического сопряжения царг и вызванного этим фактором явления краевого эффекта. На основании выполненного аналитического и численного расчета сделаны выводы и даны рекомендации по расчету и проектированию.

**Ключевые слова:** металлическая конструкция воронки бункера, краевой эффект, напряженно-деформированное состояние, безмоментная оболочка телескопической конструкции, аналитические и численные методы расчета.

## RESEARCH CONSTRUCTIVE INFLUENCE FEATURES ON THE BEARING ABILITY OF THE CONIC CASING OF THE STEEL FUNNEL OF THE COAL A CONCENTRATE BUNKER

*V. F. Mushchanov, I. V. Romensky, D. I. Romensky*

*Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*

*Derzhavin str. 2, 86123, Makeyevka, Ukraine.*

*E-mail: mvf@dgasa.dn.ua*

*Received 27 June 2008; accepted 24 September 2008.*

**Abstract.** In article the basic questions reliability increasing of the conic metal funnel of the bunker have been examined. The main approaches for researching of the tense-deformed condition of the bunker metal funnel have been considered. The analytical calculation of tense-deformed condition (the bunker funnel) with the idealized account scheme using due to the method offered in BNandR II-23-81\* "Steel structures and designing norms and the instruction on calculation and designing of the reinforced-concrete, steel and combined bunkers has been carried out". The numeral calculation of the tense-deformed condition (the bunker funnel) using the finite element casing of a telescopic structure influence considering the marginal effect in places of overlapping by means of account complex SCAD has been fulfilled. The analysis of the tense-deformed condition momentless of the conic casing without taking into account the bending moment, and considering its influence stipulated by overlapping in places of telescopic side-bars function and caused the factor of the marginal effect phenomenon. On the basis of the fulfilled analytical and numeral calculation conclusions and recommendations as for calculation and designing have been done.

**Keywords:** a metal design funnel the bunker, the marginal effect, the tense-deformed condition, momentless an casing of a telescopic design, analytical and numeral methods of calculation.

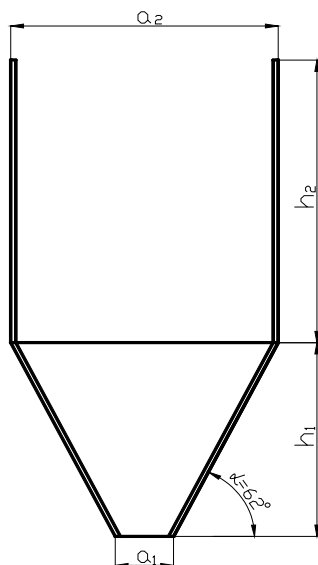
### Введение

Как показывает опыт эксплуатации комбинации сталежелезобетонных цилиндрических бункеров, в результате уменьшения толщины оболочки вследствие коррозионного и абразивного износа возможно разрушение узла сопряжения цилиндрической (железобетонной) и конической (металлической) части. Поэтому целью данной работы является анализ и расчет напряженно-деформированного состояния безмоментной конической оболочки телескопической конструкции с учетом влияния краевого эффекта в местах нахлеста.

### 1. Основные подходы к исследованию напряженно-деформированного состояния воронки бункера.

#### 1.1 Аналитический расчет пространственной оболочки воронки.

Для определения усилий и напряжений в воронке бункера произведен расчет по инженерной методике [1]. В соответствии с заданием бункер предназначен для хранения концентрата угля. Масса хранимого груза 600 т. Соответственно необходимый объем бункера составляет 750 м<sup>3</sup>. Геометрические параметры бункера приведены на рис. 1.



**Рис 1.** Схема бункера:  $a_1 = 1,2$  м,  $a_2 = 9,5$  м,  $h_1 = 7,785$  м,  $h_2 = 7,62$  (м).  $\alpha = 62^\circ$ .

*Нагрузки. Определение давления сыпучих тел на элементы бункера*

Бункера рассчитываются на действие:

- постоянных нагрузок от собственного веса конструкции, веса футеровки;
- временных нагрузок от веса сыпучего материала.

Коэффициент надежности по нагрузке для сыпучего материала принимается  $n = 1,2$

Коэффициент динамичности принимается равным 1,0 (табл.1 /1/, при отношении объема одновременно загружаемой массы (емкости) и емкости бункера 1 : 6 и менее).

Давление сыпучих тел на стенки бункера определяется в неограниченном массиве для состояния предельного равновесия сыпучего. Давление сыпучего определяется без учета сил трения материала о стенки и принимается направленным нормально к их плоскости (см. рис.2).

Расчетное вертикальное давление:

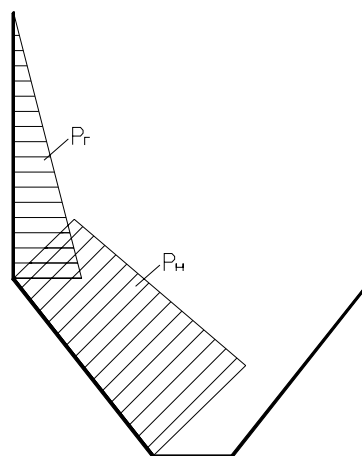
$$P_b = n \gamma h \quad (1)$$

Расчетное горизонтальное давление на вертикальные стенки бункера в месте воронки:

$$P_r = nk\gamma h, \quad (2)$$

где  $k$  - коэффициент бокового давления

$$k = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right), \quad (3)$$



**Рис 2.** Эпюра давления на стенки и воронку бункера.

$\varphi$  - угол внутреннего трения  $25^\circ$  (табл. 7.4 /2/) Расчетное нормальное и касательное давление на наклонные стенки, в зависимости от расстояния от верха засыпки до точки определения давлений, составляет:

$$P_n = nm_0\gamma h, \quad (4)$$

$$P_k = nm_0'\gamma h, \quad (5)$$

$$\text{где } m_0 = \cos^2 \alpha + k \sin^2 \alpha, \quad (6)$$

$$m_0' = (1 - k) \sin \alpha \cos \alpha \quad (7)$$

*Определение усилий*

Конические стенки бункера рассчитываются на растяжение в 2-х направлениях: кольцевом и меридиональном.

Кольцевое растягивающее усилие

$$N_{2i} = \frac{P_n r_i}{\sin \alpha}, \quad (8)$$

где  $h$  - расстояние от верха засыпки бункера,  $r_i$  - радиус конической оболочки в рассматриваемом сечении

Меридиональные растягивающие усилия по направлению образующей конической оболочки (рис. 3)

$$N_{3i} = \frac{P_{pi}}{\sin \alpha} \quad (9);$$

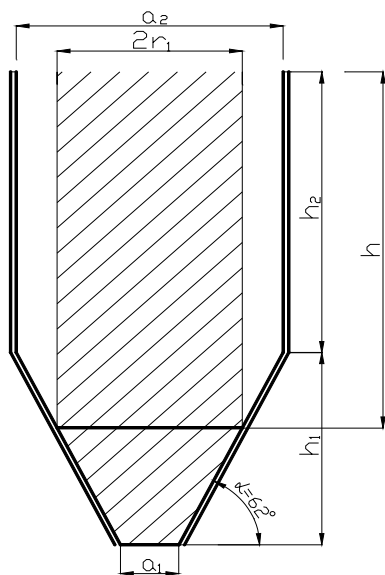


Рис. 3. Объем сыпучего для определения меридиональных усилий.

$$P_{pi} = \frac{1,2\gamma V_i}{2\pi r_i} \quad (10)$$

где  $P_{pi}$  - вертикальная нагрузка от засыпки на глубине  $h$ .

$$V_i = \pi r_i^2 h + \frac{\pi(h_1 + h_2 - h)}{12} (a_1^2 + a_1 2r_1 + (2r_1)^2) \quad (11)$$

При высоте  $h=7,62$ м, соответствующей сопряжению цилиндрической части бункера с воронкой

$$V_i = 749,85 \text{ м}^3.$$

По приведенным выше зависимостям определяются усилия при высоте  $h=11,58$ м, соответствующей середине воронки, и при высоте  $h=15,41$ м, соответствующей низу воронки. Кольцевые усилия в цилиндрической стенке бункера от нагрузки нормальной к поверхности оболочки на единицу длины сечения по образующей.

$$N_{li} = \frac{P_{ni} a_i}{2} \quad (12)$$

Кольцевые напряжения в конической оболочке определяются по формуле (13). Меридиональные напряжения определяются по формуле (14). Приведенные напряжения определяются по формуле (15).

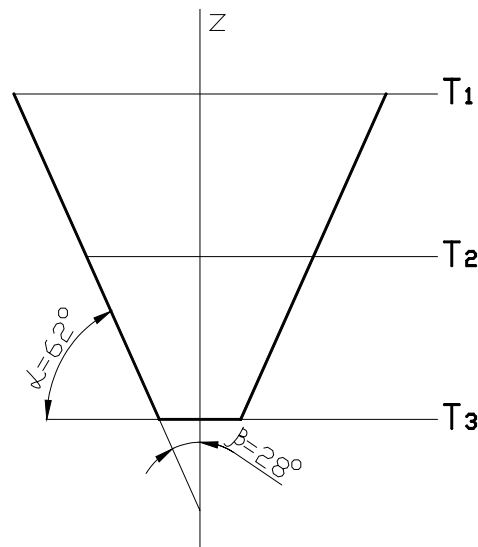


Рис. 4 Схема конической оболочки вращения.

Значение кольцевых, меридиональных и приведенных напряжений для толщины стенки 12мм при высоте  $h=7,62$ м (точка 1), высоте  $h=11,58$ м (точка 2), высоте  $h=15,41$  м (точка 3) приведены в табл.1.

Минимальная теоретическая толщина металла для стали С255 (расчетное сопротивление  $R_y=2550$  кг/см<sup>2</sup> /3/), с учетом коэффициента условий работы  $\gamma_c = 0,8$  (воронка не защищена футеровкой)

$$\sigma_{мер} = \frac{27331,1}{100 * t_{теор}} = R_y \gamma_c,$$

$$t_{теор} = \frac{27331,1}{100 * 0,8 * 2550} = 0,134 \text{ см}.$$

Таким образом, минимальная расчетная толщина металла воронки составляет 2 мм. С учетом конструктивных и технологических требований минимальная допустимая толщина металла составляет 6 мм /6/.

#### 1.2. Расчет в соответствии со СНиП II-23-81\* «Стальные конструкции» /3/

Расчетная схема конической оболочки вращения приведена на рис. 4.

Угол наклона образующей к вертикальной оси оставляет

**Таблица 1.** Значение кольцевых  $\sigma_2$ , меридиональных  $\sigma_1$  и приведенных  $\sigma_{np}$  напряжений.

№ точки	Кольцевые усилия $N_2$ кг/м	Меридиональные усилия $N_3$ (кг/м)	Кольцевые напряжения $\sigma_2$ (кг/см <sup>2</sup> )	Меридиональные напряжения $\sigma_1$ (кг/см <sup>2</sup> )	Приведенные напряжения $\sigma_{np}$ (кг/см <sup>2</sup> )
1	21132,9	27331,1	176	227	206
2	17802,0	18911,0	148	157	153
3	5396,6	5023,7	45	42	44

**Таблица 2.** Значения вычисленных напряжений.

№ точки	P (кг/м <sup>2</sup> )	r(м)	$\cos \beta$	F (кг)	t (мм)	$\sigma_2$ (кг/см <sup>2</sup> )	$\sigma_1$ (кг/см <sup>2</sup> )	$\sigma_{np}$ (кг/см <sup>2</sup> )
1	3928,3	4,75	0,883	719856	12	176	228	207
2	5969,7	2,633	0,883	276096	12	148	158	153
3	7941,6	0,6	0,883	16714	12	45	42	44

$$\beta = 90^\circ - \alpha^0 \quad (16)$$

$$\cos \beta = 0.883.$$

Кольцевые напряжения

$$\sigma_2 = \frac{Pr}{t \cos \beta} \quad (17)$$

Меридиональные напряжения

$$\sigma_1 = \frac{F}{2\pi r t \cos \beta} \quad (18)$$

где р- расчетное давление на единицу поверхности оболочки;

г- радиус оболочки;

t- толщина оболочки;

F- проекция на ось z полного расчетного давления в рассматриваемом сечении.

Значения вычисленных напряжений приведены в табл.2.

Напряжение от собственного веса воронки  $G=16$  т в сечении  $T_1$  (место сопряжения воронки и стенки) составляет

$$\sigma_1 = \frac{G}{2\pi r t \cos \beta} = 5.1 \text{ кг/см}^2.$$

Таким образом, полученные одинаковые результаты по двум аналитическим инженерным методикам свидетельствуют о корректности расчета. Учет собственного веса металли-

ческих конструкций воронки увеличивает меридиональные напряжения от веса сыпучего на 2...3%.

## 2. Уточненный расчет пространственной оболочки воронки с использованием численных методов

*Основные задачи уточненного расчета. Типы анализируемых расчетных схем.*

При аналитических методах вычисления расчетная схема оболочки представляется достаточно идеализированной и не позволяет учесть ряд факторов, показывающих действительную работу конструкции воронки. В отличие от аналитических методов, изложенных в р.1, уточненный расчет численными методами позволяет уточнить расчетную схему, учесть краевые эффекты в местах нахлестки сопрягаемых царг, задавать переменную толщину оболочки.

Для данного метода расчета применяется проектно-вычислительный комплекс SCAD 7.31

Численные исследования проведены для трех вариантов расчетной схемы:

– расчет воронки постоянной толщиной 12мм без учета изгибающего момента, обусловленного нахлестом в местах телескопического

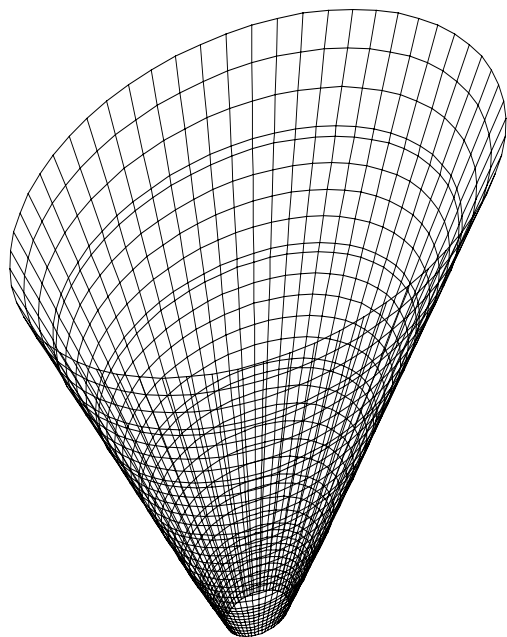


Рис. 5. Расчетная схема воронки.

- сопряжения царг и вызванного этим фактором явления краевого эффекта;
- расчет воронки постоянной толщиной 12 мм с учетом изгибающего момента, обусловленного нахлестом в местах телескопического сопряжения царг и вызванного этим фактором явления краевого эффекта;
- расчет воронки постоянной толщиной 8 мм с учетом изгибающего момента, обусловленного нахлестом в местах телескопического сопряжения царг и вызванного этим фактором явления краевого эффекта;

На основе предварительных численных расчетов определяем необходимую густоту сетки с точностью до 2-х процентов по сравнению с аналитическим расчетом. Расчет выполнен с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD. Комплекс реализует конечно-элементное моделирование статических и динамических расчетных схем, проверку устойчивости, выбор невыгодных сочетаний усилий, проверку несущей способности стальных конструкций. По результатам численных исследований принимаем разбивку стенки конической оболочки воронки на конечные элементы  $0,5 \times 0,5$  м в верхней части с постепенным сужением к низу воронки до  $0,1 \times 0,1$  м (рис. 5).

В протоколе решения задачи для каждого из нагружений указываются значения суммарной узловой нагрузки, действующей на систему.

Нагрузки:

- 1) От собственного веса воронки: 0,09 т для 12 мм и 0,06 т для 8 мм.
- 2) От веса засыпки: от  $3,1 \text{ т/м}^2$  до  $0,57 \text{ т/м}^2$ .
- 3) От нормального давления: от  $-3,93 \text{ т/м}^2$  до  $7,94 \text{ т/м}^2$ .
- 4) От действия изгибающих моментов в местах нахлесточного соединения царг.

Вместе с тем, для удобства сопоставления результатов аналитического и численного расчетов, которое затем используется для выработки окончательных рекомендаций, в конце каждого из 3-х вариантов расчета в табличной форме приведены сравнительные результаты расчета напряженно-деформированного состояния в 3-х характерных точках:

- т.1: в вершине воронки бункера (зоне действия максимальных напряжений);
- т.2: в середине воронки бункера (максимально подверженной воздействию засыпаемого продукта);
- т.3: в нижней части воронки бункера (зоне минимальных напряжений, но максимальных суммарных перемещений).

### 3. Результаты численных исследований.

#### 3.1. Результаты расчета оболочки бункера по схеме 1

Анализ результатов расчета по первому варианту показывает хорошую сопоставимость по приведенным напряжениям численного и аналитического расчетов (погрешность в пределах 0,5% - 12,5%). Это свидетельствует о правильности расчетной схемы и возможности ее использования для дальнейших численных исследований.

Напряжения во внешнем и среднем слоях отличаются для кольцевых и приведенных напряжений на 30%...60%. Из-за значительной толщины оболочки (12 мм), в конечных элементах возникают дополнительные составляющие напряжений, обусловленные изгибом, что свидетельствует о моментной работе оболочки.

Таблица 3. Сравнительная таблица напряжений для расчетов аналитическим методом и численным по схеме 1.

№ точек.	Меридиональные напряжения $s_3$ (кг/см <sup>2</sup> )		Кольцевые напряжения $s_1$ (кг/см <sup>2</sup> )		приведенные напряжения $s$ (кг/см <sup>2</sup> )	
	ан/числ	погреш., %	ан/числ	погреш., %	ан/числ	погреш., %
1	228	9,0	176	14,8	207	0,4
	209,2		206,5		207,86	
2	158	32,8	148	16,2	153	2,1
	119,4		176,8		156,22	
3	42	42,4	45	22,5	44	12,4
	29,5		58		50,23	

Таблица 4. Сравнительная таблица расчета по варианту 1 и варианту 2.

№ точек	Меридиональные напряжения $s_3$ (кг/см <sup>2</sup> )		Кольцевые напряжения $s_1$ (кг/см <sup>2</sup> )		Приведенные напряжения $s$ (кг/см <sup>2</sup> )	
	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %
1	209,2	17,9	206,5	14,6	207,86	4,0
	177,7		241,2		216,5	
2	119,4	24,5	176,8	5,6	156,22	3,6
	95,9		186,8		161,8	
3	29,5	46,6	58	25,5	50,23	27,6
	55,2		77,9		69,4	

### 3.2. Результаты расчета оболочки бункера по схеме 2

Из анализа результатов (табл. 4) видно, что моменты, возникающие в нахлесточных стыках соединения царг, незначительно влияют на общее напряженное состояние оболочки.

Влияние момента непосредственно в нахлесточных соединениях царг (табл. 5) более ощутимо. Приведенные напряжения возрастают на 30% - 40%.

Еще большее влияние момента на величину напряжений в оболочке вблизи стыка (табл. 6). Приведенные напряжения возрастают на 50% - 60%. Следует отметить, что повышение напряжений носит локальный характер и при удалении от стыка быстро уменьшается. 3.3. Результаты расчета оболочки бункера по схеме 3.

Как отмечалось выше, толщина оболочки принята завышенной (12 мм). Для оценки напряженно-деформированного состояния

предлагается расчет оболочки толщиной 8 мм. Результаты сравнения расчетов оболочки толщиной 12 мм и толщиной 8 мм приведены в табл. 7. Анализ результатов общего напряженного состояния показывает, что с уменьшением толщины приведенные напряжения увеличились на 35%. При этом максимальное абсолютное значение кольцевых напряжений составляет порядка 380 кг/см<sup>2</sup>, приведенных 340 кг/см<sup>2</sup>, что далеко от несущей способности оболочки соответствующей предельным напряжениям 2040 кг/см<sup>2</sup> (расчетное сопротивление стали  $R_y=2550$  кг/см<sup>2</sup>, с учетом коэффициента условий работы  $\gamma_c = 0.8$ , как для воронка не защищена).

### 4. Общие выводы и рекомендации

На основании выполненного аналитического и численного расчета напряженно-деформированного состояния представленной конструкторской

Таблица 5. Сравнительная таблица напряжений в местах соединения царг по варианту 1 и варианту 2.

№ соединений царг (сверху вниз)	Меридиональные напряжения $s_3$ (кг/см <sup>2</sup> )		Кольцевые напряжения $s_1$ (кг/см <sup>2</sup> )		Приведенные напряжения $s$ (кг/см <sup>2</sup> )	
	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %
1	119,3	116,0	236,2	32,5	204,6	37,2
	55,2		350		325,9	
2	97	75,7	206,5	30,2	161,8	40,6
	55,2		295,7		272,33	
3	74,4	34,8	176,8	26,7	153,8	29,7
	55,2		241,25		218,9	
4	52	97,8	117,45	11,3	101,94	30,8
	-26,3		132,4		147,32	

Таблица 6. Сравнительная таблица напряжений в оболочке над стыками царг по варианту 1 и варианту 2

№ соединений царг (сверху вниз)	Меридиональные напряжения $s_3$ (кг/см <sup>2</sup> )		Кольцевые напряжения $s_1$ (кг/см <sup>2</sup> )		Приведенные напряжения $s$ (кг/см <sup>2</sup> )	
	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %	Вар1./Вар2	разница, %
1	186,7	27,9	384,5	47,4	333,03	48,1
	258,9		731,2		642,16	
2	141	35,3	265,8	53,2	230,3	53,6
	218		567,9		496,2	
3	97	29,0	206,5	49,0	178,94	49,8
	136,7		404,6		356,48	
4	74,4	22,4	117,45	60,3	102,91	60,6
	95,93		295,7		261,3	

документации для телескопической конструктивной формы металлической воронки цилиндрического бункера для хранения угля, а также анализа действующей на настоящее время нормативной документации /1,3...7/, а также статей, справочных и учебных пособий /2,8...19/, можно сделать следующие выводы:

4.1. Исследуемая конструктивная форма характеризуется следующими особенностями, негативно отражающимися на ее работе и эксплуатации:

4.1.1. Необоснованно завышенной толщиной воронки ( $t = 12$  мм), ведущей к:

а) недонапряжению основного сечения, которое по данным аналитического расчета в 9 раз меньше несущей способности, по данным численного расчета (с учетом дополнительных напряжений, вызванных моментами в стыках царг) в 3 раза меньше несущей способности, и соответственно аналогичному перерасходу материала;

б) поведению конструкции, не соответствующей общепринятой расчетной схеме воронки бункера, при котором ее стенки в отличие от планируемого безмоментного состояния начинают работать на изгиб, о чем свидетельствует установленная численным расчетом разность напряжений в срединном и внешних слоях в пределах 30%...60 %. Этот факт в совокупности с дополнительными напряжениями, которые могут возникнуть при наступлении ситуаций, не регламентированных действующими нормами расчета и проектирования (резким температурным перепадом, местным коррозионным износом и др.) может привести к возникновению напряжений, превышающих предел текучести стали, что является недопустимым для данного типа конструкций.

4.1.2. Наличием нахлесточных соединений, в местах выполнения которых:



Таблица 7. Сравнительная таблица расчета по варианту 2 для оболочки толщиной 12 мм и 8 мм.

№ точек.	Меридиональные напряжения $s_3$ (кг/см <sup>2</sup> )		Кольцевые напряжения $s_1$ (кг/см <sup>2</sup> )		Приведенные напряжения $s$ (кг/см <sup>2</sup> )	
	12 мм/8 мм	разница, %	12 мм/8 мм	разница, %	12 мм/8 мм	разница, %
1	177,7	33,7	241,2	35,7	216,5	35,3
	268,1		374,97		334,59	
2	95,9	27,3	186,8	36,0	161,8	36,1
	132,0		291,77		253,06	
3	55,2	13,6	77,9	37,9	69,4	36,1
	63,9		125,37		108,58	

а) характерна низкая надежность работы и высокая вероятность хрупкого разрушения углового сварного шва по сравнению с традиционными стыковыми швами, используемыми при изготовлении в заводских условиях рулонированных заготовок и работающих аналогично основному металлу конструкции. При этом снижение надежности обусловлено:

- возникновением в месте сварного шва сложного напряженного состояния, вызванного совместным действием кольцевых, меридиональных усилий и локального изгибающего момента;
- концентрацией напряжений в месте корня шва;
- расположением кольцевого сварного шва в одной плоскости, что при возникновении начальной трещины значительно увеличивает вероятность ее безостановочного развития по сравнению со швами, расположенными «в разбежку»;
- трудностями применения физических методов контроля качества сварного шва.

б) возникают дополнительные напряжения, обусловленные действием локального изгибающего момента, вызванного несоосным соединением листов, которые по данным численного расчета (табл. 5 – 6) вызывают нерасчетную добавку напряжений в пределах 30%...60%.

4.2. Используемая телескопическая конструктивная форма металлической воронки конусно-цилиндрического бункера может применяться в эксплуатации при соблюдении приведенных ниже рекомендаций. Для улучшения напряженно-деформированного состоя-

ния воронки бункера, обеспечения выполнения нормативных требований в процессе ее изготовления, монтажа, и нормальной работы на стадии эксплуатации, рекомендуется:

- 4.2.1. Снизить толщину вновь изготавливаемых конструкций до 8 мм, что позволит более рационально использовать несущую способность материала конструкции, облегчить и повысить качество сборо-сварочных монтажных операций на строительной площадке.

## Литература

1. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров/Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
2. Расчет стальных конструкций: Справ. пособие / Я.М. Лихтарников, Д.В. Ладыженский, В.М. Клыков. – К.: Будівельник, 1984. – 368 с.
3. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
4. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия/Минстрой Украины. – Киев: Сталь, 2006. – 60 с.
5. СНиП 2.03.11-85. Защита строительных конструкций от коррозии/ Госстрой СССР. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 48 с.
6. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции /Минстрой России. – М.: ГУП ЦПП, 1996. – 192 с.
7. СНиП III-18-75. Правила производства и приемки работ. – М.:Стройиздат, 1976. – 161с.
8. Справочник конструктора металлических конструкций/ В.Т. Васильченко, А.Н. Рутман, Е.П. Лукьяненко. – К.: Будівельник, 1990. – 312 с.
9. Металлические конструкции. В 3т. (Справочник проектировщика)/ Под общ. Ред. В.В. Кузнецова (ЦНИИпроектстальконструкция им. Н.П. Мельникова) – М.: Изд-во АСВ, 1998. – 576 с.
10. Металлические конструкции. Общий курс. Учебник для вузов/Под общ. Ред. Е.И. Беленя. – М.: Стройиздат, 1986. – 560 с.

11. Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. – М.: Изд-во литературы по строительству, 1970. – 488 с.
12. Стальные листовые конструкции / Е.Н. Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов. – М.: Изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 480 с.
13. Молодченко Г.А. Надежность сооружений силосного типа. – Харьков, 1981. – 52 с.
14. Зенков Р.Л., Гриневич Г.П., Исаев В.С. Бункерные устройства. – М.: Машиностроение, 1977. – 223 с.
15. Rasiulis, Konstantin, Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks, Journal of constructional steel research. ISSN 0143-974X. Oxford : Elsevier. Vol. 62, iss. 12, (2006), p. 1232-1237
16. Shell Structures, Theory and Applications (SSTA) : Proceedings of the 8th SSTA conference, Jurata, Poland, 12-14 October 2005
17. M.C.M. Bakker, T. Pekoz The finite element method for thin-walled members-basic principles // Thin-Walled Structures 41(2003). p. 179-189
18. Martin Pircher, Russell Bridge, The influence of circumferential weld-induced imperfections on the buckling of silos and tanks // Journal of Constructional Steel Research 57(2001). p.569-580
19. ISAAC Conference, 23-27 April, 2007, Tbilisi, Georgia Dedicated to the Centenary of I.Vekua, New mathematical models for thin-walled solid structures and projective methods for their solution.

**Мущанов Володимир Пилипович** д.т.н., професор – працює завідувачем кафедри «Теоретична і прикладна механіка», проректором з наукової роботи Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член міжнародної організації «Інститут цивільних інженерів» та міжнародної асоціації «Просторові конструкції», аудитор системи сертифікації УкрСЕПРО. Академік Академії будівництва України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Роменський Ігор Вікторович** к.т.н., доцент, працює доцентом кафедри «Металеві конструкції» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Член Української асоціації з металевих конструкцій. Наукові інтереси: удосконалення методів розрахунку та проектування просторових металевих конструкцій.

**Роменський Денис Ігорович** є аспірантом кафедри «Теоретична і прикладна механіка» Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Мущанов Владимир Филиппович** д.т.н., профессор - работает заведующим кафедрой «Теоретическая и прикладная механика», проректор по научной работе Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член международной организации «Институт гражданских инженеров» и международной организации «Пространственные конструкции», аудитор системы сертификации УкрСЕПРО. Академик Академии строительства Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Роменский Игорь Викторович** к.т.н., доцент - работает доцентом кафедры «Металлические конструкции» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Член Украинской ассоциации по металлическим конструкциям. Научные интересы: совершенствование методов расчета и проектирования пространственных металлических конструкций.

**Роменский Денис Игоревич** является аспирантом кафедры «Теоретическая и прикладная механика» Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Mushchanov Volodymyr Pylypovych** doctor of technical sciences, professor the Head of “the Theoretical and Applied Mechanics” chair, vice-principal on the scientific work of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of the of Civil Engineers, and organization International Association of “Spatial Structures”, an auditor of certification UKRSEPRO system. The academic of the Engineering Academy in Ukraine. His research interests include the reliability theory, calculation, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.

**Romensky Igor Viktorovich** the candidate of technical sciences, the assistant professor, “the Metal Structure” chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. He is a member of the Ukrainian Association of Metal Structures. His research interests include the perfection of calculation method and designing of spatial metal structures.

**Romensky Denis Igorovich** is a under-graduate “the Theoretical and Applied Mechanics”, chair of Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. His research interests include the calculation, designing and engineering diagnostics of spatial metal structures.