



ISSN 1814-5566 print

ISSN 1993-3517 online

**МЕТАЛЕВІ КОНСТРУКЦІЇ  
МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ КОНСТРУКЦИИ  
METAL CONSTRUCTIONS**

N1, TOM 16 (2010) 5-19

УДК 624.014

(10)-0204-1

## **ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ ТА РОЗРОБКА НОВОГО ПРОЕКТНОГО РІШЕННЯ ОПОРНОГО ВУЗЛА ЛІЙКИ ЦИЛІНДРИЧНОГО СИЛОСУ В УМОВАХ РЕКОНСТРУКЦІЇ**

**В. П. Мущанов, Ю. Ю. Калмиков, 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 8 січня 2010; прийнята 22 січня 2010*

**Анотація.** У статті розглянуті основні питання підвищення надійності вузла кріплення сталеві лійки до залізобетонної стінки силосу для зберігання вугілля. Розглянуто конструктивне рішення існуючого вузла кріплення за допомогою листових елементів з одного боку закріплених в бетоні, а з іншого боку приварених до лійки. Виконано кінцево-елементний аналіз існуючого конструктивного рішення вузла кріплення в програмних комплексах "Ліра-Windows" та "SCAD". При визначенні зусиль в стінці та елементах підвіски лійки враховано сумісну роботу силосу та прилеглих конструкцій суміжних силосів як для просторової пружної системи, так і з врахуванням нелінійної роботи бетону. Визначено, що в бетонній частині вузла кріплення лійки розтягуючі напруження в бетоні в зоні закріплення полосових елементів в 2...2,5 рази перевищують розрахункові опори бетону при розтязі. При цьому характерно утворення поверхонь відриву, що при недостатній кількості армування та присутності пошкоджень бетону, може призвести до руйнування вузла. Запропоновано конструктивне рішення вузла кріплення лійки до стінки силосу, що передбачає внутрішню опорну обойму з монолітного залізобетону, з наступним прикріпленням до неї опорних металевих конструкцій з полосовими елементами підвіски лійки. Для сприйняття горизонтальної складової зусиль в елементах підвіски лійки опорні металеві конструкції прикріплюють до стінки споруди. Розглянуто вплив форми елементів підвіски на значення та характер розподілу напружень по перерізу. Чисельні розрахунки для запропонованої схеми кріплення лійки показують достатню несучу здатність та забезпечення умов нормальної експлуатації опорного вузла.

**Ключові слова:** силос, сталеві лійка, вузол кріплення, аналітичні та чисельні методи розрахунку.

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ И РАЗРАБОТКА НОВОГО ПРОЕКТНОГО РЕШЕНИЯ ОПОРНОГО УЗЛА ВОРОНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО СИЛОСА В УСЛОВИЯХ РЕКОНСТРУКЦИИ**

**В. Ф. Мущанов, Ю. Ю. Калмыков, 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 8 января 2010; принята 22 января 2010*

**Аннотация.** В статье рассмотрены основные вопросы повышения надежности узла крепления стальной воронки к железобетонной стенке силоса для хранения угля. Рассмотрено конструктивное решение существующего узла крепления с помощью листовых элементов, с одной стороны заделанных в бетон, а с

противоположной стороны приваренных к воронке. Выполнен конечно-элементный анализ существующего конструктивного решения узла крепления в программных комплексах "Лира-Windows" и "SCAD". При определении усилий в стенке и элементах подвески воронки учтена совместная работа силоса с примыкающими конструкциями смежных силосов как для пространственной упругой системы, так и с учетом нелинейной работы бетона. Выявлено, что в бетонной части узла подвески воронки, растягивающие напряжения в бетоне, в зоне заделки полосовых элементов, в 2...2,5 раза превышают расчетное сопротивление бетона на растяжение. При этом характерно образование поверхности отрыва, что при недостаточном количестве армирования и наличии повреждений в бетоне может привести к разрушению узла. Предлагается конструктивное решение узла сопряжения воронки со стенкой силоса, предусматривающее устройство внутренней опорной обоймы из монолитного железобетона с последующей установкой на нее опорных металлоконструкций, включающих полосовые элементы подвески воронки. Для восприятия горизонтальной составляющей усилий в элементах подвески воронки опорные металлоконструкции крепятся к стенке сооружения. Рассмотрено влияние формы элементов подвески на величину и характер распределения напряжений по сечению. Численные расчеты для предлагаемой схемы крепления воронки показывают достаточную несущую способность и обеспечение условий нормальной эксплуатации опорного узла.

**Ключевые слова:** силос, стальная воронка, узел крепления, аналитические и численные методы расчета.

## RESEARCH OF THE BEARING CAPACITY AND DEVELOPMENT OF A NEW DESIGN DECISION OF THE SUPPORT POINT OF THE CYLLINDRICAL SILO FUNNEL IN RESONSTRCUTION

V. F. Mushchanov, J. J Kalmikov, I. V. Romensky, D. I. Romensky

*The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture,*

*2, Derzhavina Street, Makeevka, 86123, Ukraine.*

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

*Received 8 January 2010; accepted 22 January 2010*

**Abstract.** The article is devoted to the consideration of the basic questions of increasing the reliability of the attachment point of a steel funnel to a reinforced concrete wall of a silo for storing coal. There is considered a constructive decision of the existing attachment point with the help of plate components which are embedded in concrete on the one end and the opposite ends are welded on the funnel. There was carried the finite element analysis of the existing constructive decision of the attachment point in the software complexes "Lira-Windows" and "SCAD". In specifying efforts in the wall and in the components of the funnel hanger there was taken into account a joint operation of the silo and the adjoining structures of the adjacent silos both for the spatial elastic system and a nonlinear work of concrete. It was found out that in the concrete part of the funnel hanger node tensile stresses in concrete in the place of embedding band components are 2...2.5 times higher than the design resistance of concrete tension. The formation of a plane of break is significant here, but at a low reinforcement and damages in concrete it can cause the node failure. There is suggested a constructive decision of the conjunction node of the funnel and a silo wall which means an arrangement of the internal support casing made of a monolithic reinforced concrete with a further installation of support metal structures which comprise band components of the funnel hanger. For a horizontal component of the forces in the funnel hanger elements to be perceived, the support metal structures are attached to the structure wall. There is considered an influence of the form of the hanger components on the size and character of the distribution of stresses across the profile. The numerical calculations for a suggested funnel attachment scheme show a sufficient bearing capacity and assurance of conditions for a normal operation of the support node.

**Keywords:** silo, steel funnel, attachment point, analytical and numerical design methods.

## 1. Введение

Опыт эксплуатации сталежелезобетонных силосов показывает, что в результате уменьшения толщины оболочки (вследствие коррозионного и абразивного износа), а также различных конструктивных особенностей и технологических воздействий возможно разрушение узлов сопряжения стальной воронки с железобетонной цилиндрической стенкой [10, 13]. Это может привести и приводит к серьезным авариям, обусловленным явлением лавинообразного (прогрессирующего) [11, 12, 16] обрушения воронки вследствие разрушения элементов крепления. Имеется ряд конструктивных решений крепления стальной воронки к железобетонной цилиндрической части [5, 7, 8, 9, 14, 16-20]. Для крепления стальной воронки в силосах, используемых в углеподготовительном производстве ОАО "Авдеевский коксохимический завод", применены типовые технические решения, разработанные харьковским ПромстройНИИпроектом (чертежи марки АР арх. №СО-215247, и чертежи марки КЖ типового проекта 4-03-211). Основными элементами крепления являются полосовые стальные элементы ("языки"), с одной стороны непосредственно заделанные в железобетонную стенку силоса, а с другой стороны приваренные к воронке (рис. 1). При эксплуатации силосов многократно выявлялись

повреждения элементов узла крепления воронки в виде обрыва "языков", разрушения бетона в месте заделки. Поэтому возникла необходимость для узла крепления:

- выполнить обоснованную расчетами оценку его несущей способности;
- разработать альтернативные технические решения по его устройству с учетом повреждений в бетоне стенки силоса на участке установки полосовых элементов крепления воронки ("языков").

Основной целью данной статьи является анализ несущей способности типового узла крепления воронки и разработка рекомендаций по повышению его эксплуатационной надежности на основе нового конструктивного решения в условиях реконструкции.

## 2. Основная часть

Для решения поставленных задач при проведении исследований выполнены:

- 1) анализ существующего конструктивного решения узла крепления.
- 2) анализ и определение действующих нагрузок на конструктивные элементы силоса;
- 3) конечно-элементный анализ существующего конструктивного решения по устройству узла крепления стальной воронки к железобетонной стенке силоса;

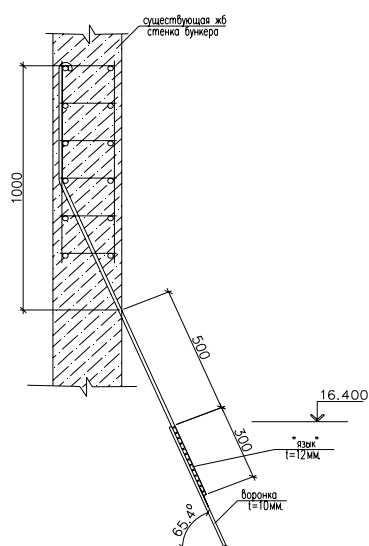


Рис. 1. Схема узла крепление воронки к стенке силоса с помощью листовых накладок (языков).

- 4) разработка альтернативных технических решений по устройству узла крепления воронки, обеспечивающих его надежную и безопасную эксплуатацию;
- 5) расчеты по оценке напряжений и деформаций, возникающих в элементах узла подвески воронки для предлагаемой схемы его устройства.

### 2.1. Анализ существующего конструктивного решения узла крепления

Силосный корпус разделен деформационными швами на 4 блока — по 8 железобетонных емкостей (банок) внутренним диаметром — 12 м (Рис. 2). Толщина стенок составляет 300 мм от отметки 0,0 м до отметки +16,4 м, и 200 мм — от отметки 16,4 м до отметки +31,85 м. Воронки — конусообразные, стальные, с одним выпускным отверстием. Крепление воронок к стенкам силосов выполнено путем приварки их

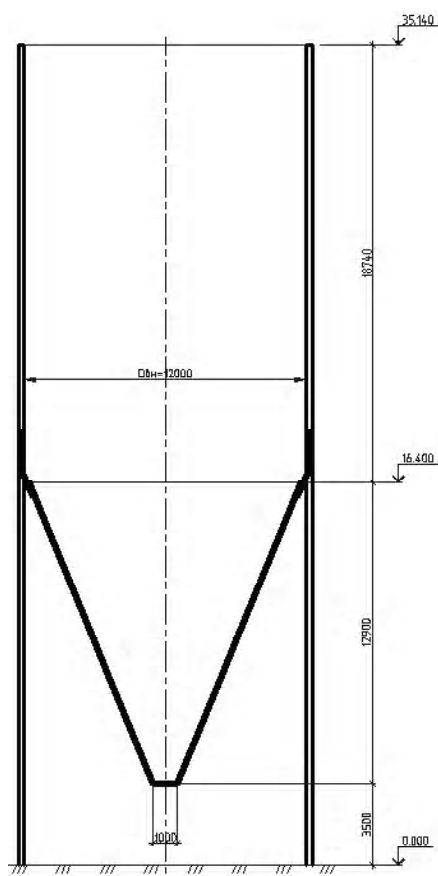


Рис. 2. Геометрическая схема силоса.

верхних царг к закладным деталям из полосовой стали толщиной 12...16 мм, расположенным по периметру силосов с шагом 300...350 мм. В рассматриваемом варианте хранимым сыпучим в силосной банке является уголь.

Анализ рассмотренной технической документации позволяет сделать вывод, что принятая в исходном проектном решении схема крепления стальной воронки к стенке силоса требует надежной анкеровки полосовых элементов подвески воронки в бетоне стенки, а также обязательное обеспечение их бокового сцепления с бетоном по всей поверхности. Это может быть достигнуто корректным армированием узла подвески воронки, качественным выполнением бетонных работ и отсутствием повреждений бетона стенки. Наличие поврежденных стенок силоса на участке установки "языков", согласно результатам инженерного обследования, в виде отслоений бетона коржами на глубину 80 мм...200 мм с обнажением и коррозионным износом до 30% сечения арматуры, а также в виде участков с крупнопористым рыхлым бетоном снижает надежность анкеровки "языков". Указанные повреждения обуславливают образование зазоров ("люфтов") в зонах

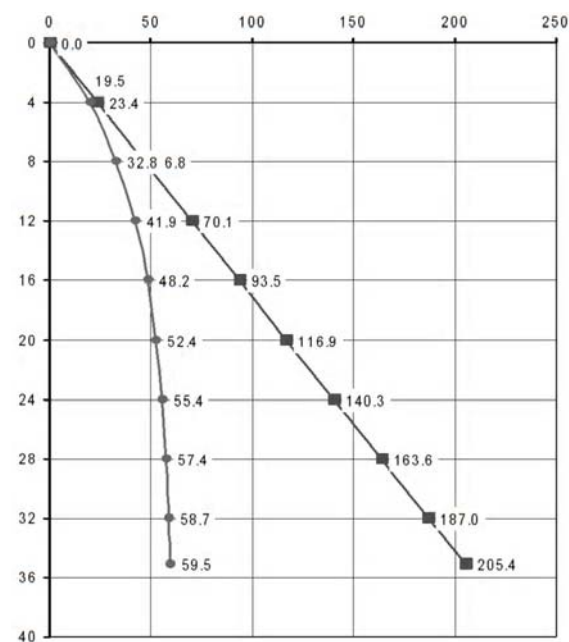


Рис. 3. Величины распределения бокового давления на стенку по высоте силоса с учетом и без учета трения сыпучего о стенку.

заделки "языков" в стенку и, как следствие, неравномерное распределение в них растягивающих усилий с угрозой вырыва из тела бетона отдельных полосовых элементов. Выявленные в ходе инженерного обследования [13] особенности действительной работы "языков" также могут обуславливать перенапряжение отдельных полосовых элементов с угрозой их обрыва и неравномерное распределение усилий в воронке силоса. Следует отметить, что техническое решение по устройству узла подвески воронки, примененное в рассматриваемых силосах закрытого склада угля, не встречались в их практике оценки технического состояния конструкций емкостных сооружений, а также в общеизвестных нормативных и справочных литературных источниках [5, 7, 9, 14-20].

## 2.2. Определение нагрузок, действующих на стенки и воронку силоса

Основные нагрузки, принятые в расчетах:

а) Собственный вес конструкций стенок силосов и воронок.

Для упрощения расчетной схемы собственный вес конструкций надсилосного этажа, снеговая и ветровая нагрузки как не оказывающие значимого влияния на распределение усилий в закладных полосовых элементах ("языках") в расчетах, выполненных в рамках данной работы, не учитывались.

б) Давление хранимого сыпучего на стенки и воронку силосов.

Определение величин бокового давления на стенку и воронку силоса выполнялось в соответствии с указаниями, представленными в [1, 8, 9], с учетом трения сыпучего материала о стенки силоса (Рис.3) по формуле Янсена-Кенена:

$$p^i = \gamma_f \frac{\gamma_n r}{f} \times (1 - e^{-\frac{y}{r} f k}),$$

где  $\gamma_c$  — удельный вес хранимого сыпучего, 12,0 кН/м<sup>3</sup>;  $\gamma_f = 1,2$  — коэффициент надежности по нагрузке;  $r = D/4 = 3,0$  м — гидравлический радиус поперечного сечения силоса;  $f = 0,5$  — коэффициент трения сыпучего о стенки силоса;  $y$  — координата высоты столба хранимого сыпучего;  $k = \text{tg}^2 \alpha (45^\circ - \varphi/2) = 0,41$  — коэффициент бокового трения сыпучего,  $\varphi$  — угол внутреннего трения — 25°.

## 2.3. Конечно-элементный анализ существующего конструктивного решения по устройству узла крепления стальной воронки к железобетонной стенке силоса.

Анализ расчетных усилий, напряжений и перемещений в конструктивных элементах узла сопряжения воронки со стенками силоса выполнялся методом конечных элементов [6, 21-23], реализованном в программных комплексах "Лира-Windows" версии 9.4 и "SCAD" версии 7.39. Расчеты по определению параметров напряженно-деформированного состояния конструкций силоса включали:

- определение напряжений в полосовых элементах подвески ("языках") для существующей и предлагаемой конфигурации "языков" при действии нагрузок от собственного веса воронки и давления сыпучего;
- определение усилий в стенке и полосовых элементах подвески воронки с учетом совместной работы силоса с примыкающими конструкциями смежных силосных банок как для пространственной системы;
- анализ НДС существующей схемы узла подвески стальной воронки с использованием результатов расчетов усилий в полосовых элементах подвески воронки как упругой системы, а также с учетом нелинейной работы бетона и повреждений бетона в стенке в соответствии с результатами инженерных обследований.

При **определении напряжений в полосовых элементах подвески** рассматриваются элементы крепления прямоугольной формы, шириной 120 мм, толщиной 12 мм. (нагрузки соответствуют меридиональным и кольцевым напряжениям в воронке в месте крепления "языков"). Расчет выполнен с помощью проектно-вычислительного комплекса SCAD. Характеристики расчетной схемы воронки: количество узлов — 7397; количество конечных элементов — 7350. Значения характерных напряжений приведены на рис. 4.

Результаты расчета воронки силоса в месте примыкания элемента крепления позволяют сделать вывод, что в месте начала шва, прикрепляющего "язык" к воронке, напряжения имеют значительную величину, составляющую 7158 кг/см<sup>2</sup>. Полученное превышение значений напряжений в указанных точках, прежде всего,

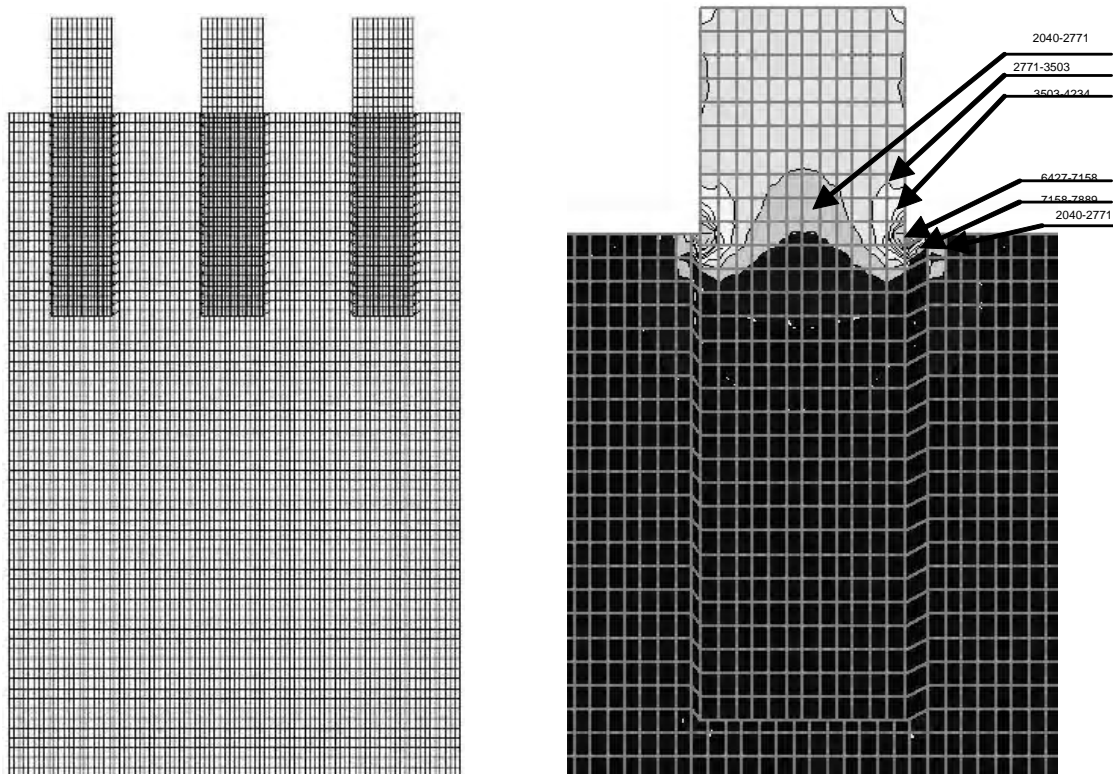
объясняется выполнением расчета в упругой постановке, связанного с возможностями комплекса SCAD, но свидетельствует о значительном перенапряжении материала в указанных точках. Величина напряжения быстро затухает при удалении от названной точки, что свидетельствует о высоком градиенте напряжения, при котором увеличивается риск хрупкого разрушения металла "языка".

При определении усилий в стенке и полосовых элементах подвески воронки с учетом совместной работы силоса с примыкающими конструкциями смежных силосных банок как для пространственной упругой системы, а также с учетом нелинейной работы бетона расчетная схема силосного корпуса представлена пространственно-оболочечной моделью вычислительного комплекса "Лира" версии 9.4, в состав которой были включены:

- конечные элементы-пластины типов КЭ-41 и КЭ-44, моделирующие соответственно плоские элементы стенки и воронки;

- универсальные стержни типов КЭ-10, моделирующие полосовые элементы подвески воронки.

На 1-м этапе расчетов усилия в стенках силоса определены как для упругого материала с учетом поврежденных участков стенки в узле подвески воронки. Соединение всех типов конечных элементов между собой осуществлялось в их узлах. Размеры конечных элементов (КЭ) пластин составляли 300 мм х300 мм, сечение стержневых элементов подвески в расчетах было принято равным 120х12 мм. Заделка полосовых элементов подвески воронки в стенку принималась в соответствии с рабочими чертежами равным 0,8 м. Основные физико-механические характеристики для задания жесткостей КЭ были приняты для бетона класса В20 и составляли – расчетная прочность бетона на сжатие  $R_b = 11,5$  МПа, на растяжение  $R_{bt} = 0,9$  МПа; модуль упругости бетона  $E_b = 30000$  МПа. Предельные значения деформаций бетона на сжатие и на растяжение составляли соответственно



**Рис. 4.** Расчетная схема участка воронки и значения характерных напряжений  $\sigma$  (кг/см<sup>2</sup>) в элементе крепления воронки.

$\varepsilon_{bu} = 2,0 \times 10^{-3}$  и  $\varepsilon_{btu} = 2,0 \times 10^{-4}$ . Для "языков" расчетное сопротивление стали принято равным  $R_s = 240,0$  МПа. Условия сопряжения силосных банок с фундаментной плитой упрощенно моделировались путем запрещения перемещений и поворотов в узлах стенок. Отмеченное упрощение расчетной схемы обусловлено пренебрежимо малым его влиянием на НДС узла подвески воронки. Результатами расчета являлись перемещения узлов КЭ, продольные силы и изгибающие моменты в пластинчатых КЭ стенок силоса, а также стержневых КЭ.

*Анализ результатов расчетов показывает:*

1. Продольные усилия в полосовых элементах подвески, с учетом стесненного деформирования его стенок вследствие совместной работы с примыкающими силосами, распределены неравномерно по периметру их установки и составляют 330,5...364,6 кН. При этом большие значения характерны для "языков", установленных по длине участка сопряжения смежных силосов. Усилие в полосовых элементах подвески воронки в отдельно стоящем силосе распределены равномерно и составляют 343,5 кН. Наличие смежных опорожненных силосов не приводит к изменению усилий в элементах подвески воронки.
2. Полученные усилия в полосовых элементах не превышают предельных усилий, способных восприниматься сечением установленных "языков" 120 мм x 12 мм, при условии применения для их изготовления стали С345 [3] и обеспеченной надежности сварных швов.
3. Повреждения в стенке на участке устройства элементов подвески воронки, обуславливающие нарушение сцепления, проскальзывание и, как следствие, нарушение совместной работы "языков" с бетоном стенки, приводят к перенапряжению полосовых элементов подвески на неповрежденных участках вследствие увеличения податливости участков стенки с повреждениями бетона деструктивного характера и нарушением совместной работы "языков" с бетоном. Так, по результатам расчетов усилия в полосовых элементах, расположенных в неповрежденном бетоне рядом с участками стенок силоса с пониженным модулем упругости,

увеличились на величину до 81,8 кН по сравнению с усилиями в "языках", полученных для расчетных схем, где повреждения бетона не учитывались. Наибольшие величины действующих в полосовых элементах подвески усилий составили от 421,6 кН до 438,4 кН,

4. Изгибающие моменты в кольцевом и радиальном направлениях оболочки силоса на участке установки "языков" носят знакопеременный характер распределения (Рис. 5). При этом участок с наибольшими усилиями в железобетонной стенке расположен в уровне узла примыкания воронки (отметка +14,5 м...+19,5 м). Принятая конструктивная схема устройства подвески воронки силоса к стенке обуславливает возникновение растяжения внутренних волокон стенки силоса на участке установки "языков", вследствие действия изгибающих моментов в вертикальных и горизонтальных сечениях стенки. Величины изгибающих моментов в вертикальных сечениях стенки ( $M_x$ ) изменяются в диапазоне от -64,9 кНм (в зонах сопряжения между силосами) до +32,7 кНм. Величины изгибающих моментов в горизонтальных сечениях ( $M_y$ ) — от -24,8 кНм до +101,9 кНм. Величины изгибающих моментов являются значимыми для расчета прочности нормальных сечений стенки и возможно не были учтены при проектировании силоса.

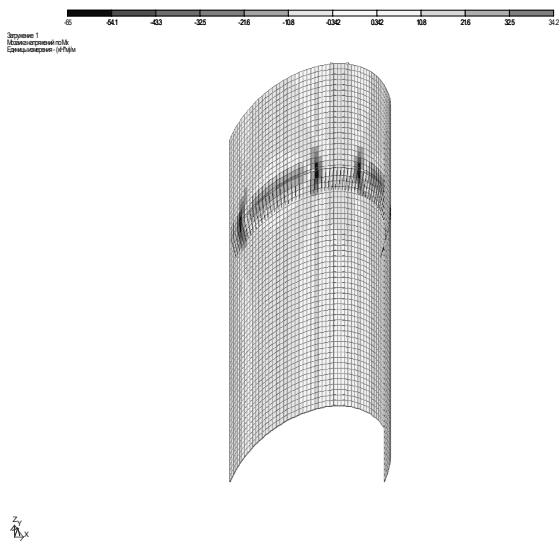
Для уточнения НДС в узле подвески стальной воронки к стенке были выполнены расчеты с учетом физической нелинейности участка стенки силоса, расположенного в зоне действия максимальных изгибающих моментов (в уровне отм. +15,2 м...+17,4 м), определенных на предыдущем этапе, с использованием расчетной модели, составленной из объемных конечных элементов.

Принятое в расчетах продольное усилие в полосовых элементах составляло 365 кН, равномерно распределенная нагрузка от собственного веса вышележащих конструкций и дополнительного вертикального усилия за счет трения сыпучего — 983,8 кН/м<sup>2</sup>.

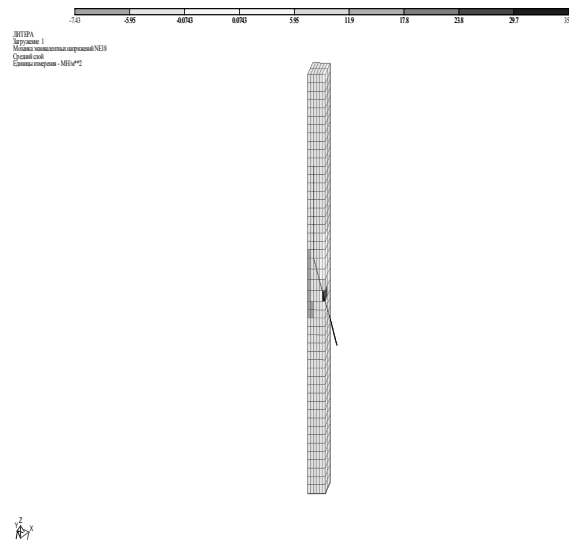
Конечно-элементная модель узла подвески воронки представлена на рис 6. Размеры объемного восьмиузлового конечного элемента задачи

составляли соответственно  $50\text{мм} \times 60\text{мм} \times 90\text{мм}$ . Жесткости физически нелинейных КЭ железобетонной части определялись процентами армирования КЭ вдоль локальных осей, принятыми в соответствии с рабочими чертежами марки КЖ проекта на строительство силосного корпуса типового проекта 4-03-211, разработанного харьковским Промстройниип-

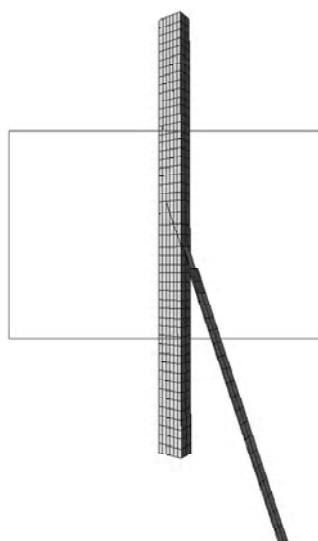
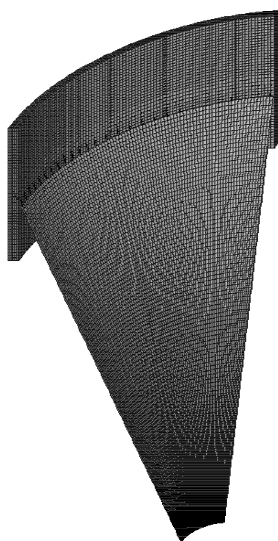
роем. Предельные значения деформаций бетона на сжатие и на растяжение составляли соответственно  $\varepsilon_{bu} = 2,0 \times 10^{-3}$  и  $\varepsilon_{btu} = 2,0 \times 10^{-4}$ . Для арматуры класса А-II расчетное сопротивление растяжению и модуль упругости принимались равными соответственно  $R_s = 295,0$  МПа,  $E_s = 2100000$  МПа. Законы деформирования нелинейных КЭ соответствовали



**Рис. 5.** Результаты 1-го этапа расчетов: изгибающие моменты в вертикальных сечениях ( $M_x$ ) стенок силоса на участке, расположенном от отм.0,000 м до отм.+19,200.



**Рис. 7.** Результаты 2-го этапа расчетов: эквивалентные напряжения ( $N_{\text{ЭКВ}}$ ) в стенках силоса.



**Рис. 6.** Расчетные схемы ПК "Lira-9.4" фрагмента стенки и воронки силоса для 2-го этапа расчетов.



закону деформирования Г.А. Гениева для железобетона. Моделирование повреждений бетона в узле крепления воронки выполнялось путем снижения в 5...10 раз модуля упругости конечных элементов, расположенных на поврежденных участках. Для решения данной задачи основная нагрузка разбивалась на 5 шагов с коэффициентами нагрузки по шагам равными 0.2.

Результаты определения НДС в узле подвески стальной воронки к стенке силоса представлены на (Рис. 7). Анализ результатов расчетов упругой и нелинейной расчетных схем свидетельствуют о следующем:

1. НДС в бетонной части узла подвески воронки характеризуется неравномерным распределением сжимающих и растягивающих напряжений. Растягивающие напряжения в бетоне в зоне заделки полосовых элементов подвески воронки по результатам решения упругой задачи в 2,0...2,5 раза превышают расчетное сопротивление бетона на растяжение. Учет нелинейного деформирования бетона, его работы с трещинами обуславливает перераспределение напряжений в сече-

нии и разрушение бетонных элементов по длине "языков" от растяжения. При этом величины напряжений в кольцевой арматуре достигают 80...85% от своих предельных значений.

2. Для существующей схемы устройства узла подвески воронки характерно образование поверхности отрыва, что при недостаточном количестве армирования и наличии повреждений в бетоне может привести к разрушению узла.
3. Усилия в полосовых элементах подвески воронки достигают максимальных значений на начальном участке заделки длиной 400...450 мм.
4. Повреждения бетона в узле подвески воронки обуславливают разрушение сжатых бетонных элементов, а также достижение предела текучести в вертикальной арматуре.
5. Несущая способность узла сопряжения воронки со стенкой в значительной мере зависит от степени поврежденности бетона и при моделировании в расчетных схемах сквозных повреждений считается необеспеченной.

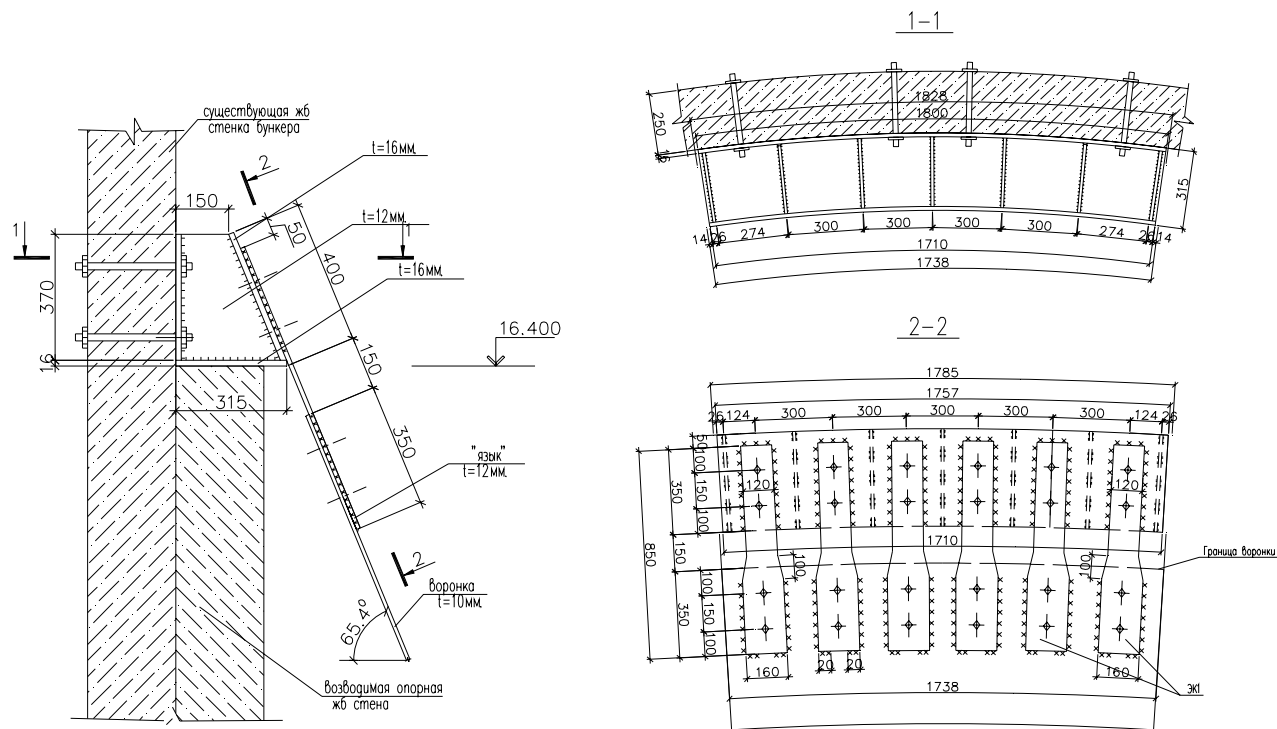
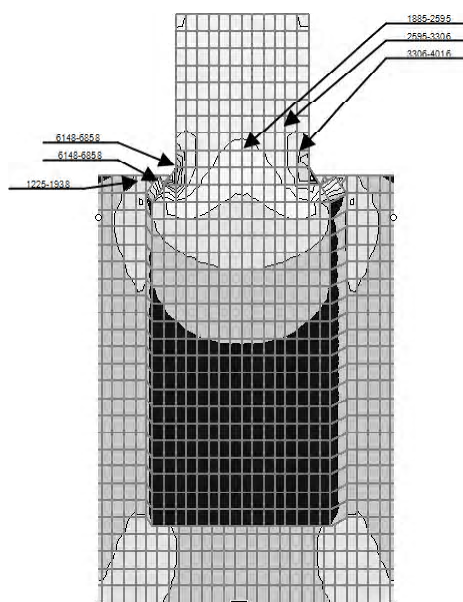


Рис. 8. Предлагаемая схема узла крепление воронки к стенке силоса.

#### 2.4. Разработка альтернативного решения узла крепления воронки к стенке силоса

Предлагаемое решение узла сопряжения воронки со стенкой силоса предусматривает устройство внутренней опорной обоймы из монолитного железобетона с последующей установкой на нее опорных металлоконструкций, включающих полосовые элементы подвески воронки. С целью восприятия горизонтальной составляющей усилий в элементах подвески воронки опорные металлоконструкции в количестве 22 шт крепятся к стенке сооружения (рис. 8). На участках сопряжения смежных силосов крепление опорных металлоконструкций к стенке выполняется при помощи саморазжимных анкерных болтов системы "Hilti" диаметром 20 мм в количестве 8 штук на один опорный элемент. При этом величина анкеровки болтов должна быть не менее 300 мм. На остальных участках крепление опорных металлоконструкций к стенке выполняется при помощи установки закладных деталей, в состав которых включены торцевые пластины, устанавливаемые со стороны наружной поверхности стенки силоса, а также стяжные болты диаметром 20 мм.



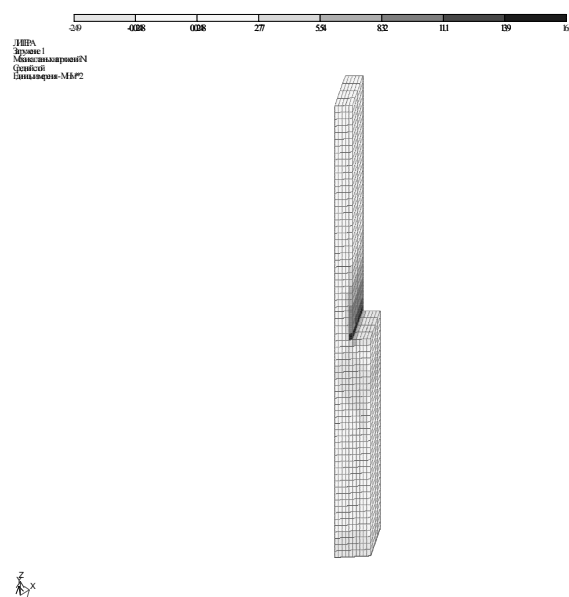
**Рис. 9.** Значения характерных напряжений  $\sigma$  (кг/см<sub>2</sub>) в элементе крепления воронки.

Для равномерной передачи вертикального давления металлоконструкциями подвески воронки по обрезу опорной обоймы необходимо выполнить выравнивающую подливку из безусадочных полимерцементных составов. Высота подливки должна составлять не менее 100 мм. Надежная работа закладных деталей крепления опорных металлоконструкций предполагает обязательный ремонт участков стенки силоса, расположенных в уровне отм. +14,8 м...17,6 м, с повреждениями бетона деструктивного характера путем их перебетонирования.

#### 2.5. Анализ НДС предлагаемой схемы подвески воронки к стенке силоса как для упругой системы и с учетом физической нелинейности деформирования бетона

Для оценки надежности разработанного узла сопряжения воронки со стенкой силоса в рамках настоящей работы выполнен расчетный анализ НДС его конструктивных элементов — полосовых элементов подвески воронки, напряжений и перемещений в бетоне.

**Элемент крепления с прямым скосом в месте примыкания к воронке, шириной — 120 мм**



**Рис. 10.** Результаты 3-го этапа расчетов: эквивалентные напряжения ( $N_{\text{экв}}$ ) в стенках силоса (предлагаемая конструктивная схема).

в узкой части и 160 мм в месте крепления к воронке, толщиной 12 мм (рис.9).

Анализ влияния формы элемента крепления позволяет сделать следующие выводы:

1. В месте начала шва, прикрепляющего "язык" к воронке, максимальные напряжения имеют величину, составляющую 6858 кг/см<sup>2</sup>, что на 4,5% меньше напряжения в элементе крепления прямоугольной формы.
2. Элементы крепления прямоугольные в плане, размером сечения 120 на 12 мм имеют высокий уровень напряжений по сечению (около 2800 кг/см<sup>2</sup>). В местах начала сварных швов выявлены локальные напряжения, в 2-3 раза превышающие средние значения по сечению. Величина локальных напряжений быстро затухает, что свидетельствует о высоком градиенте напряжения, при котором увеличивается риск хрупкого разрушения металла "языка". Элементы крепления с прямолинейным скосом (отношение 1 к 5) имеют меньшие значения локальных напряжений и более плавный характер их распределения по сечению.

Для анализа напряженно-деформированного состояния бетона в месте узла крепления усилие в полосовых элементах подвески раскладывалось на горизонтальную и вертикальную составляющие, приложенные к поверхности верхнего обреза опорной обоймы и к концевым участкам анкерных болтов крепления опорных металлоконструкций, соответственно, в виде равномерно распределенных нагрузок и сосредоточенных сил. Величина горизонтальной составляющей усилия в полосовых элементах на один анкерный болт было определено с учетом трения опорных металлоконструкций по поверхности внутренней обоймы и составило 110,3 кН. Вертикальное давление по поверхности внутренней обоймы определялось путем деления суммарной вертикальной составляющей нормального усилия в полосовом элементе (356,4кН x 132 шт = 47044,8 кН) на площадь опорной поверхности внутренней обоймы (1,814 м<sup>2</sup>).

Результаты определения усилий в узле подвески стальной воронки к стенке силоса для предлагаемого конструктивного решения представлены на (Рис. 10).

Анализ результатов расчетов предлагаемого узла подвески показывает:

1. Величины нормальных растягивающих напряжений в конечных элементах узла на 7...32% меньше величин напряжений, вычисленных для существующей схемы его устройства. Величины сжимающих напряжений максимальных значений достигают в верхнем участке опорной железобетонной обоймы высотой до 600 мм и превышают прочность бетона на сжатие, что может обуславливать разрушение опорного участка воронки вследствие смятия бетона. Необходимое увеличение несущей способности опорного участка внутренней железобетонной обоймы высотой 600 мм достигается путем реализации конструктивных мероприятий, предусматривающих установку сеток косвенного армирования в соответствии с требованиями норм [2, 4].
2. Наибольшие величины растягивающих напряжений, превышающих расчетное сопротивление бетона на растяжение, выявлены в КЭ, расположенных в зонах установки анкерных болтов. Высокие уровни растягивающих напряжений характерны для упругих расчетных схем, не учитывающих совместную работу бетона и арматуры. Вычисленное предельное усилие разрушения бетона вследствие отрыва для одного анкерного болта на 48,4% больше, чем продольное усилие, действующее в одном болтовом элементе (136,2 кН.).

### 3. Общие выводы

На основании выполненных численных расчетов напряженно-деформированного состояния стенки и металлической воронки силоса для хранения угля, можно сделать следующие выводы:

1. Элементы крепления ("языки") размером сечения 120 на 12 мм имеют высокий уровень средних напряжений по сечению (около 2800 кг/см<sup>2</sup>), величины которых значительно возрастают вследствие концентраторов напряжения, обусловленных формой сопряжения языка с воронкой и наличием сварных швов. В местах начала сварных швов выявлены локальные напряжения, в 2-3 раза превышающие средние значения по сечению. Величина локальных напряжений

- быстро затухает, что свидетельствует о высоком градиенте напряжения, при котором увеличивается риск хрупкого разрушения основного металла "языка" и наплавленного металла сварного шва. Увеличивают риск хрупкого разрушения и ударные воздействия на воронку и элементы крепления от падающего груза. Необходимо отметить и коррозионный износ элементов крепления и сварных швов из-за влажности хранимого материала (угля) и агрессивной среды эксплуатации, характерной для коксохимического производства.
2. Элемент крепления с прямолинейным скосом (отношение 1 к 5) имеет на 5...17% меньшие значения локальных напряжений в месте начала сварных швов и более плавный характер распределения напряжений по сечению по сравнению с элементами прямоугольными в плане и рекомендуются к применению с одновременным использованием сталей класса С345.
  3. Анализ конструктивного решения узла подвески воронки к стенке силоса показывает, что принятая в исходном проектом решении схема крепления стальной воронки к стенке силоса требует обеспечения надежной анкеровки полосовых элементов подвески воронки ("языков") в бетоне стенки. Численные расчеты НДС для пространственно-оболочечной модели сооружения, а также участка стенки в зоне расположения полосовых элементов подвески свидетельствуют о неравномерном распределении в них продольных усилий, а также о сложном, неоднородном напряженном состоянии в бетоне стенки и наличии растягивающих напряжений, превышающих расчетное сопротивление бетона в 2...2,5 раза.
  4. Результаты расчетов стенок силоса с учетом повреждений стенки на участке устройства подвески воронки свидетельствуют об увеличении продольных усилий в полосовых элементах подвески вследствие повышенной податливости стенки на участках с повреждениями. Усилия в "языках" достигают величин, превышающих предельно допустимых для принятых сечений и марки используемой для их изготовления стали.
  5. Предлагаемое конструктивное решение частично устраняет выявленные недостатки существующей схемы подвески воронки в части снижения величин растягивающих напряжений в бетоне, устранения площадки отрыва, а также передачи вертикальной составляющей продольного усилия в конструкциях подвески воронки на предварительно возведенную опорную стенку из монолитного железобетона. Горизонтальная составляющая продольного усилия в элементах подвески в предлагаемом конструктивном решении способна полностью восприниматься существующим сечением стенки.
  6. Численные расчеты НДС стенки силоса для предлагаемой схемы устройства подвески воронки показывают достаточность несущей способности и обеспечение условий нормальной эксплуатации стенки на участке устройства опорного узла.

#### Литература

1. ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия/ Минстрой Украины. — Киев: Сталь, 2006. - 60 с.
2. СНиП 2.03.01-84\*. Бетонные и железобетонные конструкции. — М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1985. — 79с.
3. СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции/Госстрой СССР. — М.:ЦИТП Госстроя СССР, 1991. — 96 с.
4. СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий. — М.: Стройиздат, 1986. — 56с.
5. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Железобетонные конструкции, — М.: Стройиздат, 1968. — 175с.
6. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. — К.: издательство "Факт", 2005. — 344 с.
7. Листовые металлические конструкции / Е.Н.-Лессиг, А.Ф. Лилеев, А.Г. Соколов.—М.: Изд-во литературы по строительству, 1970.— 488 с.
8. Латышев Б.В. Практические методы расчета железобетонных силосных корпусов. — Л.: Стройиздат. — 2-е изд. доп. и перераб. — 1985. — 192с, с илл.
9. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройиниипроект. — М.: Стройиздат, 1983. — 200 с.
10. Молодченко Г.А. Надежность сооружений силосного типа. — Харьков, 1981. — 52 с.
11. Перельмутер А.В. Прогрессирующее обрушение и методология проектирования конструкций.// Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений, 2004, №6.

12. Еремеев П.Г. Обеспечение безопасности большепролетных сооружений от лавинообразного (прогрессирующего) обрушения при аварийных воздействиях// Современное промышленное и гражданское строительство. — 2008. г—Том 4, №3. — С.129-134.
13. Мущанов В.Ф., Роменский И.В., Роменский Д.И. Исследование влияния конструктивных особенностей на несущую способность конической оболочки стальной воронки бункера концентрата угля// Современное промышленное и гражданское строительство. — 2008. — Том 4, № 3.— С. 135-144.
14. Мущанов В.Ф., Роменский И.В., Роменский Д.И. Исследование влияния конструктивных особенностей опорного узла на несущую способность конической оболочки стальной воронки силоса/ Сборник научных трудов. "Современные строительные конструкции из металла и древесины.-Одесская государственная академия строительства и архитектуры. — Одесса, ООО "Внешрекламсервис", 2009. г — С.34-39.
15. Банников Д.О. Руководство по проектированию вертикальных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. — Днепропетровск: Новая идеология, 2009. — 56с.
16. Банников Д.О. Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования. — Днепропетровск: Монолит, 2009. — 186с.
17. Reisner W. Bins and bunkers for handling bulk materials. Practical design and techniques. — McGraw-Hill, 2000. — 324p.
18. Safarian S.S. Design and Construction of Silos and Bunkers/ S.S. Safarian, E.C. Harris. — McGraw-Hill, 2000. — 212p.
19. Edwin H. Gaylond. Design of steel Bins for storage of Bulk Solids/ H. Gaylond Edwin, Gaylond Jr., Charles N. — McGraw-Hill, 2000. — 278p.
20. Design of steel structures. Part 4: Tanks, silos and pipelines: prEN 1993-4. Eurocode 3. — CEN, 2001.
21. 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.
22. M.C.M. Bakker, T. Pekoz The finite element method for thin-walled members-basic principles // Thin-Walled Structures 41(2003). p. 179-189.
23. 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.

**Мущанов Володимир Пилипович** — завідувач 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", академік Української академії наук, Академії будівництва України, член-кореспондент Академії архітектури України. Наукові інтереси: теорія надійності, розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Калмыков Юрій Юрійович** — к.т.н., доцент кафедри "Залізобетонні конструкції" Донбаської національної академії будівництва і архітектури, головний інженер СНВЦ "Спеціальні і висотні інженерні споруди". Наукові інтереси: удосконалення методів оцінки напружено-деформованого стану елементів залізобетонних конструкцій будівель та споруд, що працюють в умовах складних та температурно-вологісних впливів.

**Роменський Ігор Вікторович** — доцент 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** — аспірант кафедри "Теоретична і прикладна механіка" Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Наукові інтереси: розрахунок, проектування та технічна діагностика просторових металевих конструкцій.

**Мушанов Владимир Филиппович** — заведующий 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", Академик Украинской академии наук, Академии строительства Украины, член-корреспондент Академии архитектуры Украины. Научные интересы: теория надежности, расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Калмыков Юрий Юрьевич** — доцент кафедры "Железобетонные конструкции", гл. инженер СНПЦ "Специальные и высотные инженерные сооружения". Научные интересы: усовершенствование методов оценки напряженно-деформированного состояния элементов железобетонных конструкций зданий и сооружений, работающих в условиях сложных силовых и температурно-влажностных воздействий.

**Роменский Игорь Викторович** — доцент 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** — аспирант кафедры "Теоретическая и прикладная механика" Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. Научные интересы: расчет, проектирование и техническая диагностика пространственных металлических конструкций.

**Mushchanov Vladimir Filippovich** — Head of the department "Theoretical and Applied Mechanics", deputy-rector in science of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the International Association "Institute of Civil Engineers" and the International Organization "Spatial Structures", an academician of the Ukrainian Academy of Sciences, the Academy of Civil Engineering of Ukraine, a correspondence member of the Academy of Architecture of Ukraine. Scientific interests: the theory of reliability, design, designing and technical diagnostics of spatial metallic structures.

**Kalmykov Yuri Yur'yevich** — an associate professor of the department "Reinforced Structures", the chief engineer of the SNPC "Special and High-Rise Engineering Structures". Scientific interests: improvement of the evaluation technique of the mode of deformation of the components of reinforced concrete structures and buildings operating in complex force and temperature-moisture effects.

**Romensky Igor Viktorovich** — an associate professor of the department "Metal Structures" of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. A member of the Ukrainian Association of Metal Structures. Scientific interests: improvement of the design methods and designing of spatial metallic structures.

**Romensky Denis Igorevich** — a postgraduate of the department "Theoretical and Applied Mechanics of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: design, designing, and technical diagnostics of spatial metallic structures.