

**В. В. КАЧУРЕНКО  
Д. О. БАННИКОВ**

**КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ  
СТАЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ  
ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

Днепропетровск  
2016

УДК 624.954  
ББК 38.728  
Б-23

*Рекомендовано к печати решением Ученого совета  
Днепропетровского национального университета  
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна  
(протокол № 10 от 15.06. 2015 г.).*

**Рецензенты:**

**Петренко В. Д.**, доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедры туннелей, оснований и фундаментов  
(Днепропетровский национальный университет железнодорожного  
транспорта имени академика В. Лазаряна)

**Зеленцов Д. Г.**, доктор технических наук, профессор,  
зав. кафедры информационных систем  
(ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет)

**Качуренко В.В., Банников Д.О.** Конструктивные решения стальных емкостей для сыпучих материалов: Монография. – Днепропетровск: Новая идеология, 2016. – 168 с.

В монографии приводятся результаты новейших авторских исследований, посвященных вопросам конструирования и совершенствования конструктивно-го решения стальных емкостных сооружений для сыпучих материалов – бункеров и силосов.

Монография предназначена для инженерно-технических и научных работников, связанных с проектированием емкостных конструкций для сыпучих материалов. Может быть полезна студентам, аспирантам, преподавателям строительных специальностей вузов, а также всем, интересующимся вопросами проектирования и создания тонкостенных пространственных конструкций.

УДК 624.954  
ББК 38.728

ISBN .....

© В. В. Качуренко, 2016  
© Д. О. Банников, 2016

# Содержание

<b>Введение</b> .....	5
<b>Раздел 1. Емкости для сыпучих материалов</b> .....	8
1.1. Современные емкостные конструкции .....	8
1.1.1. Сферы применения .....	8
1.1.2. Основные разновидности .....	9
1.2. Традиционные подходы к созданию стальных емкостей .....	18
1.2.1. Нормативно-справочная база .....	19
1.2.2. Существующая концепция конструирования .....	20
1.2.2.1. Бункерная емкость .....	22
1.2.2.2. Силосная емкость .....	24
1.3. Отказы и аварии стальных емкостей .....	30
1.3.1. Ошибки, связанные с проектированием .....	32
1.3.2. Ошибки, связанные с изготовлением и монтажом .....	39
1.3.3. Ошибки, связанные с эксплуатацией .....	43
<b>Раздел 2. Направления совершенствования конструкции стальных емкостей</b> .....	46
2.1. Замечания о классификации .....	46
2.2. Недостатки существующего конструктивного решения .....	57
2.3. Пути исследований .....	64
<b>Раздел 3. Оптимизация формы конструкции стальных емкостей</b> .....	66
3.1. Существующие рекомендации .....	66
3.2. Экономичность внешней формы .....	68
3.2.1. Эффективность круглой в плане формы .....	69
3.2.2. Эффективность низкой по высоте формы .....	72
3.3. Модель оптимизации геометрических размеров .....	77
3.3.1. Геометрическая модель .....	77
3.3.2. Математическая модель .....	79
3.4. Частные случаи применения полученного решения .....	86
3.4.1. Случай двухступенчатой емкости .....	86
3.4.2. Случай трехступенчатой емкости .....	96
3.4.3. Случай парной многоступенчатой емкости .....	98
3.5. Сферы применимости полученных решений .....	99
<b>Раздел 4. Выбор конструктивного решения стальных емкостей</b> .....	101
4.1. Емкость с плоскими стенками .....	101
4.1.1. Панельная конструктивная схема .....	101
4.1.2. Узловые решения .....	105

4.2. Емкость с круглыми стенками .....	109
4.2.1. Новый гофрированный профиль .....	109
4.2.2. Узловое крепление .....	112
<b>Раздел 5. Теоретические исследования работы стальных емкостей .....</b>	<b>114</b>
5.1. Существующие аналитические подходы .....	114
5.2. Численные исследования .....	115
5.2.1. Работа отдельной панели .....	116
5.2.2. Работа емкостной конструкции .....	122
5.3. Особенности моделирования гофрированных профилей .....	130
5.3.1. Вычислительный эксперимент .....	130
5.3.2. Модельный эксперимент .....	138
5.4. Частные теоретические задачи .....	143
5.4.1. Определение степени совместности работы обшивки с ребром жесткости .....	143
5.4.2. Оптимизация формы ребра жесткости .....	148
5.4.3. Определение наиболее напряженной зоны конструкции .....	152
<b>Заключение .....</b>	<b>157</b>
<b>Список использованной литературы .....</b>	<b>158</b>

# Введение

Большое количество современных технологических процессов связано с переработкой различных сыпучих материалов. В первую очередь, это относится к ряду добывающих отраслей промышленности, таких как угольная или горнорудная, где возникает необходимость первичной сортировки и хранения значительных объемов добытых полезных ископаемых. Их доставка к месту последующей переработки предполагает активное использование транспортной сети. Химическая и металлургическая промышленности, промышленность строительных материалов не только потребляют доставляемые уголь, руду, щебень, песок, камень, торф, но и сами производят огромный спектр новых сыпучих материалов – агломерат, кокс, штейн, цемент, известь, шлак, концентраты, удобрения и т. д. Особо следует отметить агропромышленный комплекс, в котором практически вся производимая продукция, так или иначе, представляет собой сыпучие вещества.

Такая широкая сфера распространения сыпучих материалов приводит к необходимости использовать множество разнообразных машин, механизмов, устройств и сооружений, помогающих быстрее и проще выполнить их переработку. При этом одной из неотъемлемых технологических операций является хранение материала. Для этого оказывается нерациональным использовать обычные склады, поскольку существенно усложняется последующая отгрузка сыпучего материала, а потери могут составлять значительную его часть. Поэтому применяют специальные сооружения, представляющие собой емкости. В настоящее время они являются отдельным классом строительных конструкций, имеющим свои собственные законы проектирования и эксплуатации.

Следует отметить, что работа стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов достаточно подробно исследовалась большим количеством отечественных и зарубежных специалистов. Среди них встречаются и довольно известные имена – А. Уайт, Р. Хиггинс,

Ф. Мориссон, С. Лурье, З. Б. Канторович, Н. Н. Аистов, К. М. Хуберян, Б. С. Шестов, Я. М. Хавин, Е. Н. Лессиг, А. П. Ваганов и др. Однако, несмотря на это, к настоящему времени стальные емкостные конструкции остаются одним из наименее изученных видов строительных конструкций, не имеющих общепризнанной теории конструирования.

Вернее сказать, рекомендации по расчету и конструированию емкостей для сыпучих материалов, конечно, имеются и приводятся в изобилии в нормативной и справочной литературе. Однако, это именно рекомендации, но никак не единый целостный подход, основанный на концептуальных научных исследованиях. Так из первого раздела данной монографии, посвященного обзору современного состояния вопроса проектирования емкостных конструкций для сыпучих материалов, даже при беглом просмотре явственно следует его некая кусочность и даже внутренняя противоречивость. Ряд расчетных и конструктивных параметров при этом принимаются полуинтуитивно, а другая часть – лишь на основе сложившихся традиций. Достаточно отметить, что существенных изменений применяемая в настоящее время концепция не претерпевала вот уже практически сотню лет и никак не может считаться отвечающей современному уровню накопленных знаний и развития науки в целом.

В качестве доказательства этого в монографии приводится обзор и анализ возникающих в практике аварийных ситуаций, из которых выплывает довольно неоптимистическое заключение – создаваемые емкостные конструкции не отличаются ни особой надежностью и долговечностью, ни экономичностью.

Разбираясь в причинах такой ситуации, авторы пришли к заключению о необходимости модернизировать, а то и просто заново разработать ряд аспектов теории конструирования вертикальных жестких стальных емкостных конструкций. И выполнено это должно быть на сугубо научной основе, с использованием современных методов и средств их использования.

Придерживаясь такой точки изложения, в монографии рассмотрен довольно широкий круг явлений, сопровождающих процесс конструирования стальных емкостей, начиная от выбора геометрической формы будущего сооружения и заканчивая вопросами возведения и эксплуатации (они затронуты лишь в той мере, в которой должны быть учтены на стадии проектирования). При этом все приводимые

концепции подчинены единой идее – совершенствованию формы конструкции.

По своей сути данная монография является концентрированным отражением основных результатов многолетних исследований профессора Банникова Д.О. в данной области. Ее основу составила ранее изданная в Украине монография – Банников Д.О. Вертикальные жесткие стальные емкости: современные концепции формообразования, Днепропетровск, 2009, 186 с. – которая была переработана и дополнена результатами исследований аспирантки Качуренко В.В. Таким образом работа включает новейшие данные в области конструирования стальных емкостей для сыпучих материалов.

# **Раздел 1. Емкости для сыпучих материалов**

## **1.1. Современные емкостные конструкции**

### **1.1.1. Сферы применения**

Одним из современных видов строительных конструкций, предназначенных для кратковременного или длительного хранения разнообразных видов сыпучих материалов, являются емкостные конструкции. Вместе с другими видами сооружений, которые используются для этого, такими, как например, закрома или склады [1], емкостные сооружения позволяют накапливать определенные объемы сыпучего материала, которые спустя некоторое время, достигающее иногда десятков лет, могут быть использованы по своему назначению. Однако емкостные конструкции являются наиболее удобными и распространенным видом таких сооружений для относительно кратковременного накопления сыпучих материалов, поскольку по своим конструктивным особенностям позволяют оперативно и качественно проводить самотечечную выгрузку хранимых сыпучих материалов в необходимом количестве.

Как подчеркнуто в работе [2], основная технологическая идея применения емкостных строительных конструкций заключается в необходимости компенсировать неравномерность поступления сыпучего материала от предыдущего звена технологического процесса к последующему, с некоторым разносом во времени. При этом все это время материал постепенно накапливается внутри сооружения и передается на следующий этап, также, определенными порциями, объем которых может не совпадать с объемом загрузок. Во многих случаях именно отличие в размере этих объемов и определяет необходимость устройства специального вспомогательного аккумулирующего звена в виде емкостного сооружения.

В целом, емкостные конструкции для сыпучих материалов применяются практически во всех современных отраслях промышленности, сельского хозяйства и транспорта. Это и металлургические предприятия [3, 4], шахты [5 – 7] и предприятия добывающей отрасли [8 – 11], заводы строительной индустрии [12] и химические предприятия [13], энергетическая отрасль [14] и сельское хозяйство [15, 16]. Количество используемых сыпучих материалов при этом достигает нескольких сотен.

География использования емкостных конструкций, также, достаточно широка. Такие сооружения применяются и в закрытых помещениях, и на открытом воздухе. При этом эксплуатация может проходить как при обычных условиях, так и при высоких [17] или низких температурах [18].

Таким образом, распространенность емкостных конструкций для сыпучих материалов в настоящее время является достаточно значительной, и указать отрасль, в которой такие конструкции не применялись бы, оказывается чрезвычайно сложно. Поэтому проблема исследования их действительной работы и повышения эксплуатационных качеств была и остается достаточно важной и актуальной задачей.

### **1.1.2. Основные разновидности**

В настоящее время емкостные строительные конструкции для сыпучих материалов изготавливают, преимущественно, из двух видов строительных материалов – железобетона и стали. Значительно реже встречаются деревянные емкости, которые практически уже не строятся [19].

Железобетонные емкости активно создавались и исследовались в середине прошлого столетия [20 – 22], когда очень остро стоял вопрос относительно снижения расхода стали, ведь они требуют в 2 – 4 раза ее меньшее количество [23]. Тем не менее, стальные емкости оказались более просты в изготовлении, поэтому их используют гораздо чаще.

В целом все емкостные строительные конструкции для сыпучих материалов по своему пространственному положению могут быть разделены на два вида – горизонтальные и вертикальные. В первом случае конструкции имеют внешнюю форму, вытянутую по горизонтали, во втором случае – по вертикали.

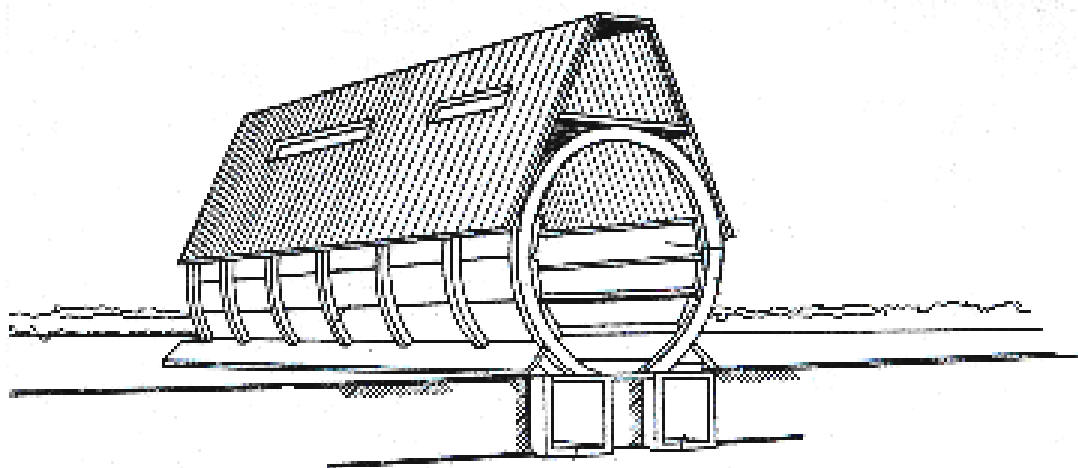
По характеру работы можно выделить, также, жесткие и гибкие конструкции. Первые практически не изменяют свою внешнюю форму при загрузке-выгрузке сыпучих материалов, вторые – заметно меняют очертания своих стенок. Горизонтальные емкостные конструкции проектируют как жесткого, так и гибкого типов; вертикальные – традиционно выполняются по жесткой конструктивной схеме, хотя в последнее время начали появляться и гибкие разновидности.

Внешний вид современных жестких горизонтальных емкостных конструкций для сыпучих материалов приведен на рис. 1.1. Они представляют собой загрузочно-разгрузочную галерею в виде открытой по бокам оболочки. Галерея может выполняться сквозного поперечного сечения (рис. 1.1, а) или иметь дополнительные продольные перегородки, разделяющие ее на отдельные сообщающиеся камеры (рис. 1.1, б), что упрощает ее изготовление и монтаж. Часто такие горизонтальные емкостные сооружения неверно называют складами или просто хранилищами.

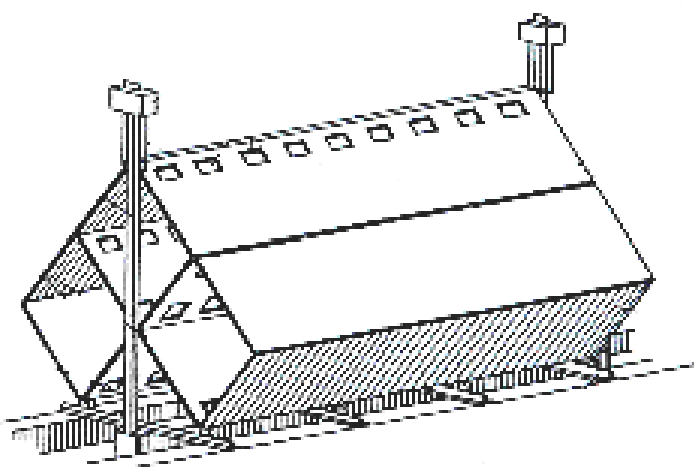
Жесткий горизонтальный конструктивный тип емкостных сооружений для сыпучих материалов распространен не достаточно широко, что обусловлено образованием при разгрузке значительных так называемых «мертвых зон», из которых сыпучий материал не выгружается ввиду своей способности образовывать насыпи с некоторым углом наклона. Используемый объем емкости при этом оказывается менее ее геометрического объема на значительную величину, особенно при не совсем корректном учете свойств сыпучего материала.

Основным способом борьбы с этим недостатком является устройство разгрузочных отверстий как можно чаще в горизонтальном направлении. Однако при этом, как показывает накопленный опыт эксплуатации и обслуживания таких конструкций, они оказываются недостаточно жесткими и со временем их пространственная конфигурация искажается. Особенно это проявляется при частом и неравномерном заполнении сооружений.

Внешний вид горизонтальных гибких емкостных конструкций для сыпучих материалов приведен на рис. 1.2. Для стенок такой емкости применяются очень тонкие стальные листы, в которых подобно висячим или мембранным конструкциям используется их работа только на растяжение. Таким образом, форма оболочки емкости при ее работе может меняться подобно гибкой нити.



а)

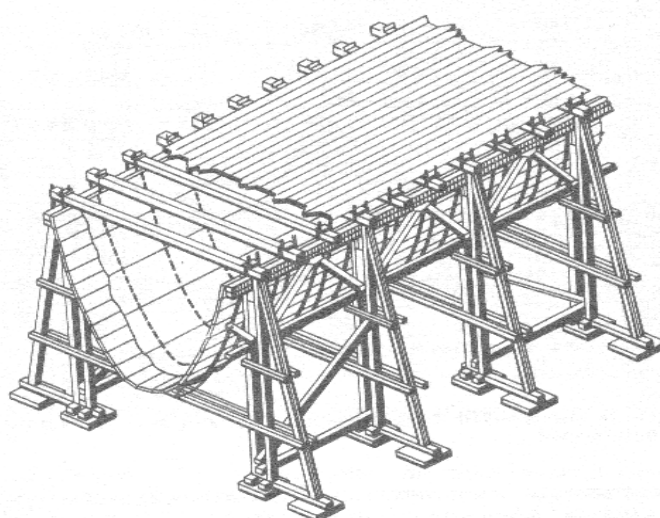
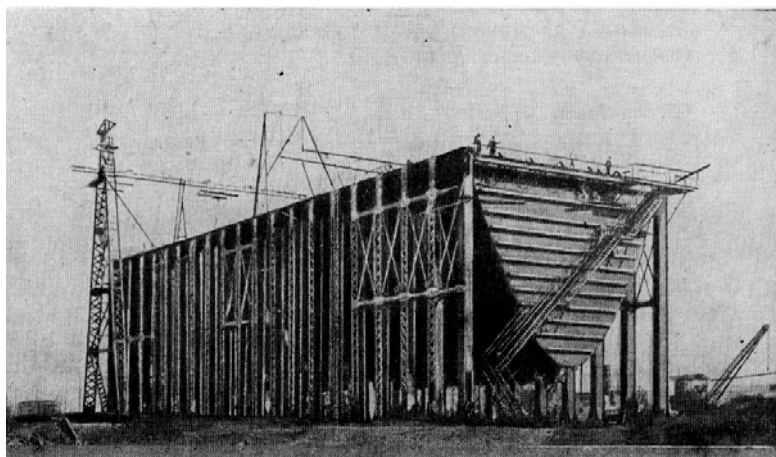


б)

*Рис. 1.1. Жесткие горизонтальные емкостные конструкции для сыпучих материалов:  
а) со сквозной галереей, б) с камерной галереей*

Такие емкости получили гораздо большее распространение, чем жесткие разновидности, из-за своей более высокой экономичности, хотя также не всегда позволяют произвести полную выгрузку хранимого сыпучего материала. Кроме этого, изменчивость положения разгрузочного устройства создает определенные проблемы при эксплуатации таких конструкций и может приводить к усталостным повреждениям.

Размеры горизонтальных емкостных конструкций в обоих случаях могут достигать 24 – 30 м в поперечном направлении при практически неограниченной длине, поэтому для хранения больших объемов сыпучего материала (свыше 1000 м<sup>3</sup>) они оказываются достаточно эффективными.

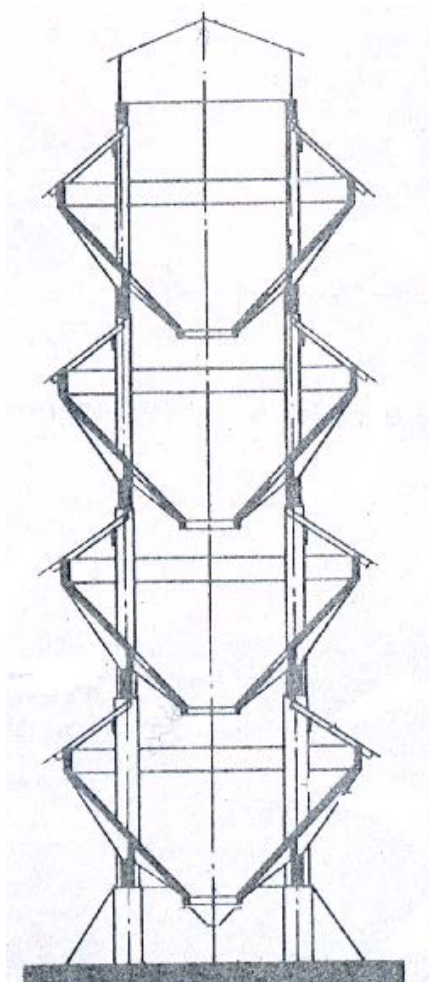


*Рис. 1.2. Гибкие горизонтальные емкостные конструкции для сыпучих материалов*

Теоретическому исследованию работы горизонтальных гибких стальных емкостных конструкций посвящены ряд работ известных ученых [24 – 26]. К сожалению, какие-либо теоретические работы, посвященные горизонтальным жестким стальным емкостным конструкциям для сыпучих материалов авторам настоящей монографии не известны.

Для хранения сравнительно небольших объемов сыпучих материалов (примерно до  $1000 \text{ м}^3$ ) гораздо более эффективными оказываются емкостные конструкции вертикального типа. Сам процесс их загрузки и выгрузки намного проще по сравнению с горизонтальными, поскольку нет необходимости в устройстве большепролетных загрузочно-разгрузочных кранов или транспортеров.

Вертикальные емкостные конструкции представляют собой вытянутые по вертикали сосуды, состоящие из произвольного количества соединенных между собой своеобразных частей (выражаясь языком ракетостроителей – ступеней). Чаще всего количество этих частей равно двум, хотя встречаются и многоступенчатые сооружения как, например, изображенное на рис. 1.3.



*Рис. 1.3. Вертикальная многоступенчатая емкостная конструкция для сыпучих материалов*

Каждая из частей (ступеней) емкостной конструкции имеет относительно несложную геометрическую форму в виде цилиндра, многогранной призмы, усеченного конуса или усеченной многогранной пирамиды. Во многих случаях поперечным сечением этих фигур является правильный многоугольник или круг, а стенки боковых граней образуют правильные пространственные фигуры. Получающаяся при этом емкость оказывается симметричной.

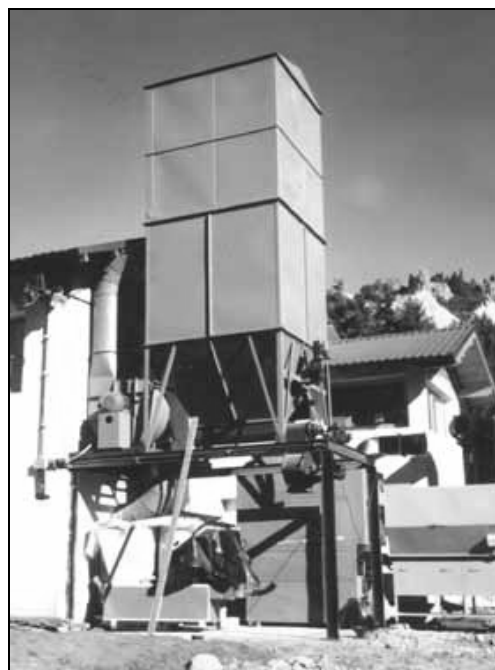
Разнообразие возможных сочетаний геометрических форм с различными размерами конструкции порождает и разнообразие видов вертикальных емкостей. Чаще других встречается сочетание конуса и цилиндра. Получающиеся при этом конструкции так и называют конусно-цилиндрическими емкостями. Их внешний вид приведен на рис. 1.4.



*Рис. 1.4. Конусно-цилиндрические вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов*

Немного реже, но также достаточно часто в практике встречается сочетание пирамиды и призмы. Получающиеся при этом конструкции называют пирамидально-призматическими емкостями. Их внешний вид приведен на рис. 1.5.

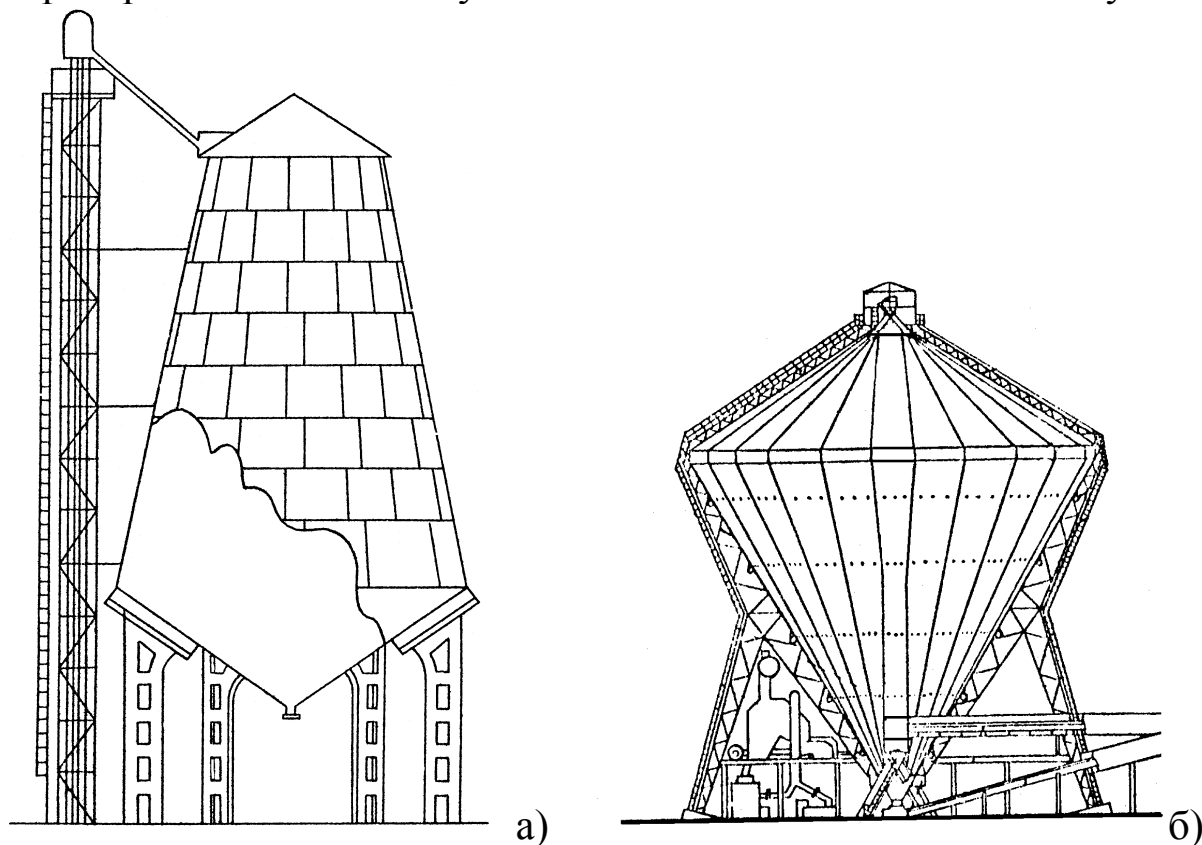
Не часто, но в практике встречаются, также, сочетания двух пирамид или конусов. Специального названия емкости таких форм не получили. Придерживаясь принятого выше способа их можно было бы назвать «конусно-конусными» или «пирамидально-пирамидальными» – рис. 1.6.



*Рис. 1.5. Пирамидально-призматические вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов*

Помимо симметричных емкостных конструкций, о которых шла речь до сих пор, встречаются, также, и несимметричные. В практике их стараются избегать, поскольку они отличаются повышенной материалоемкостью, а также пониженной надежностью, и используются исключительно в тех случаях, когда невозможно спроектировать симметричную емкость.

Кроме этого возможны сочетания фигур, поперечные сечения которых абсолютно различны (например, круг и многоугольник и т.д.). Применяются такие емкости значительно реже указанных выше типов из-за сложности организации узла соединения двух ступеней между собой. Внешний вид подобных емкостных конструкций приведен на рис. 1.7. Безусловно, они не получили в практике широкого распространения и используются только в исключительных случаях.

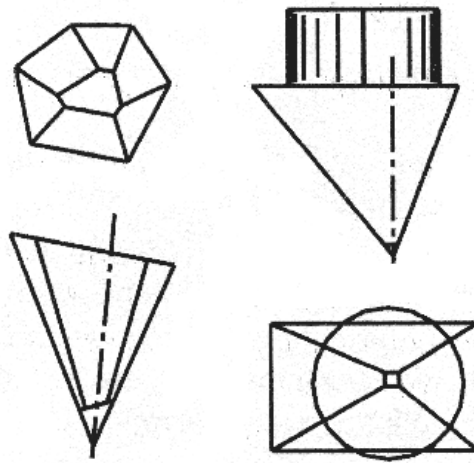


*Рис. 1.6. Вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов:*

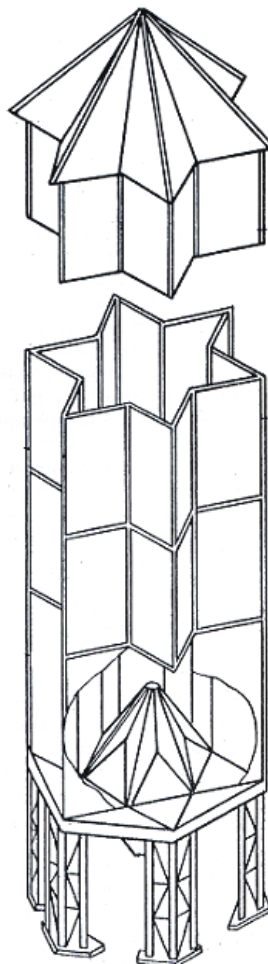
*а) «конусно-конусного» типа,*

*б) «пирамидально-пирамидального» типа*

Встречаются, также, и совсем экзотические формы вертикальных емкостных конструкций, имеющие поперечное сечение, например, в виде звездочки или иной геометрической фигуры. Внешний вид такой емкости приведен на рис. 1.8. Безусловно, специального самостоятельного названия такие формы, также, не имеют.



*Рис. 1.7. Несимметричные вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов*



*Рис. 1.8. «Звездчатая» вертикальная емкостная конструкция для сыпучих материалов*

Насколько разнообразной является внешняя форма емкостных сооружений, настолько же разнообразными являются и их размеры. Встречаются как емкости с размером стороны в плане (диаметром) 0,5 – 0,6 м, которые преимущественно используются в химической и строительной отраслях, так и емкости с размером стороны (диаметром) 30 м и больше, которые преимущественно используются для хранения сельскохозяйственной продукции. При этом высота сооружения может колебаться от 0,5 – 1 м до 35 – 40 м. Объем емкостных конструкций, соответственно, может превышать 2 500 м<sup>3</sup>.

Таким образом, из приведенных данных становится понятным, что современные емкостные конструкции для сыпучих материалов отличаются чрезвычайно высоким разнообразием как во внешних формах, так и в геометрических размерах. Тем не менее, их принципиальное функциональное устройство остается примерно однотипным.

Во всех случаях нижняя часть емкости имеет наклонные стенки. Она обычно называется воронкой и предназначена для беспрепятственной и безопасной выгрузки материала, осуществляемой через выпускное отверстие внизу воронки, называемого, также, точкой. Все вышележащие части емкости, какой бы геометрической формы они ни были, предназначены, собственно, для формирования того емкостного запаса сыпучего материала, который хранится в сооружении.

## **1.2. Традиционные подходы к созданию стальных емкостей**

Традиционные подходы, широко используемые в настоящее время в Украине для проектирования и создания стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, закреплены в официальной нормативно-справочной базе. Она создавалась и развивалась в течение II половины XX века и к настоящему моменту представляет собой достаточно разветвленную сеть нормативных документов и справочных материалов.

### 1.2.1. Нормативно-справочная база

До недавнего времени основным действующим в Украине нормативным документом, который регламентирует в том числе и вопросы проектирования стальных емкостных строительных конструкций, являлся СНиП II-23-81\* [27]. Раздел 8 “Расчет листовых конструкций” этого документа содержал общие рекомендации касательно оценки прочности и устойчивости оболочек вращения, являющихся фрагментами различных видов листовых конструкций. Однако, там были приведены лишь критериальные условия относительно уровня допустимых напряжений в таких оболочках, а вопросы их определения оставались вне поля зрения. Имеющиеся рекомендации относительно конструирования стальных емкостных конструкций приводились в разделе 13 “Дополнительные требования по проектированию производственных зданий и сооружений” и в целом, также, носили общий характер.

Указанные два раздела без принципиальных изменений вошли в состав недавно введенных в действие новых государственных норм Украины по проектированию стальных строительных конструкций – ДБН В.2.6-163:2010 [28], соответственно, как раздел 1.10 и подраздел 1.13.8.

Все вопросы, связанные с классификацией емкостных конструкций для сыпучих материалов, определением нагрузок и усилий в их элементах приведены в специализированном нормативном документе ДБН В.2.2-8-98 [29], который заменил в Украине прежние нормы – СНиП 2.10.05-85 [30]. По своему содержанию оба эти нормативные документы достаточно тождественны, и в концептуальном отношении новые нормы полностью дублируют принципиальные основы старого документа.

Дополнительно в другом действующем нормативном документе СНиП 2.09.03-85 [31] приведены еще ряд конструктивных рекомендаций, направленных, преимущественно, на организацию защиты внутренних поверхностей емкостей от негативного влияния сыпучей среды во время эксплуатации (абразивный снос, действие повышенных температур, и т. д.).

Следует упомянуть еще один действующий в Украине нормативный документ – СНиП 2.11.01-85\* [32], посвященный в основном проектированию зданий, а не сооружений для хранения сыпучих ма-

териалов. Однако среди приводимых рекомендаций встречаются ряд положений, связанных с особенностями расположения и устройства вспомогательных объектов.

Рекомендации всех перечисленных выше действующих нормативных документов не противоречат между собой, а скорее, напротив, дополняют друг друга. Таким образом, в нормах оказывается сформированным и закреплённым единый подход к расчету и конструированию стальных емкостных сооружений, принятый и используемый в настоящее время в практике проектирования инженерами.

Относительно имеющейся технической литературы, которая конкретизирует и дополняет ряд положений нормативных документов, авторы считают необходимым отметить следующие источники.

Методика и особенности проектирования стальных емкостных конструкций достаточно детально и подробно изложена в довольно распространенных конструкторских справочниках [33 – 37]. Для бункерных емкостей в концентрированном виде она приведена в рекомендациях [38, 39]. Они не имеют статуса нормативных документов, однако являются достаточно удобными в применении и используются инженерами-проектировщиками.

Отдельно следует отметить, что с 2014 г. в Украине приняты и введены в действие ряд стандартов, являющихся переведенными копиями Европейских нормативных документов [40, 41]. Однако их практическое использование в настоящее время только начато и в связи с этим пока нет возможности оценить их эффективность в отечественных условиях. Из наиболее известных и употребляемых зарубежных справочных изданий следует отметить работы [42, 43].

### **1.2.2. Существующая концепция конструирования**

В целом отечественная концепция конструирования стальных емкостей для сыпучих материалов в своем окончательном виде сформировалась примерно к 60-70-м годам прошлого столетия. Идеологически она сориентирована на рассмотрение двух разновидностей таких сооружений – бункеров и силосов. При этом для каждого из этих видов конструкций принципиально отличается как теория задания давления от хранимого сыпучего материала, так и расчетные подходы и соответственно используемые конструктивные решения.

В обоих случаях концепция конструирования предполагает рассмотрение единой пространственной конструкции, коей является емкостное сооружение, как ансамбля простых составных элементов (ребро жесткости, междуреберная пластина, обвязочная балка), рассчитываемых далее по упрощенным расчетным схемам. Таким образом, теряется единство в представлении о работе сооружения под нагрузкой, а ряд принципиальных моментов при этом просто ускользают из виду.

Именно поэтому рекомендации относительно выбора внешней формы емкостной конструкции просто отсутствуют. По большей части в практике избирается простая геометрическая форма типа конуса, цилиндра, призмы или пирамиды, в зависимости от опыта инженера и традиций той или иной школы.

Рекомендации относительно выбора геометрических размеров сооружения сводятся к назначению угла наклона поверхности нижней части емкости, через которую осуществляется выпуск сыпучего материала, (на  $5 - 10^\circ$  больше от угла естественного откоса сыпучего материала) и назначение ширины выпускного отверстия (в 3 – 5 раз больше от размера максимального куска сыпучего материала). При этом другие размеры конструкций рекомендуется увязывать с объемно-планировочными решениями зданий и сооружений, в которых они располагаются.

Расчет конструктивных элементов емкостных сооружений рекомендуется выполнять с учетом постоянных нагрузок от собственного веса элементов самой конструкции и перекрытия над емкостью. Основной технологической нагрузкой считается статическое давление от сыпучего материала на стенки емкости.

Для силосных емкостей это давление рекомендуется определять согласно теории Г. А. Янсена с учетом трения между сыпучим материалом и стенками конструкции. Поскольку накоплен опыт эксплуатации свидетельствует о недостаточной точности этой теории, то используется система специальных эмпирических поправочных коэффициентов, которые назначаются дифференцировано для разных зон по высоте емкости и на которые нужно множить полученные значения давления сыпучего материала. Величина этих коэффициентов достигает значения 2,0. К тому же, динамические эффекты, которые могут сопровождать процесс выгрузки сыпучего материала из емкости, учитываются приложением специальных дополнительных локального и полосового давлений. Интересно, что место их приложения норма-

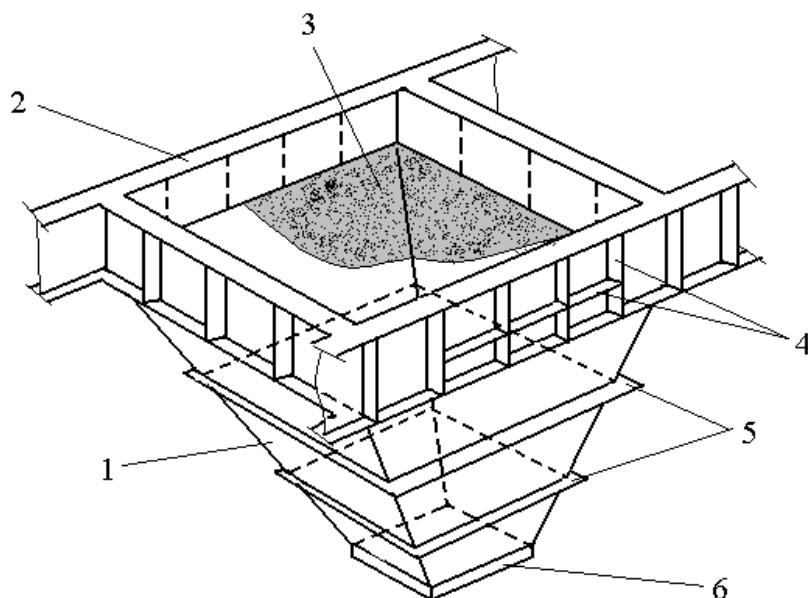
тивными документами точно не определяется – предусматривается возможность действия таких давлений произвольно по высоте сооружения.

Для бункерных емкостей давление от сыпучего материала на стенки рекомендуется определять по гидростатическому закону, как для обычной жидкости, без учета сил трения между сыпучим материалом и элементами конструкции.

Конструктивное решение стальных емкостей для сыпучих материалов также оказывается различным для бункеров и силосов. Однако для каждой из этих разновидностей сооружений оно остается достаточно однотипным, несмотря на особенности технологического процесса и типа загружаемого сыпучего материала.

### 1.2.2.1. Бункерная емкость

Современное конструктивное решение стальных бункерных емкостей для сыпучих материалов в его классической форме было описано в работе [44] – рис. 1.9. Оно представляет собой сооружение наиболее распространенной двухступенчатой формы, состоящей из верхней вертикальной части и нижней наклонной части, называемой воронкой.



*Рис. 1.9. Типовая конструктивная схема бункерной емкости:*

*1 – нижняя часть, 2 – верхняя часть,*

*3 – футеровочный слой, 4 – вертикальные ребра жесткости,*

*5 – горизонтальные ребра жесткости, 6 – разгрузочное отверстие*

Каждая из этих частей емкости выполняется в виде замкнутой оболочки из стальных листов относительно небольшой толщины (4 – 16 мм). Сформированная таким образом обшивка сооружения усиливается специальными подкрепляющими ребрами жесткости, которые для емкостей небольших размеров выполняются из прокатных профилей (уголкового, таврового, швеллерного, двутаврового сечений), а при значительных размерах – из сварных профилей того же типа.

В отечественной практике проектирования применяют два основных варианта ориентации таких ребер жесткости: горизонтально либо перпендикулярно обшивке (нормально). В первом случае ребра соседних стенок емкости жестко соединяются в углах между собой, формируя замкнутую рамку по периметру воронки; во втором – осуществление подобной состыковки технологически более затруднительно, и при расчете элементы рамки считаются шарнирно сопряженными. Традиционно более надежным считается первый вариант, второй чаще применяют в небольших бункерах.

Одним из современных крупных российских исследователей работы стальных бункеров профессором Х. Ягофаровым в его работе [45] была обоснована возможность вертикального (точнее, веерообразного) расположения ребер жесткости воронки. Конструктивное решение в этом случае предполагает наличие специальной нижней рамки, необходимой для повышения жесткости сооружения.

Для предотвращения вредного влияния сыпучей среды на элементы конструкции (абразивный и ударный износ, повышенная температура, и т. д.) внутреннюю поверхность стенок обшивки конструкции футеруют. Для разных условий эксплуатации разработано достаточно большое количество конструктивных разновидностей применяемых футеровок [38]. Используются, также, и мероприятия предохранительного типа, как например, организация защитных решеток над верхней частью емкости или установка специальных сортировочно-дробильных устройств. Большинство подобных мероприятий достаточно обстоятельно описано в перечисленной выше справочной литературе.

Опираение емкостной конструкции, как правило, осуществляется на специальные опорные стойки, располагаемые по периметру сооружения. Однако, в случае организации в конструкции бункерных балок, опираение осуществляется через них. Менее распространенной является подвесная система опираения, при которой сооружение под-

вешивается с помощью балок или стержневых элементов к вышестоящим опорным конструкциям.

#### **1.2.2.2. Силосная емкость**

В отечественной практике наибольшее распространение получили цилиндрические стальные силосные емкости, которые по статической схеме работы являются более рациональными (см., например, [36]). В их стенках возникают, в основном, растягивающие кольцевые усилия, поэтому их толщина может быть небольшой, благодаря чему снижается расход материалов по сравнению с поперечными сечениями, работающими с изгибающим моментом.

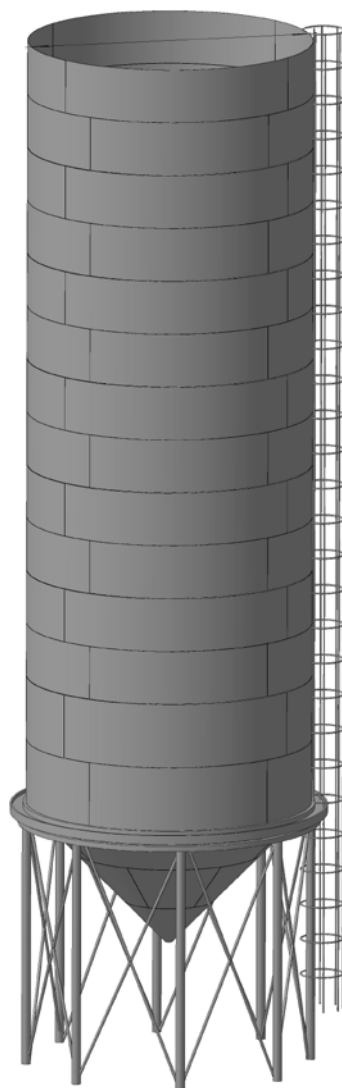
Силос представляет собой цилиндрическое хранилище с плоским или конусообразным дном. Его типовая конструктивная схема (рис. 1.10) включает два основных элемента – опорное кольцо на прочно укрепленных стойках и объемный цилиндр, изготовленный из стальной ленты и удерживающийся данной опорой. Неизменяемость круговых сечений цилиндрической оболочки обеспечивается кольцами жесткости. Верхняя часть цилиндра устроена таким образом, чтобы можно было легко и быстро принимать сельхозпродукцию. При наличии кровли ее выполняют в виде конического купола с опиранием на стены и в некоторых случаях на центральную стойку. К кровле ведет лестница, прикрепленная сбоку силоса. Соответственно, в нижней части цилиндрического силоса предусмотрена система его разгрузки на транспорт.

По характеру и конструкции опирания на фундамент силосные емкости делятся на две основные группы: без подсилосных этажей и с подсилосными этажами (рис. 1.11).

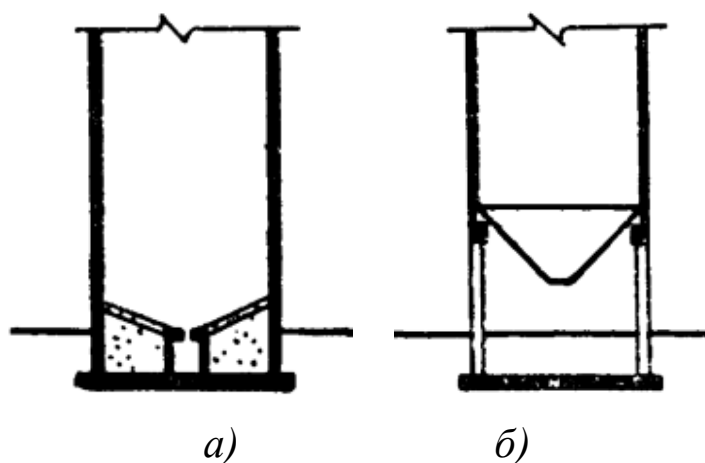
В силосах без подсилосных этажей стенки начинаются на уровне верха фундамента, и разгрузка материала осуществляется через отверстия в стенах наружу или через отверстия в днище в специальные заглубленные галереи, оборудованные шнеками или транспортерами. При наличии подсилосного этажа наиболее распространенная конструкция днища – стальная коническая воронка на весь диаметр силоса. При такой конструкции днище опирается на колонны, соединенные системой вертикальных связей, непосредственно или через специальные кольцевые балки.

При возведении стальных силосов без подсилосных этажей нет необходимости устройства сплошной фундаментной плиты. Вертикальное давление зерна на днище силоса передается через специально

подготовленное основание непосредственно на почву, а нагрузка от стен – на кольцевой фундамент, решенный в монолитных или сборных железобетонных конструкциях. В некоторых случаях целесообразно применять кольцевой свайный ростверк.



*Рис. 1.10. Типовая конструктивная схема силосной емкости*

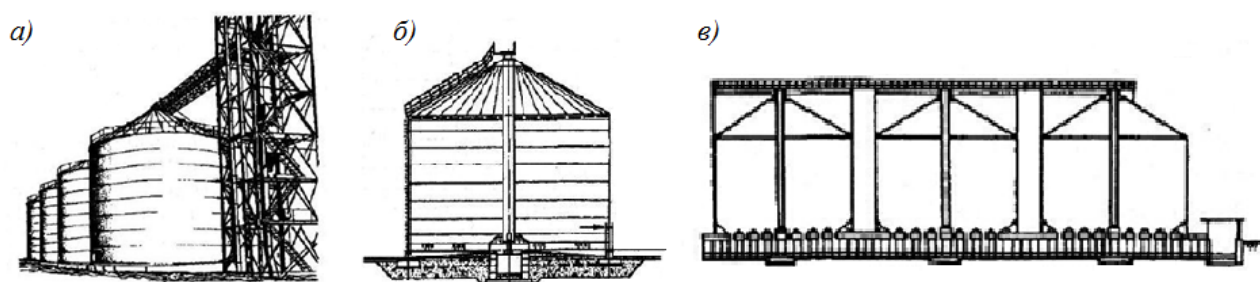


*Рис. 1.11. Схемы силосов:*

*а) без подсилосного этажа; б) с подсилосным этажом*

В конце XX столетия в нашей стране наибольшее распространение получили силосы, возводимые методом рулонирования и методом навивки [46].

Метод рулонирования применяется для отдельно стоящих силосов диаметром до 18 м (рис. 1.12). Этот метод заключается в сборке днища и стенок резервуара, а также элементов конструкции покрытия из сваренных и свернутых в рулоны в заводских условиях заготовок. Надземная часть решается в виде металлической оболочки с центральной трубчатой стойкой и конической крышей, опирающейся на них. Для загрузки силоса используют надсилосные конвейерные галереи. Выгружают зерно самотеком на конвейеры в подсилосной подземной галереи, а его остатки – с помощью аэрожелоба через лючки, расположенные в перекрытии тоннеля. Толщина стены силоса изменяется по высоте через интервалы, равные ширине листов, из которых сваривают рулоны.



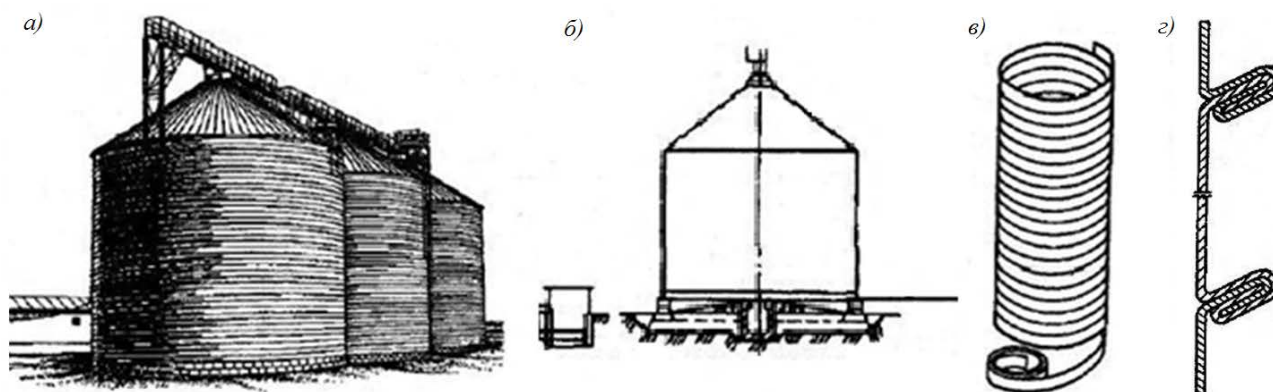
*Рис. 1.12. Стальные силосы, возводимые методом рулонирования  
а) общий вид силосов; б) поперечное сечение силоса;  
в) продольный разрез силоса*

Стальное зернохранилище поступает на строительную площадку укрупненными узлами. Стенки резервуаров – в виде сварных полотнищ, покрытие – сварными секторными щитами, кольца днища – отдельными сегментными элементами.

Кроме этого широкое распространение получили стальные силосы, возводимые методом навивки (рис. 1.13). Суть метода заключается в формировании стенок силосов из спиральной стальной ленты с соединением кромок путем загиба и запрессовки в фальцевое соединения. Специальные машины отгибают кромки листов, а затем фор-

мируют фальцевое соединения, пропуская через систему парных валков.

Толщина стенки при таком методе возведения составляет порядка 2 – 4 мм. Вальцовочный станок предназначен для завальцовки стальной ленты и одновременно создания выпуклого вальцовочного шва шириной 30 – 40 мм с внешней стороны силоса, каждый виток которого дает дополнительное ребро жесткости всей конструкции. Спиральные ребра повышают устойчивость стенки. Кроме того, в нижней части силосов для обеспечения дополнительной устойчивости устанавливают вертикальные стойки.



*Рис. 1.13. Стальные силосы, возводимые методом навивки  
а) общий вид силосов; б) поперечное сечение силоса;  
в) схема навивки;  
г) узел сопряжения металлических лент*

Покрытие силосной емкости решается в виде легкого конического купола, опирающегося на стенки силоса. При этом диаметр корпуса стального силоса может быть от 3 до 25 м, а высота стены – до 30 м.

В последние годы в Украине широкое распространение получили стальные силосные емкости, выполненные по зарубежной конструктивной схеме. Они представляют собой усовершенствованный вариант отечественных силосов, в которых, однако, имеется одно принципиальное отличие. Жесткость стенок в таких силосах значительно увеличивается за счет использования гофрированных листов металла. Такие листы по сравнению с плоскими являются более прочными на разрыв и изгиб (рис. 1.14).

Стеновые элементы представляют собой гофрированный лист металла с перфорацией для крепления и определенным радиусом кривизны в зависимости от диаметра силоса. Панель гофрированного профиля по сравнению с плоской панелью имеет повышенную жесткость в горизонтальном направлении, в частности: момент инерции больше приблизительно в 50 – 70 раз, а момент сопротивления выше в 5 – 10 раз. Это важное свойство панелей гофрированного профиля обеспечивает жесткость и устойчивость незагруженных силосов от ветровых нагрузок. Толщина листа назначается на основе прочностных расчетов и физико-механических свойств стали. При этом на разных ярусах силоса устанавливаются стеновые элементы в порядке увеличения толщины снизу вверх.



*Рис. 1.14. Общий вид стальной силосной емкости с гофрированной стенкой*

Для компенсации потери жесткости на тонких стеновых элементах в верхней части силосной емкости могут устанавливаться дополнительные ярусы колец, получивших название «ветровых колец», поскольку вверху на стеновые панели давление слоя зерна изнутри силоса уменьшается, а ветровая нагрузка возрастает. Как правило, их

располагают извне силоса, они ничему не мешают и хорошо выполняют свою функцию (рис. 1.15).

Не смотря на существенное разнообразие типов гофрированных профилей для стеновых элементов, самыми распространенным в практике все же являются трапециевидный и волнистый профили. Именно на них ориентированы и современные зарубежные нормативные документы [40, 41]. Другие виды профилей не рассматриваются.

Вес снеговой, ветровой нагрузки, горизонтальные усилия при сейсмическом воздействии, частичный вес зерна при таком конструктивном решении силосной емкости передаются на фундамент через стойки. Конструкция стоек в различных силосах отличается формой сечения и способом наращивания по длине. Форма сечения определяет величину изгибающего момента и на сегодняшний день прогрессивным сечением считается волнообразный профиль (рис.1.16).



*Рис. 1.15. Внешнее размещение «ветровых колец»*



*Рис. 1.16. Стойки силосов из волнообразных профилей*

В зависимости от размера силосной емкости (диаметр цилиндрической части) и от региона строительства конструкция крыши выполняется каркасной или бескаркасной.

Кроме того, при сооружении емкостей больших размеров (диаметром около 30 м) стенки из гофрированных листов делают двойными. В этом случае внутренняя часть имеет вертикальные рифли, наружная – горизонтальные. Первая воспринимает давление, возникающее при трении продукта о стенки, вторая – разрывные нагрузки массы продукта. Это придает стенам силоса повышенную жесткость, высокое сопротивление давлению и теплоизоляцию.

### **1.3. Отказы и аварии стальных емкостей**

Несмотря на достаточно неплохой опыт создания и эксплуатации стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, накопленный за время их применения, отказы и аварии таких сооружений не так уж редки. Однако, прежде, чем начать освещение вопроса, посвященного аварийности существующих стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, авторы хотели бы отметить, что специальная литература по данной проблематике совсем не пестрит сведениями об авариях стальных бункеров и силосов. Однако это вовсе не связано с тем, что они редко происходят. Дело в том, что бункера и силосы являются довольно рядовыми сооружениями ввиду

своих скромных размеров<sup>1</sup> и расположены на таких участках технологических процессов, которые не предполагают нахождения поблизости людей, тем более – их скопления. Для повышения эффективности работы бункера и силосы группируют друг с другом. Ясно, что выход из строя одного из них незначительно скажется на ходе технологического процесса, и только в исключительном случае может привести к его остановке. Поэтому, аварии бункеров и силосов – процесс, так сказать, незрелищный, о котором невозможно было бы снять импозантный фильм и не влекущий за собой больших человеческих жертв, а значит, из которого трудно сделать показательный пример в литературе.

К тому же, бункера являются неотъемлемым объектом таких производств, которые довольно часто носят стратегический характер, а значит, и все сведения о которых не подлежат широкой огласке. Кроме этого, само правдивое описание всех имевших в практике место аварий подорвало бы авторитет соответствующих строительных и проектных организаций и нанесло бы им материальный ущерб.

В связи с этим, нужно признаться, что авторам стоило немалых трудов собрать необходимые сведения, позволившие обобщить и проанализировать современное положение вещей в данной сфере. В своей работе они старались не доверять и не использовать данные, которые невозможно было бы проверить, а представленный в данном подразделе материал имеет точные ссылки на источники, из которых он был позаимствован.

Когда разговор заходит об авариях, прежде всего, начинают с их классификации по каким-либо признакам. Традиционно принято разделять аварии строительных конструкций либо по причинам, их вызвавшим, либо по характеру повреждения и разрушения элементов.

Относительно первого подхода известно довольно много попыток классификаций у различных авторов [47 – 52]. Так, любопытен подход Томаса Х. Мак Кейга выделяющего пять основных причин аварий, связанных, главным образом, с человеческим фактором: невежество, экономия, погоня за прибылью, небрежность и стихийные бедствия. Классификация И. А. Мизюмского, напротив, отражает только технический аспект. Он выделяет четыре причины аварий: ошибки проектирования, изготовления, эксплуатации и от недостатка

---

<sup>1</sup> Максимальный на сегодняшний день известный авторам стальной бункер пирамидально-призматического типа имеет размеры 15×18 м в плане при общей высоте порядка 9 м и расположен на КГГМК «Криворожсталь» (Украина).

знаний. Известный советский исследователь Ф. Д. Дмитриев совершенно справедливо их примиряет, считая, что аварии происходят либо ввиду несовершенства инженерно-технических приемов, либо связаны с социально-экономическими условиями, либо есть следствием объективных природных явлений.

Однако, как известно из опыта, в большинстве случаев авария есть результат наложения нескольких причин, и выделить главную из них, оказавшую решающее влияние, иногда довольно затруднительно. Кроме этого следует различать основную и непосредственную причины аварий, что вносит определенную долю условности во всякую классификацию.

С точки зрения исследователей, к которым авторы настоящей монографии осмеливаются причислить и себя, и инженерно-технических работников интерес, в первую очередь, представляют технические причины, предполагающие в дальнейшем потенциальное улучшающее вмешательство в конструктивную систему. Будем следовать данному принципу.

### **1.3.1. Ошибки, связанные с проектированием**

Одна из основных ошибок при проектировании стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов связана с неверным определением нагрузок на конструкцию. В настоящее время она имеет два аспекта. Первый из них заключается в том, что определяющим видом нагрузки при проектировании бункеров и силосов считается давление сыпучего материала, оказываемое им на дно и стенки емкостей, а по его определению среди специалистов в настоящее время нет единого мнения.

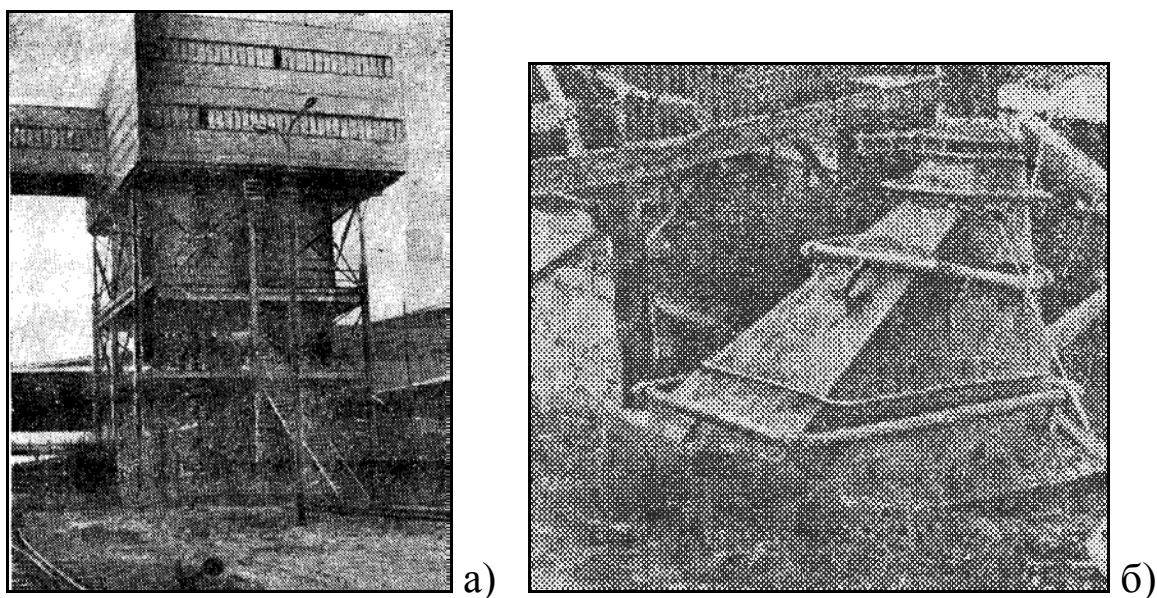
Авторам известны более двух десятков различных теоретических моделей, описывающих взаимодействие сыпучего материала с элементами емкостной конструкции [29, 38, 40 – 45, 53 – 63]. При этом результаты, полученные по ним, отличаются как качественно различным распределением давлений, так и количественными значениями их максимальных величин, имеющими разбег до нескольких раз.

Дополнительная погрешность при этом вносится за счет того, что довольно часто при определении давлений используют не фактические, а усредненные характеристики сыпучих материалов, приводимые в нормативно-справочной литературе. Причем по данным раз-

личных источников для одних и тех же материалов они также различны (отличие в удельном весе, например, может достигать до 50 %). Поэтому, задача верного определения давления сыпучего материала на дно и стенки сосуда является одной из первостепеннейших и актуальнейших в проблеме рационализации конструкции бункеров и силосов.

Так, в работе [49] приводится пример обрушения бункера для хранения цемента размерами  $4,4 \times 3,8 \times 8,5$  м, произошедшее после нескольких дней его эксплуатации. При очередной загрузке произошел отрыв воронки в месте ее присоединения к вертикальной части. Воронка рухнула на площадку обслуживания, которая в свою очередь разрушилась и упала на стоящий внизу загружаемый железнодорожный вагон (рис. 1.17).

В качестве одной из причин аварии как раз и указывается «...ошибочно принятая величина расчетной нагрузки...». Однако, помимо неверно определенного давления от сыпучего материала, в расчетах не учитывалось избыточное давление воздуха при аэрации с помощью системы Проха, а в качестве непосредственной причины аварии указывается на внезапное обрушение зависшей массы цемента внутри бункера.



*Рис. 1.17. Вид бункера для хранения цемента до обрушения (а) и после обрушения (б)*

Точно такие же причины привели в 1951 г. к аварии сварного цементного силоса на Магнитогорском цементном заводе, описанной

в работе [50]. Во время погрузки цемента из стального силоса в железнодорожные вагоны у силоса оторвалось коническое днище и рухнувшим цементом были произведены большие разрушения конструкции самого силоса, кирпичных стен силосного отделения, воздушных и электрических сетей и железнодорожного состава, находящегося под погрузкой. Силос имел объем 1830 м<sup>3</sup> и находился в эксплуатации 2,5 месяца.

На неверное определение давления от хранимого в силосах зерна указывается и при разборе причин целой серии аварий зернового элеватора, произошедших в 1961 г. [51]. Силосы были выполнены из железобетона, но это только лишний раз демонстрирует общность данной проблемы.

На этих примерах довольно наглядно прослеживается и второй аспект указанной выше проблемы определения нагрузок, а именно – существенное заужение спектра учитываемых при проектировании нагрузок и воздействий.

Например, европейская школа проектирования емкостных конструкций помимо общих для многих строительных конструкций нагрузок от собственного веса сооружения, ветра, снега, рекомендует учитывать и ряд специфических [40 – 43]:

- воздействие технологических температурных нагрузок от загрузки нагретого сыпучего материала и связанное с этим возможное изменение физико-механических характеристик стали;

- ударные нагрузки, возникающие при обрушении сводов или склонов сыпучего материала внутри конструкции, при его неравномерной осадке;

- нагрузки от повышенного воздушного давления, возникающего при быстрой разгрузке и загрузке большого количества сыпучего материала с относительно низкой фильтрационной способностью для газов;

- нагрузки от возможного взрыва пылевидной фракции хранимого сыпучего (это касается, правда, только взрывоопасных материалов);

- эффекты изменения во время хранения физико-механических свойств сыпучих материалов вследствие имеющих место процессов консолидации, сегрегации и его деградации;

- нагрузки, возникающие при применении специальных разгрузочных устройств, облегчающих процесс разгрузки плохосыпучих материалов.

Проблема здесь заключается не только в том, что недостаточно исследована специфика этих нагрузок и воздействий как применительно к конструкции бункеров и силосов, так и в целом на физическом уровне. Как показывают исследования, тонкие стенки стальных емкостных конструкций необходимо рассчитывать по геометрически нелинейной схеме, иначе происходит существенное искажение получаемых результатов. При этом возникает проблема совместного учета различных нагрузок, ведь применение традиционного принципа суперпозиции уже будет являться в корне неверным.

Отечественная нормативно-справочная литература упрощает ситуацию донельзя, рекомендуя все вышеперечисленные эффекты учитывать введением единого коэффициента динамичности, значения которого зависят только лишь от объема единовременно загружаемого в бункер материала и варьируются в диапазоне 1 – 1,5. Становится понятным идея такого упрощенного подхода, если вспомнить сколько разночтений наблюдается по вопросу определения давления от сыпучего.

В качестве второй специфической ошибки, допускаемой на стадии проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов можно выделить неверное назначение сечений элементов. Как и предыдущая ошибка, данная, также имеет два аспекта.

Первый из них следует трактовать не как следствие предыдущей ошибки в назначении нагрузки (хотя связь между ними прямая и неоспоримая), а как результат применения неверной методики расчета, связанной с недостаточной изученностью и неверной трактовкой работы элементов емкостной конструкции.

Так, в качестве второй основной причины уже упоминавшейся выше аварии бункера для цемента указывается ошибочно принятое распределение усилий в зоне состыковки воронки с вертикальной частью, в результате чего отрыв произошел именно в этом месте. Точно такая же ситуация наблюдалась и на бункерах Кузнецкого и Челябинского металлургических комбинатов. Достаточно уязвимой является и зона соединения ребер жесткости воронки в углах, быстро приходящая в негодность и потому часто требующая замены (см., также, рис. 1.22, в).

Дело в том, что официальная применяемая в настоящее время инженерная методика проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, впрочем как и остальных видов листовых конструкций, основана на условном разделении единой

конструкции на отдельные простые элементы с последующим расчетом их по элементарным плоским расчетным схемам. Такой подход, дающий приемлемые результаты для иных видов строительных конструкций (например, каркасы промышленных зданий), приводит к огромным погрешностям в случае небольших пространственных конструкций, которыми являются бункера и силосы.

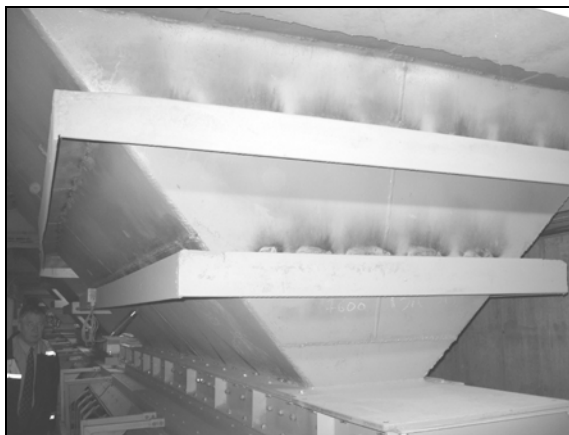
В подтверждение этих слов авторам совсем недавно представился в распоряжение просто уникальный случай. В одной из отечественных организаций, связанных с транспортировкой зерна, были закуплены за рубежом силосные емкости диаметром около 30 м и высотой до 40 м, выполненные по стандартному зарубежному проекту (рис. 1.18). Однако емкости не имели нижней части для выпуска сыпучего материала и поэтому, отечественным инженерам была поручена задача допроектировать разгрузочные воронки.

Такое проектирование было выполнено в строгом соответствии с рекомендациями действующих нормативных документов и доминирующими представлениями о работе емкостных конструкций. При этом инженеры посчитали целесообразным подобрать сечения конструктивных элементов максимально экономично таким образом, чтобы недонапряжения в них не превышали 5 %. Таким образом, какие-либо запасы по прочности в конструкции не были предусмотрены. В результате практически сразу после начала эксплуатации были отмечены погиби и погнутости элементов разгрузочных воронок – ребер жесткости и несущей стенки. Их величина доходила до нескольких сантиметров и они просматривались даже невооруженным глазом (рис. 1.19).

Интересно отметить, также, что в процессе проектирования нагрузки от сыпучего материала определялись как для бункерной емкости, но по документации конструкция называлась силосом.



*Рис. 1.18. Внешний вид вертикальной части силосов*



а)



б)

*Рис. 1.19. Погнутости несущих элементов разгрузочной воронки емкостной конструкции:  
а) выгибы ребер жесткости, б) выгиб стенки*

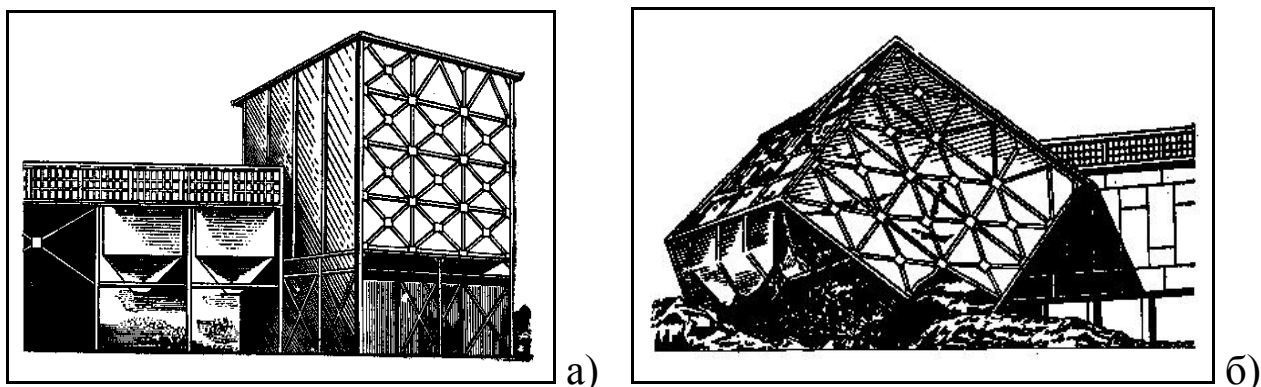
Второй аспект ошибки типа неверного назначения сечений конструктивных элементов стальных емкостей связан с довольно типовой в проектной практике ситуацией «чрезмерное расширение сферы применения». Так, по данным работы [51] в октябре 1973 г. в одном из совхозов бывшего СССР произошло обрушение стального бункера-накопителя, входящего в состав зерноочистительного комбината и эксплуатировавшегося до этого всего 12 дней (рис. 1.21). Размер бун-

кера 8×12×7 м, масса 33 т, вместимость 600 т зерна. Обрушение бункера произошло внезапно в безветренную погоду при наличии в нем 430 т зерна. Он обрушился с наклоном в сторону машинного зала зерноочистительного комплекса, стойки получили значительные искривления с изгибом на 180°, но без разрыва стали.

Проверочные расчеты конструкции самого бункера, выполненные по нормам проектирования стальных конструкций, показали, что она обладает достаточной прочностью. Что касается стоек, то их гибкость намного превышала требуемую. Именно в этом и состояла единственная в данном случае причина аварии. Бункер-накопитель был построен без проекта по эскизам, снятым с такого же бункера, построенного ранее в другом совхозе. При этом высота стоек была увеличена с 4 до 5,3 м без выполнения надлежащих проверочных расчетов. Вдобавок, изготовлением и монтажом бункера руководили лица, не имевшие технического образования, и поэтому не заметившие просчета.



*Рис. 1.20. Погнутости усиливающих стальных тяжей разгрузочной воронки емкостной конструкции*



*Рис. 1.21. Бункер-накопитель  
до обрушения (а) и после обрушения (б)*

Другим интересным примером на данную тему является бункерная эстакада доменного цеха одного из металлургических комбинатов г. Кривой Рог (Украина). Выполненное в 1995-1997 гг. ее обследование авторской проектной организацией сделало следующие выводы: техническое состояние 5 бункеров эстакады из 16 может быть оценено как неудовлетворительное, т.к. их элементы находятся в ограниченно работоспособном состоянии; техническое состояние остальных бункеров оценено как крайне неудовлетворительное – их элементы находятся в аварийном состоянии.

Все бункера пирамидально-призматического типа были выполнены по единой конструктивной схеме с седловидной рамой по центру и были сданы в эксплуатацию в 1976 г. Их основная отличительная особенность – гигантские для такого вида конструкций размеры: 15×18×9 м, масса около 100 т, объем свыше 1000 м<sup>3</sup>. В числе отмеченных дефектов, на которых мы подробнее остановимся ниже, фигурировали и разрывы узлов стыковки элементов седловидной рамы друг с другом и с элементами эстакады, в результате чего рама полностью выключилась из работы в качестве несущей. Аварии удалось избежать лишь благодаря тому, что как оказалось, рассчитанные по все той же официальной методике бункера в данном случае обладали значительным запасом прочности, а благодаря вовремя замеченным неисправностям интенсивность их эксплуатации резко снизили.

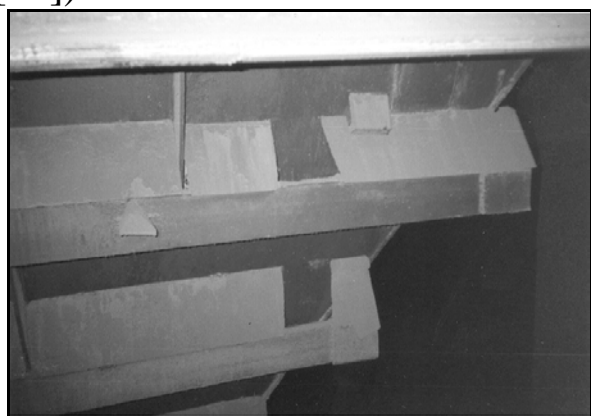
### **1.3.2. Ошибки, связанные с изготовлением и монтажом**

Продолжая анализировать пример из предыдущего раздела о сверхкрупных бункерах приведем список основных дефектов, выяв-

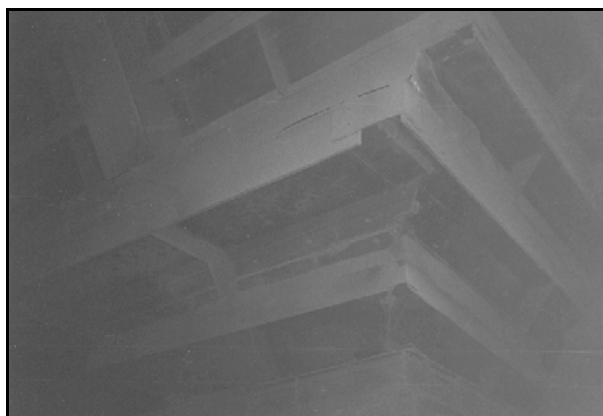
ленных при их обследовании. Он включает: многоочаговую пятнистую коррозию стенок бункеров вплоть до сквозной (средний размер пятен 600×200 мм); трещины и отверстия в стенках бункеров, средним размером 300×600 мм; многочисленные зазоры между стыкуемыми элементами, величиной до 50 – 70 мм; отсутствие сварных швов на отдельных участках, длиной до 1,5 м; многочисленные повреждения ребер – обрывы и деформации полок, вырезы и отверстия в полках и стенках; выполнение ряда узлов не по проекту (рис. 1.22).

Появление этих дефектов обусловлено отчасти коррозионным воздействием и некорректным монтажом, отчасти ударными воздействиями при загрузке-выгрузке сыпучего. Особую группу составляют вырезы и отверстия, сделанные рабочими при проведении ремонтных работ для возможности крепления необходимого оборудования, естественно, без каких-либо предварительных расчетов.

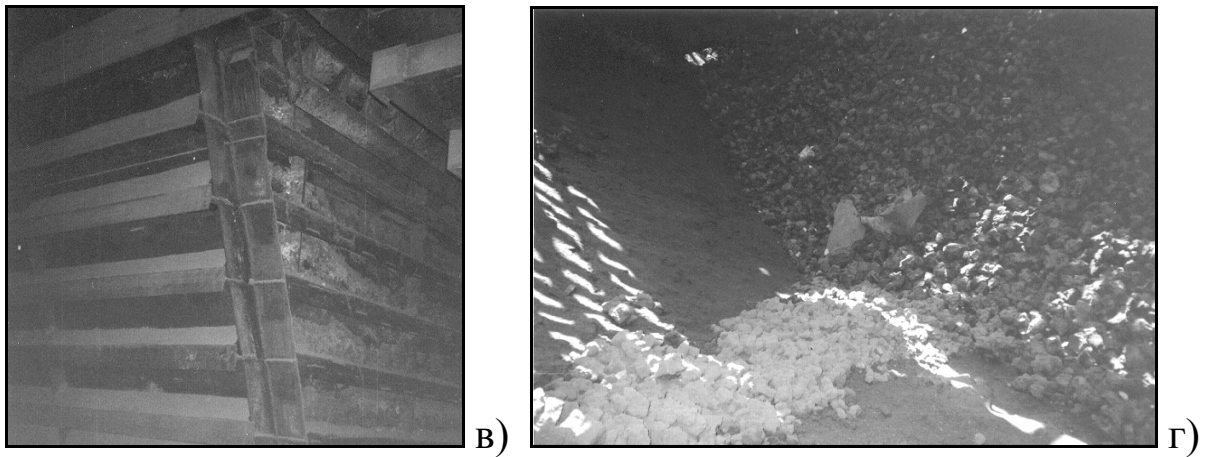
Как видим, причины довольно стандартные. Их можно наблюдать очень часто, но относительно стальных бункеров и силосов они приобретают особую остроту, поскольку они, как и все листовые конструкции, имеют довольно значительную протяженность сварных швов. Общеизвестно же, что до 80 % разрушений металла в конструкциях происходит именно по ним (см., также, пример из работы [50]).



а)



б)



*Рис. 1.22. Дефекты конструкции бункеров:*

- а) усиленная стыковка ребер жесткости воронки со стенкой,*
- б) трещины и погнутости ребер жесткости воронки,*
- в) замена изношенной угловой зоны стыковки ребер жесткости,*
- г) отсутствие футеровки на стенке воронки*

Еще одним ярким примером аварии, связанной с нарушением изготовления и несоответствием сборно-монтажных работ проекту является авария стального силоса для хранения сухого зерна объемом 5500 т в Черкасской области в 2008 г.

Результатом аварии стало полное разрушение одной из емкостей (рис. 1.23), а также существенные повреждения получили несущие конструкции надсилосной галереи и двух соседних емкостей, которые произошли без влияния каких-либо внешних факторов. На момент разрушения в силосе находилось 4100 тонн сухого зерна, а последние операции по его перемещению были выполнены за 2 недели до аварии.

При исследовании причин разрушения строительного объекта [64] было выявлено массу дефектов и повреждений силоса, возникших в процессе монтажа, таких как, подрезание листов панелей в следствии подгонки «по месту», которые привели к уменьшению расстояния от центра крайнего болта до края листа с последующим смятием металла панелей и исключением из работы крайнего ряда болтов (рис. 1.24), надрезы листа снизу, что привело к инициации и дальнейшему развитию трещины вверх, наличие некачественных сварных швов (рис. 1.25), прикрепляющих вертикальное ребро жесткости к опорной пластине с непроваром до 80 – 90 % сечения шва.



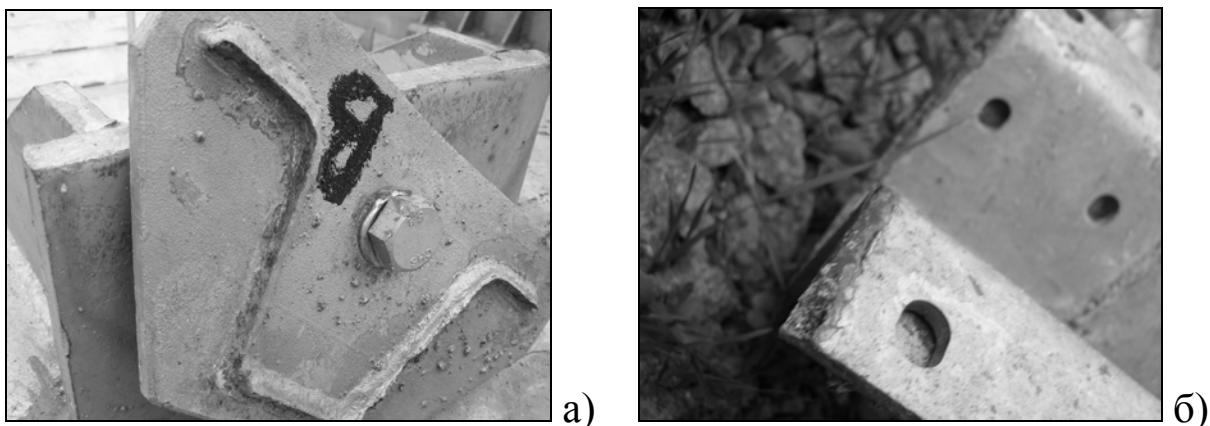
*Рис. 1.23. Общий вид силоса и конструкций надсилосной галереи после аварии*

Кроме этого было обнаружено несоответствие использованных материалов – применения болтов класса прочности 5.8 вместо болтов класса прочности 8.8 по проекту (рис. 1.26).

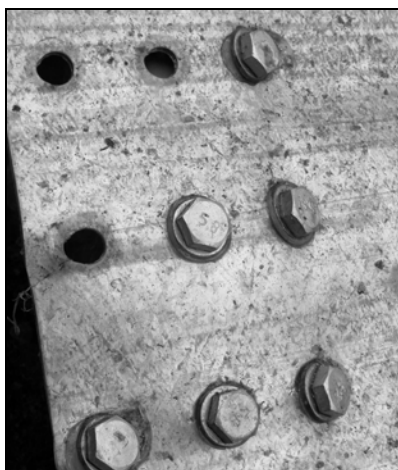
Несоответствие, в том числе конструктивное (деталей и узлов конструкций изделия силоса) повлияло наиболее существенно на целостность объекта и было основной причиной разрушения.



*Рис. 1.24. Монтажные надрезы панелей*



*Рис. 1.25. Соединения ребра жесткости с опорной пластиной  
 а) опорная пластина с дефектным швом;  
 б) ребро жесткости с неповрежденным торцом от сварного шва*



*Рис. 1.26. Установлены болты класса прочности 5.8  
 вместо болтов класса 8.8*

Кроме вышперечисленных дефектов и нарушений были выявлены и другие, такие, например, как некачественное выполнение конструкции фундамента, которые негативно сказывались на работе объекта, однако по выводам обследования не были определены, как причины разрушения.

### **1.3.3. Ошибки, связанные с эксплуатацией**

Главная сложность, в данном случае, связана с необходимостью постоянно поддерживать в рабочем состоянии коррозионную защиту и футеровку стенок конструкций. Как показывает практика, ее износ может быть довольно существенным, и на незащищенных местах сра-

зу же начинается интенсивная коррозия стальных листов стенок бункеров, отрицательно сказывающаяся на прочностных свойствах конструкции. Так, по данным работы [65] коррозионный износ достигает величины 17,3 % толщины стенки конструкции за 50 лет эксплуатации в условиях промышленного предприятия Польши. Согласно другим источникам [66, 67] коррозионный износ может достигать до 25 – 30 %, что, безусловно, крайне негативно сказывается на работе конструкций.

Достаточно интересные повреждения получил ряд силосных емкостей, недавно смонтированных в Киевской области. Поверхность крыши оказалась продавленной внутрь конструкции (рис. 1.27). При этом в качестве причины такого необычного отказа сотрудниками предприятия указывается на чрезмерное превышение давления при загрузке сооружений.

В целом, анализ и обобщение собранных авторами сведений об авариях стальных силосных емкостей, выполненных по конструктивной схеме с гофрированными стеновыми элементами, привел их к выводу о некоей высокой деформативности и, так сказать, «хлипкости» такого решения. Такие емкости получают повреждения, что называется, на ровном месте, тогда как емкости, выполненные по традиционной конструктивной схеме все-таки более надежны и явно имеют внутренние резервы.

Так, в распоряжение авторов попала, сделанная совершенно случайно, любительская запись аварии емкостной конструкции с гофрированной стенкой – рис. 1.28. На ней запечатлен весь процесс разрушения сооружения.



*Рис. 1.27. Продавливание кровли силосных емкостей*

Видно, что сначала возникает потеря местной устойчивости в сечении внешней стенки силосной конструкции во время загрузки ее зерном. Примерно через 1-1,5 мин. в зоне потери местной устойчивости возникает разрыв обшивки. И затем, спустя еще примерно 1 мин., разрушается сама конструкция.

Причина аварии силоса в данном случае осталась неизвестной, однако судя по динамике процесса разрушения можно вполне сделать заключение о недостаточности жесткостных и прочностных характеристик сооружения, разрушившегося как «карточный домик». Стоит отметить, также, что даже усиливающие вертикальные стойки, призванные повысить характеристики конструкции, не сыграли вообще никакой роли и никоим образом не предотвратили разрушение. Это в полной мере свидетельствует о недостатках существующего конструктивного решения, применяемого для стальных емкостных конструкций силосного типа.



а)



б)



в)



г)



д)



е)

*Рис. 1.28. Авария силосной емкости с гофрированной стенкой (фрагменты):  
а) – е) этапы разрушения*

## **Раздел 2. Направления совершенствования конструкции стальных емкостей**

Анализ далеко неполной доступной статистики отказов и аварий стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, приведенный в предыдущем разделе данной монографии, к огромному сожалению, приводит к необходимости признать несовершенство существующих подходов к конструированию и созданию стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. Подобную точку зрения разделяют и многие инженеры-проектировщики, имеющие немалый опыт создания и обслуживания таких конструкций, а также ряд исследователей.

### **2.1. Замечания о классификации**

Как было показано в подразделе 1.1 настоящей монографии, современные емкостные конструкции отличаются чрезвычайным разнообразием, как своей внешней формы, так и своих геометрических размеров. При этом вполне закономерно возникает вопрос о выборе наиболее рациональной формы конструкции при заданном ее объеме. Так, например, традиционно круглые в плане емкости применяются при развитой вертикальной части конструкции, а квадратные и прямоугольные – при ее небольшой высоте. Однако, какие-либо исследования, подтверждающие или опровергающие сложившиеся представления по данному вопросу, авторам не известны. Поэтому **первым направлением**, позволяющим по мнению авторов монографии улучшить существующее конструктивное решение стальных емкостных сооружений, является оптимизация их внешней формы.

Кроме своеобразного упорядочивания типоразмеров емкостных конструкций разработка данного направления поможет решить еще

одну интересную особенность данного класса строительных конструкций – проблему их классификации. Она заключается в отсутствии в настоящее время единого четкого подхода к номенклатуре и типам емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Одной из наиболее привлекательных в этом плане является классификация, приведенная в работе [44]. В ней емкости для сыпучих материалов вместе с резервуарами, газгольдерами, трубопроводами, трубами, кожухами доменных печей, барабанными печами и линейными ускорителями протонов были отнесены к одному большому виду листовых конструкций. Вот как они определяются в упомянутой работе (с. 4): «Листовые конструкции представляют собой емкостные конструкции, состоящие из металлических листов и предназначенные для хранения, транспортирования, перегрузки и переработки жидкостей, газов и сыпучих материалов».

При этом прослеживаются сразу два аспекта, положенные в основу такой классификации. Во-первых, это наличие во всех перечисленных видах сооружений несущих оболочек, технологически выполнявшихся из стальных листов. И во-вторых, это объединенные вместе технологические операции хранения, транспортирования, перегрузки и переработки по отношению к трем видам сред – жидким, газообразным и сыпучим.

В принципе подобная классификация, по мнению авторов данной монографии, вполне могла бы применяться и в настоящее время, если бы не ряд замечаний и оговорок.

Во-первых, листовые конструкции могут изготавливаться не только из металла, но также и из других строительных материалов, в первую очередь – из железобетона [20 – 23]. Причем достаточно сложно утверждать, чтобы какой-либо из этих материалов существенно доминировал [38]. Однако, по отношению к железобетону понятие «листовые конструкции» становится уже некорректным, поскольку отсутствуют сами «листы». Вместо этого применяют термин «складчатые конструкции», который также не может считаться удачным, поскольку силос цилиндрической формы довольно сложно считать «складчатым».

Во-вторых, все емкостные конструкции предназначены только для практической реализации технологической операции хранения какой-либо из сред (газообразной, жидкой или сыпучей). К технологическим операциям транспортировки и уж тем более перегрузки и переработки они не имеют никакого отношения.

И в-третьих, емкостные конструкции для сыпучих материалов исторически принято разделять на силосы (иногда их называют еще башни для сыпучих материалов) и бункера. Все отличие между ними согласно действующему нормативному документу [29] сводится к высоте вертикальной части сооружений: у силосов она больше, у бункеров меньше. При этом в количественном отношении граница между ними совершенно четко устанавливается упомянутыми нормами, но становится совершенно размытой при знакомстве с многочисленной справочной и специальной литературой.

Согласно норм [29] при высоте вертикальной части емкостного сооружения более  $1,5 \cdot A$  (где  $A$  – площадь горизонтального сечения емкости) конструкция считается силосом, при меньшей высоте она является бункером. При этом оказывается достаточно затруднительным выполнить подобный расчет, поскольку площадь измеряется в квадратных единицах длины, а высота – в линейных. Видимо здесь имеет место ошибка авторов нормативного документа.

В рекомендациях одного из наиболее известных в среде инженеров-проектировщиков пособия [38] эта ошибка, по всей видимости, исправлена и количественная граница между бункером и силосом установлена равной  $1,5 \cdot \sqrt{A}$ .

Попробуем обратиться к другому источнику. На с. 192 уже упоминавшейся ранее работы [44] конкретизируется величина высоты  $h_1$  для силоса: «Силосы – это относительно высокие и узкие сосуды, у которых высота  $h_1$  превосходит в 1,5 раза и более наименьший размер в плане».

Пока речь идет о квадратной или круглой в плане форме никаких различий между определениями источников [38] и [44] не возникает. Однако когда рассматривается прямоугольная форма емкости, которая редко, но все же применяется в практике, появляются существенные противоречия.

Так, например, рассмотрим произвольно выбранную емкостную конструкцию с размерами в плане  $a \times b = 4 \times 6$  м и высотой вертикальной части  $h = 6,9$  м.

Исходя из определения источника [44], наименьший поперечный размер в плане  $a = 4$  м. В таком случае данную конструкцию следует отнести к силосной, так как  $h = 6,9$  м  $>$   $1,5 \cdot a = 1,5 \cdot 4 = 6$  м. Но следуя источнику [38], чтобы отнести конструкцию к силосной, ее высота должна превышать  $1,5 \cdot \sqrt{A}$ . Тогда  $h$  должна быть более

$1,5\sqrt{(a \cdot b)} = 1,5\sqrt{(4 \cdot 6)} = 1,5\sqrt{24} = 7,35$  м, но поскольку  $h = 6,9$  м  $<$  7,35 м, то данная конструкция считается бункером. Получается, что по определению источника [44], рассматриваемая емкость – силос, а следуя рекомендациям источника [38] – бункер.

Ситуация становится еще более непрозрачной, когда мы обращаемся к работе [46, с. 383], где количественная разница между силосом и бункером определена несколько иным образом:

«... бункера могут быть разделены на три группы: 1) воронкообразные, высота верхней части которых, т. е. части, расположенной над воронкой, меньше размеров в плане; 2) силосы, верхняя часть которых превышает размеры в плане; 3) продольные, представляющие собой корыто с одним отверстием в виде щели или с несколькими отверстиями».

В этой же работе в следующем абзаце уточняется: «Плоскость обрушения, проведенная через нижнюю точку вертикальной стенки бункера, пересекает поверхность сыпучего материала внутри сосуда (рис. 18.1, а), а в силосе – вне его (рис. 18.1, б)». Далее приводится иллюстрирующий рисунок 18.1, суть которого приводится ниже на рис. 2.1, а на с. 385 приводятся таблица характеристик различных сыпучих тел, где в колонке 3 указывается угол естественного откоса. При этом взаимосвязь между приведенными двумя указаниями остается совершенно непонятной, поскольку из первого математически никак не следует второе.

Не следует быть искушенным математиком, чтобы по вышеприведенным зависимостям попробовать вычислить количественную границу между силосом и бункером и убедиться в том, что в каждом случае результат получается различным и кроме того зависит не только от геометрических размеров емкостей, а еще и от материалов, которые в них хранятся.

Проиллюстрируем это на конкретном примере.

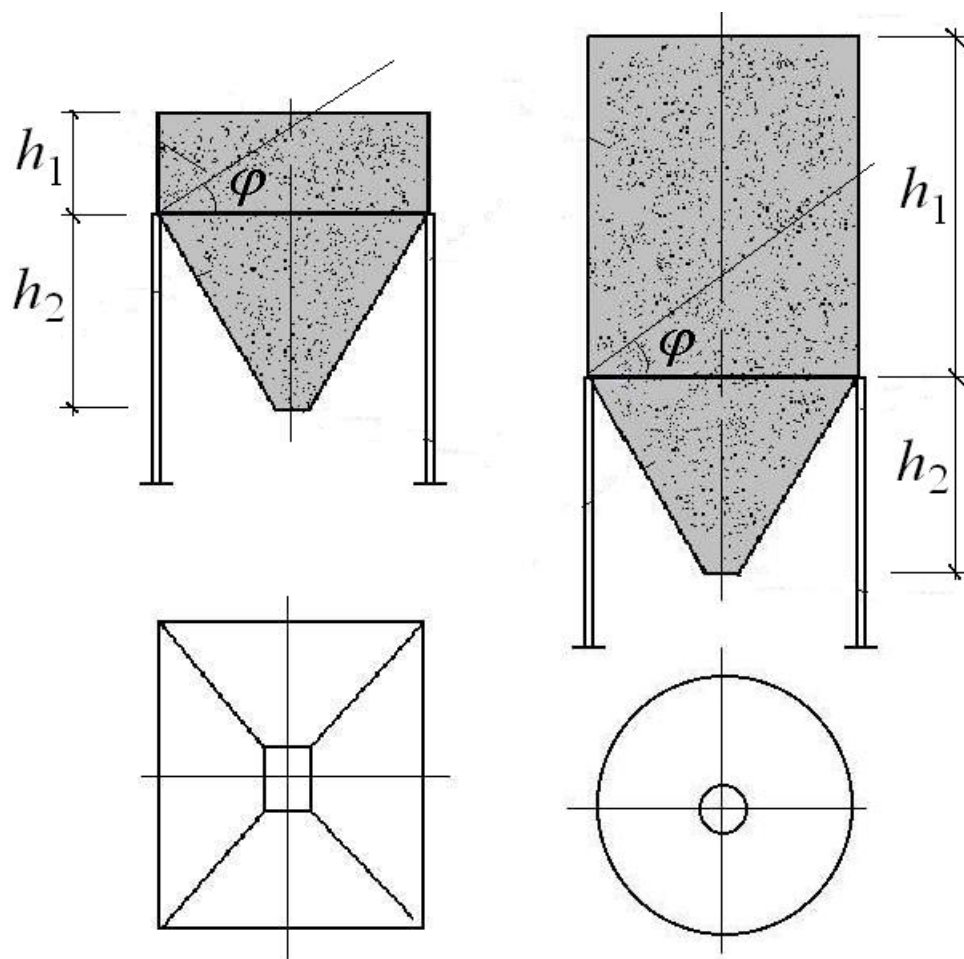
Итак, рассмотрим две емкостные пирамидально-призматические конструкции с квадратным сечением в плане и размерами  $a \times b = 4 \times 4$  м, высотами верхней и нижней частей  $h_1 = 3,5$  м и  $h_2 = 5,5$  м, которые представлены на рис. 2.2, соответственно.

Учитывая предварительно поданную информацию о группах бункеров, конструкцию на рис. 2.2, а) следует отнести к воронкообразному бункеру, так как  $h_1 = 3,5$  м  $<$   $a = 4$  м, а конструкцию, показанную, на рис. 2.2, б) – к силосу, поскольку  $h_2 = 5,5$  м  $>$   $a = 4$  м.

Теперь вернемся к определению согласно плоскости обрушения, расположение которой напрямую зависит от угла естественного откоса  $\varphi$ . Примем его возможные граничные значения:

$\varphi_{max} = 55^{\circ}$  (скрап крупный чугунный);

$\varphi_{min} = 15^{\circ}$  (пыль угольная).



*Рис. 2.1. Различие между бункером и силосом*

Проверяем расположение пересечения плоскости обрушения с поверхностью сыпучего материала и в результате получаем следующее (рис. 2.3). Оказывается, что если учитывать уточнения относительно плоскости обрушения, тогда решающее значение будет играть тип материала, для хранения которого проектируется конструкция. Следуя представленным рекомендациям работы [46] следует, что одно и то же сооружение, с абсолютно одинаковыми размерами в одном случае может называться силосом, а в другом – бункером. Причем, если в предыдущем примере противоречили друг другу определения

из разных источников, то здесь уже возникают несовпадения в рамках одной работы.

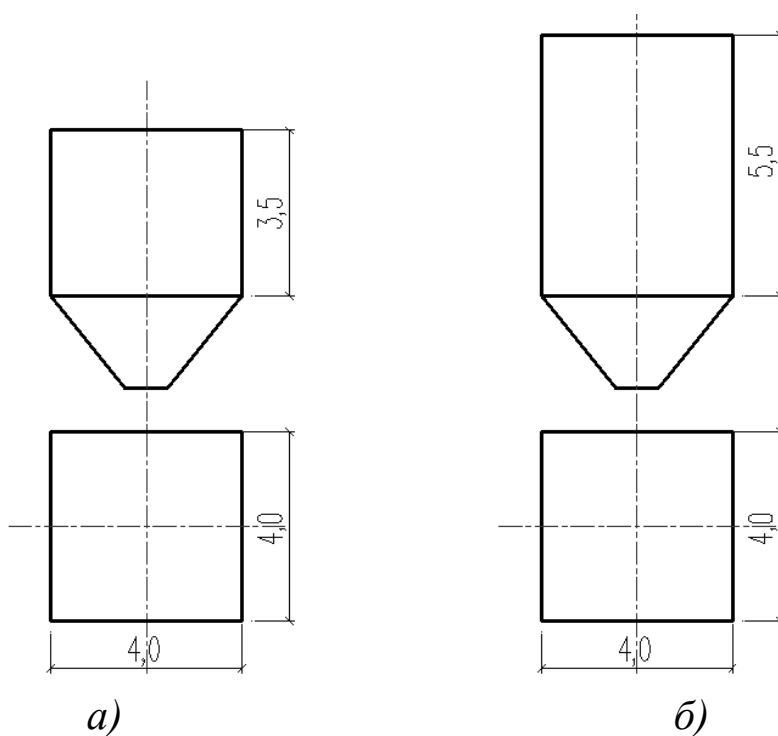


Рис. 2.2. Схемы емкостных пирамидально-призматических конструкций:

- а) высота верхней части  $h_1 = 3,5$  м;  
 б) высота верхней части  $h_2 = 5,5$  м

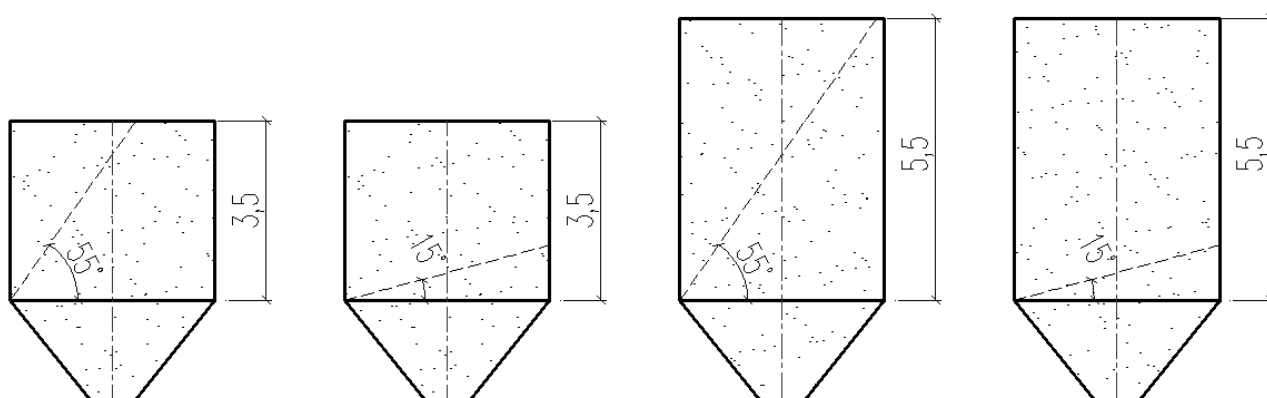


Рис. 2.3. Тип емкостной конструкции на основании первого и второго утверждений работы [46]:

1. Бункер  
2. Бункер

1. Бункер  
2. Силос

1. Силос  
2. Бункер

1. Силос  
2. Силос

Хотя столь тщательная попытка разобраться между принципиальной разницей между силосом и бункером в результате только еще больше запутала ситуацию, с другой стороны, это позволило выдвинуть хоть какую гипотезу, относительно происхождения коэффициента 1,5 в предыдущих источниках [29], [38] и [44]. Она заключается в том, что, возможно, разработчики СНиП [30] и действующего ныне ДБН [29] при принятии этого коэффициента отталкивались именно от угла естественного откоса  $\varphi$ , а точнее его максимального значения из всех возможных для хранения сыпучих материалов  $\varphi_{max} = 55^{\circ}$  (скрап крупный чугунный, скрап стальной крупный). При таком угле минимальное соотношение между высотой и размером в плане, для которого плоскость обрушения будет пересекать поверхность сыпучего материала уже за пределами емкости, составляет  $\tan 55^{\circ} = 1,43 \approx 1,5$ . В этом случае появляется определенное теоретическое обоснование данного коэффициента.

Ряд справочных изданий, в т.ч. и современных, как например указанные в предыдущем пункте работы [33, 34] никакой количественной границы между бункером и силосом вообще не приводит. При этом все эти источники оказываются единодушны в том, что бункера и силосы рассчитываются и конструируются по совершенно различным теоретическим концепциям, описывающим их взаимодействие с сыпучей средой – в первом случае используется теория В. Ренкина, а во втором теория Г. А. Янсена. В результате получаются совершенно различные результаты, которые количественно могут отличаться в разы.

На нелогичность и противоречивость подобной ситуации обратил внимание и один из современных исследователей работы емкостных конструкций – профессор Х. Ягофаров в своей монографии [45]. Однако, никаких практических выводов и рекомендаций, к сожалению, предложено не было.

С целью отыскания хоть какого-либо прояснения ситуации авторы настоящей монографии обратился к словарям. Согласно ставшему уже классическим словарю С. И. Ожегова [68] бункеру и силосу даются следующие определения, соответственно:

«Бункер. 1. Специально оборудованное вместилище для сыпучих и кусковых материалов. 2. Бетонированное подземное укрытие, убежище»;

«Силос. 1. Сочный корм для скота – зеленые части растений (ботва, листья, стебли), приготавливаемые заквашиванием. 2. Сооружение в виде башни или ямы для хранения кормов, зерна».

В словаре русского языка [69] аналогичные определения выглядят следующим образом:

«Бункер. 1. Саморазгружающееся вместилище для сыпучих и кусковых материалов (зерна, угля и т. д.). 2. Специальное помещение на судне для хранения рейсового запаса твердого топлива. 3. Специально оборудованное подземное укрытие, убежище».

«Силос. 1. Сочный корм для скота, получаемый консервированием измельченных зеленых частей растений в специальных сооружениях (башнях, траншеях, ямах и т. п.)».

И наконец, толковый словарь [70] приводит следующие определения:

«Бункер. 1. Вмістилище для недовгого зберігання і перевантаження сипких матеріалів; може бути складовою частиною якоїсь машини (напр., комбайна). 2. У війсьній термінології – підземне сховище, вогнева точка».

«Силос. 1. Соковитий корм для худоби, що його отримують за квашуванням подрібнених кормових рослин у спеціальних спорудах (траншеях, ямах і т. ін.)».

Как видим, ясности в различие между бункером и силосом приведенные выше толкования также не добавляют.

Заметим, что согласно принятому в Украине аналогу европейских норм [41]: «1.5.37 силос: емкость с отношением высоты к диаметру  $h_c / d_c \geq 2,0$  ...», но объяснение данного коэффициента, как и в отечественных нормах, также отсутствует.

Довольно интересная мысль приводится в работе [53]. Там указывается, что как следует из ряда экспериментальных исследований, если высота столба сыпучего материала примерно в 2 раза превышает ширину дна, то давление на стенки сооружения остается далее постоянным. Таким образом, мы находим хотя бы какое-то физическое обоснование коэффициенту 2, но не 1,5 (!), приводимому, как указывалось выше, во всей отечественной нормативно-справочной литературе.

В этой же работе обращается внимание читателей еще на одну любопытную тенденцию, формирующуюся в последнее время, – тенденцию считать силосами все емкости постоянного поперечного сечения (без учета воронки), а бункерами – переменного.

Таким образом, вопрос о классификации емкостных конструкций в настоящее время является достаточно запутанным и противоречивым, что в свою очередь, находит отражение и в методологии их конструирования.

По мере накопления опытных данных и результатов различных видов исследований, среди которых и вопросы теоретического описания работы емкостей для сыпучих материалов, и особенностей их компьютерного моделирования, и вопросы взаимодействия сыпучей среды с элементами конструкции, и экспериментальные исследования, у авторов начала постепенно выкристаллизовываться идея, которая легла в основу ряда их современных исследований. Она заключается в возможности и необходимости совместного анализа с единых позиций обоих родственных разновидностей емкостных конструкций для сыпучих материалов – бункера и силоса – и ухода от какого бы то ни было их отдельного рассмотрения и, тем более, анализа по различным закономерностям. Более того, для авторов стало очевидным, что в установлении какой бы то ни было количественной классификационной границы вообще нет никакой необходимости. При этом с совершенно одинаковых позиций могут быть рассмотрены и представлены как вопросы расчета и конструирования стальных емкостей для сыпучих материалов, так и их создания и последующего использования.

Принимая это во внимание, а также опираясь на приведенные ранее аргументы, свидетельствующие о несовершенстве существующей классификации емкостных конструкций, авторам представляется необходимым и обоснованным предложить альтернативный подход к данному вопросу.

Во-первых, следует рассматривать емкостные конструкции, как самостоятельный класс строительных конструкций, осуществляющий отдельную технологическую операцию хранения различных сред, не включая их в надкласс листовых или складчатых конструкций. К таким емкостным сооружениям следует относить газгольдеры, резервуары и емкости для сыпучих материалов, в соответствии с хранимой средой.

Во-вторых, внутри подкласса «емкости для сыпучих материалов» представляется возможным выделить вертикальные и горизонтальные типы конструкций, а в каждом из них, в свою очередь, – гибкие и жесткие их разновидности.

И в-третьих, предлагается не разделять отдельно бункера и силосы, относя их к «емкостям для сыпучих материалов».

Схематически предлагаемая классификация при этом будет иметь вид, представленный на рис. 2.4.

Следует отметить, также, что в каждом из приведенных видов емкостных конструкций можно выделить их отдельные подвиды и разновидности. В частности, газгольдеры, например, по характеру работы могут быть постоянного или переменного объема; резервуары по своей внешней форме делятся цилиндрические, шаровые, каплевидные и т.д.

Таким образом, внося определенные коррективы в существующие представления о классификации емкостных конструкций, по мнению авторов настоящей монографии, удастся разрешить ряд противоречивых ситуаций, имеющих место при использовании традиционной классификации. Кроме этого предлагаемая классификация является более строгой, наглядной и, что самое важное, имеющей соответствующее аргументированное обоснование.

Авторы полностью осознают неоднозначность и сложность затронутого вопроса. Вполне возможно его неприятие в среде отечественных инженеров-проектировщиков, к которым авторы относятся с глубочайшим уважением и почтением. Однако вместе с тем хотелось бы отметить, что европейские нормативные и справочные издания [40 – 43] уже давно склоняются к подобной точке зрения, справедливо полагая, что такой классификационный подход является более универсальным и оказывается полезным во многих практических ситуациях, а также при исследовании конструкций данного типа.

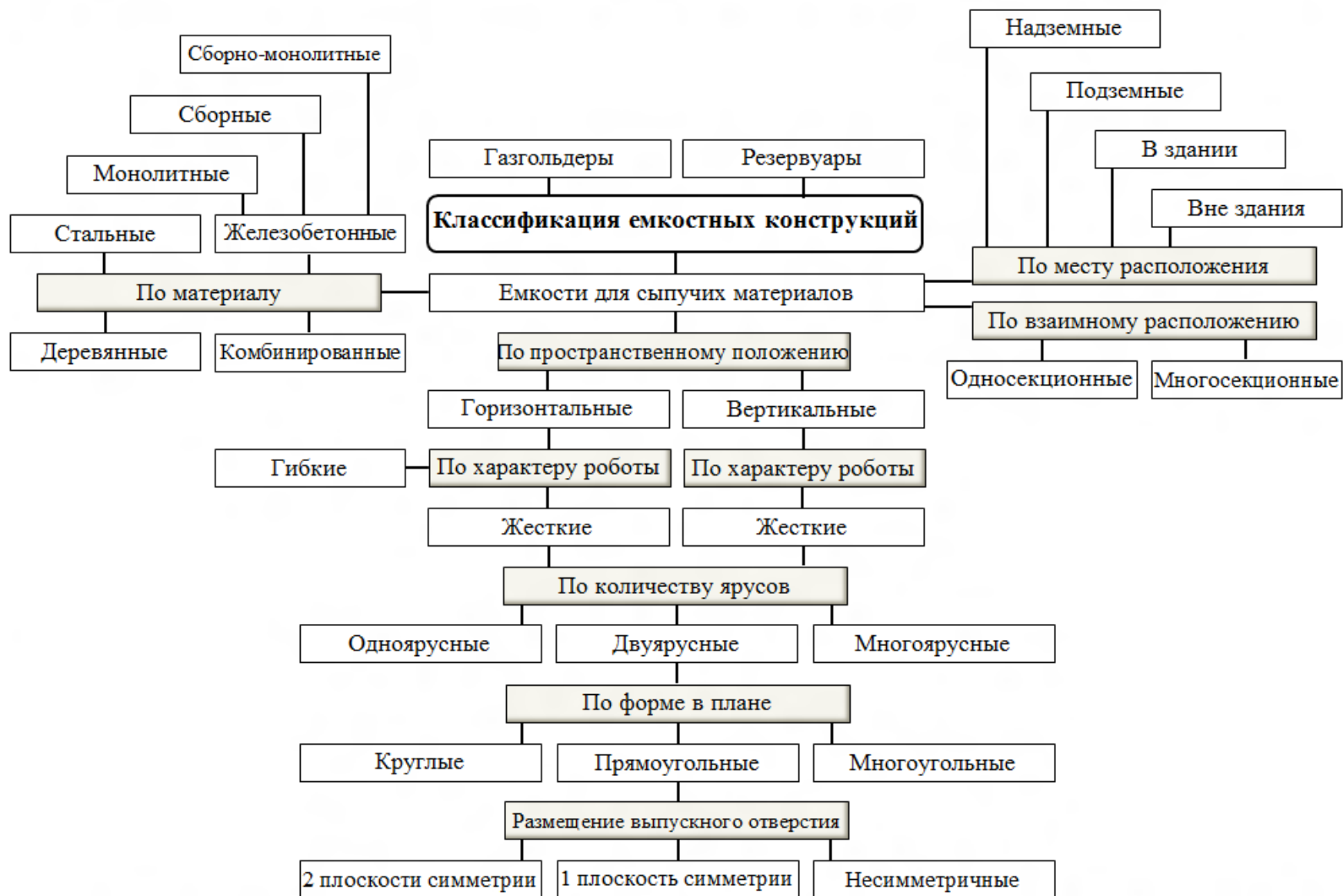


Рис. 2.4. Общая авторская классификационная схема емкостных конструкций

## 2.2. Недостатки существующего конструктивного решения

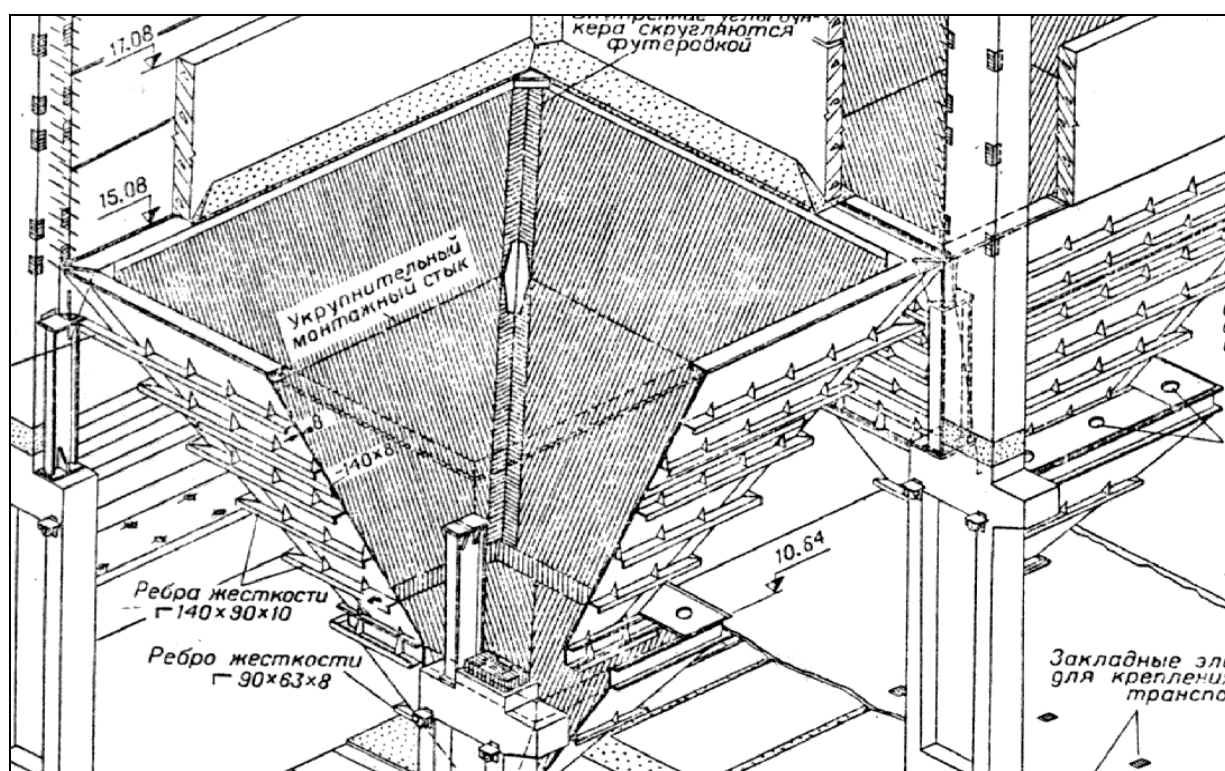
**Второе направление** совершенствования современной концепции проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов связано с необходимостью модернизации существующего конструктивного решения таких сооружений в сторону повышения их долговечности и ремонтпригодности. Дело в том, что применяемая в настоящее время конструктивная схема на основе подкрепляющих пространственную оболочку ребер жесткости, обладает рядом серьезных недостатков. Они затрудняют как изготовление, так и последующую эксплуатацию емкостей, не говоря уже об уровне их надежности.

Одним из первых недостатков следует отметить высокую неравномерность напряженно-деформированного состояния конструкции. Она связана с наличием ребер жесткости, которые подкрепляют несущую обшивку емкостного сооружения. При этом ребра привариваются к обшивке с определенным шагом, который образует своеобразные всплески напряжений по высоте обшивки. Соединение ребер между собой в углах конструкции образует дополнительные зоны высокой концентрации напряжений, в которых, как свидетельствует опыт эксплуатации, быстро развиваются пластические деформации и образуются малоцикловые повреждения.

Возможным путем устранения этого недостатка, по мнению авторов, является полный отказ от ребер жесткости. Необходимое усиление обшивки при этом должно осуществляться иным путем, с расположением элементов жесткости с малым шагом.

Второй недостаток связан с повышенным расходом материала. Он обусловлен попытками при конструировании емкостей принять такие сечения основных несущих элементов (ребер жесткости и обшивки), которые позволили бы снизить уровень напряжений в образующихся концентраторах до приемлемого уровня. При этом, поскольку зоны концентрации имеют сугубо локальный характер, а требования технологичности принуждают использование как можно меньшего количества разных типоразмеров профилей элементов, то на участках конструкции без концентраторов образующиеся запасы несущей способности могут достигать 10 раз.

Еще один недостаток – повышенная деформативность конструкции – связан с тем, что подкрепляющие ребра жесткости образуют своеобразные всплески жесткости по периметру обшивки емкости. При этом на участках между их расположением деформации оказываются довольно значительными. К тому же, поскольку во время работы сами ребра нередко испытывают деформации кручения, то приходится ставить специальные фиксирующие элементы (рис. 2.5), которые в свою очередь способствуют дополнительным расходам материала и являются чрезвычайно нетехнологическими с точки зрения изготовления конструкций.



*Рис. 2.5. Постановка противокрутильных фиксирующих элементов на ребрах жесткости емкостных конструкций*

В случае же силосных емкостей, особенно выполненных по современной конструктивной схеме с гофрированными стеновыми элементами, повышенная деформативность проявляется особенно ярко (см. п. 1.3.3) и требует просто каких-либо принципиальных улучшений.

Возможным путем устранения этих двух недостатков, как и в предыдущем случае, может быть полный или частичный отказ от усиливающих ребер жесткости и использования усиливающих эле-

ментов с более равномерным делением жесткости по длине и высоте конструкции, а также использование «слоеной» конструкции стенки из листов с различным конструктивным решением.

Следующий недостаток, связанный с большой длиной сварных швов, также является следствием использования усиливающих ребер жесткости. Не говоря о невысокой надежности такого избыточного их количества, подчеркнем, что технологичность их изготовления, а особенно проведение ремонтных работ, остается крайне низкой. Особенно сложной является замена изношенной футеровки в емкостных конструкциях. Поскольку она расположена внутри конструкции и очень часто еще дополнительно приварена к ее обшивке, то эта ремонтная операция требует подчас верха эквилибристического мастерства от рабочих-ремонтников.

В качестве возможного пути улучшения ситуации можно рекомендовать как полный или частичный отказ от использования усиливающих ребер жесткости, так и совершенствование конструкции футеровки в сторону улучшения ее, прежде всего, ремонтнопригодных качеств.

Значительная длина сварных швов ведет к еще одному существенному конструктивному недостатку – необходимости постоянного наблюдения за сварными швами, особенно расположенными под обратным углом, – достаточно сложная, длительная и неприятная ремонтно-профилактическая операция. Прибавив к этому тот факт, что эти сварные швы при эксплуатации быстро покрываются слоем технологической пыли, можно лишь догадываться о качестве выполнения подобных профилактических мероприятий и о возможности их проведения вообще.

Следующим недостатком существующей конструктивной схемы вертикальных стальных емкостных конструкций является сложность сборки и монтажа сооружения при ее значительных размерах. Наличие технологических допусков на изготовление элементов и иногда просто, даже, откровенно низкое качество и точность монтажных работ, ведут к невозможности состыковки отдельных узлов сооружения. Чаще всего это происходит в зоне соединения ребер жесткости соседних стенок емкости, что особенно опасно, поскольку именно этот узел является одним из наиболее нагруженных узлов в конструкции. Отсутствие подобной стыковки резко снижает прочностные и жесткостные качества емкостного сооружения в целом.

Возможным решением подобного недостатка является отказ от изготовления отдельных конструктивных элементов полностью, а применение, например, более мелкого членения сооружения на отдельные конструктивные элементы или блоки.

Ребра жесткости приводят к возникновению еще нескольких нежелательных с конструктивной точки зрения эффектов. Во-первых, форма их поперечного сечения является открытой, что предполагает наличием разнообразных полочек и иных выступающих элементов. Это, в свою очередь, способствует накоплению в подобных полузакрытых пространствах значительного количества технологической пыли, что ведет к повышению интенсивности коррозии как самих ребер жесткости, так и прилегающих к ним участков обшивки сооружения. Во-вторых, открытая форма профиля имеет значительную длину боковой поверхности, которая также дополнительно способствует развитию коррозионных повреждений.

Одним из известных способов избежания или снижения нежелательных последствий в подобной ситуации, является применение замкнутых профилей вместо открытых. Такая практика позволяет не только снизить уровень повреждаемости несущих элементов конструкций, но и нередко, уменьшить расходы стали.

Последним по порядку, но нередко не последним по своим последствиям, является недостаток, связанный со способствованием используемой конструктивной формы образованию сводов при выгрузке сыпучих материалов. Как показывает накопленный опыт, наиболее оптимальным с точки зрения предотвращения образования сводов является криволинейная вогнутая форма стенки нижней части емкостного сооружения. Однако существующая конструктивная схема технологически не предусматривает возможность изготовления оребренной обшивки такой формы. Более простая ломаная форма, образованная с помощью нескольких аппроксимирующих прямолинейных поверхностей вместо кривой линии, также может быть изготовлена со значительными технологическими сложностями, принимая во внимание необходимость точной подгонки отдельных конструктивных элементов друг к другу в условиях строительной площадки.

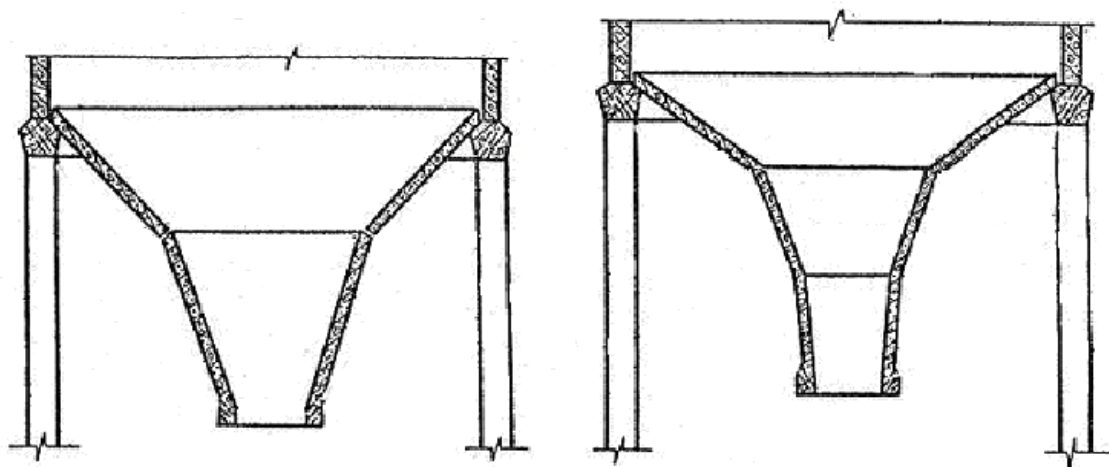
Относительно возможного направления устранения этого недостатка, можно рекомендовать использование малоразмерных несущих элементов, которые бы дали возможность формировать кон-

струкцию нижней выпускной части емкости, как например, изображено на рис. 2.6.

В пользу совершенствования существующего конструктивно-го решения емкостных конструкций для сыпучих материалов говорит и еще один довод. Так, анализируя известные выражения для индикаторов механического подобия из теории подобия [71, 72] применительно к оребренным емкостям (2.1) можно прийти к важному заключению: при увеличении размеров конструкции в  $n$  раз, напряжения в ней также возрастают в  $n$  раз, а прогибы в  $n^2$  раз:

$$F_r \cdot L_r^{-2} = \sigma_r = E_r, \quad L_r = w_r, \quad (2.1)$$

где  $F_r$  – масштаб сил,  
 $L_r$  – масштаб линейных размеров,  
 $\sigma_r$  – масштаб напряжений,  
 $E_r$  – масштаб модуля упругости,  
 $w_r$  – масштаб перемещений.



*Рис. 2.6. Ломаная поверхность выпускной части емкостной конструкции*

Это означает, что с увеличением размеров емкостной конструкции необходимо уменьшать шаг расположения подкрепляющих ребер жесткости по высоте, что в свою очередь приводит как к еще более неравномерному распределению напряжений в конструкции, так и к увеличению общей протяженности сварных швов. При этом необходимо устанавливать дополнительные ребра жесткости, являющиеся излишними с точки зрения обеспечения проч-

ностных качеств конструкции и ведущие к дополнительным затратам стали на их выполнение.

Таким образом, обобщая все вышеизложенное, по мнению авторов настоящей монографии, модернизация и совершенствование существующего конструктивного решения стальных вертикальных емкостных конструкций для сыпучих материалов должна идти в четырех основных направлениях:

- полный или частичный отказ от ребер жесткости и использования вместо них подкрепляющих элементов с более равномерным делением жесткости по длине и высоте емкостного сооружения;

- использование малоразмерных несущих элементов, которые дают возможность формировать геометрически сложные ломаные формы сооружения;

- использование для несущих конструктивных элементов закрытых профилей вместо открытых;

- совершенствование конструктивного решения футеровочного слоя с целью упрощения ее монтажа и замены при ремонте и обслуживании.

Как уже отмечалось ранее, до настоящего времени разрабатывались и продолжают разрабатываться и предлагаться самые различные способы, направленные на устранение и ликвидацию указанных недостатков существующего конструктивного решения. Попробуем проанализировать наиболее удачные из них.

При разработке новых конструкторско-технологических решений большинство специалистов сосредоточились на двух основных направлениях:

- разработка разнообразных устройств для повышения эффективности разгрузки емкости (как, например, [73 или 74]). Авторам настоящей монографии известно уже свыше 300 подобных решений, однако все они лишь косвенно способствуют улучшению ситуации, в первую очередь, со сводообразованием сыпучего материала, и к тому же создают крайне нежелательную вибрацию при эксплуатации сооружений;

- разработка легкоборных конструкций емкостей, преимущественно силосного типа, с применением гибких элементов (как, например, [75 или 76]) или простых одиночных гофрированных панелей [77]. Однако, как констатируют сами авторы большинства подобных разработок, такие конструкции оказываются непригод-

ными для промышленных предприятий с тяжелыми сыпучими материалами и химически агрессивными сыпучими веществами.

Часть исследований направлена на улучшение работы отдельных узлов емкостных конструкций. Так, специалистами Ленинградского отделения ЦНИИ Проектстальконструкция (г. Санкт-Петербург, Россия) была обоснована возможность снижения материалоемкости емкостной конструкции за счет учета упругопластической работы ее несущих элементов [78, 79]. Однако широкого распространения данное решение, к сожалению, не получило.

Специалистами проектного института «Днепрпроектстальконструкция» (г. Днепропетровск, Украина), были высказаны ряд идей, имевших отношение к ориентации подкрепляющих ребер жесткости относительно стенок конструкции. В частности, предлагалось располагать ребра независимо на каждой из стенок емкостной конструкции с разрывом в угловой зоне. По мнению авторов, это позволяет избежать возникновения нежелательной концентрации напряжений в углах конструкции, не снижая при этом ее прочностные и жесткостные качества.

Несколько иное конструктивное предложение было высказано инженерами Ленинградского отделения ЦНИИ Проектстальконструкция (г. Санкт-Петербург, Россия). Его суть заключается в использовании ребер жесткости с V-образным замкнутым профилем вместо применения традиционных открытых профилей. По мнению авторов, это способствует улучшению напряженно-деформированного состояния как самих подкрепляющих ребер жесткости, так и конструкции емкости в целом.

Из рассмотренного анализа ясно, что фактически все подобные варианты являются частичной модернизацией исходной реберной конструктивной схемы и, соответственно, им должны быть во многом присущи практически те же самые недостатки, что и традиционной схеме. Поэтому, проблема улучшения конструктивной схемы к настоящему моменту не может считаться решенной и требует внесения каких-либо принципиальных изменений в конструктивную схему.

### 2.3. Пути исследований

Отметим, также, еще три возможных направления исследований, которые так или иначе будут способствовать совершенствованию конструктивного решения стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Так, в качестве **третьего направления** следует выделить изучение взаимодействия хранимого сыпучего материала с емкостными конструкциями. Его разрешение упирается в известную неопределенность задачи нахождения распределения давления сыпучего материала на стенку в замкнутом сосуде переменного объема. Свою долю неопределенности вносит и поведение сыпучего при его истечении из такого сосуда. Кроме этого, в настоящее время недостаточно исследован сам спектр возможных воздействий загружаемого сыпучего материала на конструкцию, так неясно, например, какое влияние на распределение давления оказывает сегрегация сыпучего, его деградация и консолидация, а также иные возможные изменения в его физико-механических свойствах во время хранения и перегрузки.

Следующее, **четвертое** проблемное **направление** связано с адекватным аналитическим описанием работы емкостной конструкции. В настоящее время данный вопрос, так же как и вопрос изучения взаимодействия сыпучего материала с элементами конструкции, является достаточно сложным и многообразным. Работа конструкции как единой пространственной системы не позволяет применять упрощенные плоскоэлементные решения для оценки ее напряженно-деформированного состояния. Требуется применение иных подходов, позволяющих оценивать работу всего сооружения сразу.

И последнее, **пятое направление** связано с недостаточной изученностью особенностей реальной эксплуатации емкостных конструкций для сыпучих материалов. К настоящему времени накоплено очень незначительное количество информации, особенно задокументированной, касающейся хотя бы наиболее важных аспектов работы конструкций такого типа. К ним относятся данные о периодичности и интенсивности загрузки применительно к различным отраслям промышленности и сельского хозяйства, необхо-

димые для оценки усталостной прочности конструкции, данные об интенсивности износа футеровки и несущих элементов сооружения, в первую очередь коррозионного. Отдельную ценность представляло бы подробное фиксирование всех отказов, наблюдающихся в ходе эксплуатации сооружений.

Дальнейшее изложение материала в настоящей монографии построено по принципу рассмотрения в отдельных разделах *первых двух проблемных направлений* с описанием и анализом предлагаемых авторами подходов к его решению. Приводятся, также, ожидаемые результаты, позволяющие выполнить некоторый сопоставительный анализ эффективности каждого из подходов. Там же приведены некоторые аспекты, касающиеся *четвертого проблемного направления*.

Что касается *второго направления*, посвященного изучению особенностей поведения сыпучей среды в замкнутом сосуде, то оно по своей сути является настолько обширным и обстоятельным, что фактически составляет отдельное самостоятельное научное исследование. Его разработка потребовала не только построения и анализа теоретических моделей, но и проведения комплексных фундаментальных исследований. Полученные одним из авторов этой работы – профессором Банниковым Д.О. – результаты в данной области обобщены и представлены в виде самостоятельной работы [80].

Что касается *пятого проблемного направления*, связанного с изучением особенностей реальной эксплуатации емкостных конструкций то, к сожалению, авторы практически не имеют возможности для его разработки. Основная сложность при этом заключается в том, что значительная доля современных промышленных и сельскохозяйственных предприятий находятся в частной собственности. При этом в условиях нестабильной политической и экономической ситуации в мире, в целом, и в стране, в частности, у собственника, как правило, не возникает желание тратить ресурсы и время еще и на научно-исследовательскую деятельность. Хотя проведение именно таких мониторинговых исследований, в конечном счете, и позволило бы в дальнейшем сэкономить эти самые ресурсы и время.

## **Раздел 3. Оптимизация формы конструкции стальных емкостей**

### **3.1. Существующие рекомендации**

Несмотря на очевидную важность и практическую ценность решения проблемы рационального выбора внешней геометрической формы емкостной конструкции, ее решению на протяжении всей истории формирования и развития теории стальных емкостных конструкций уделялось исключительно мало внимания.

Одним из первых на важность данного вопроса еще в I половине XX века обратил внимание известный исследователь емкостных конструкций К. В. Алферов. В работах [81, 82] им был рассмотрен наиболее простой случай квадратного в плане пирамидально-призматического бункера. Задача была поставлена как задача отыскания формы конструкции с минимальной боковой поверхностью. На основе абсолютно верных математических рассуждений, не доведенных, однако, до логического конца, им был сделан неверный вывод о том, что минимальную боковую поверхность будет иметь емкость в виде пирамиды, то есть без вертикальной части. Тем не менее, данная идея господствовала в теории проектирования стальных емкостных конструкций примерно до конца XX века.

В работе [36] по отношению к железобетонным емкостным конструкциям приводится прямо противоположная рекомендация относительно необходимости увеличения высоты вертикальной части емкости, при этом как подтверждается в работе [23], снижается удельный расход материала. Однако никакие аналитические выражения в поддержку этого не приводятся.

В середине XX ст. была выдвинута идея об оптимизации внешней формы емкостных сооружений, как одного из методов

снижения их коррозионных повреждений [44, 83, 84]. Так, например, в работе [44, с. 306] указано, что подобный подход является «...основным способом снижения потерь металла от коррозии...». Однако конкретных количественных результатов или аналитических выражений, которые бы позволяли проектировать такие сооружения, приведено не было.

Опыт эксплуатации различных емкостных сооружений позволил выдвинуть ряду изобретателей предложения, относительно улучшения внешней формы таких конструкций. Практически все они носят эмпирический характер, то есть не имеют под собой весомого теоретического обоснования и оформлены в виде патентных решений. Так для снижения давления сыпучего материала и улучшения условий его выгрузки предлагается выполнять выпускную часть емкостных конструкций в виде гиперboloида вращения [85, 86], однолепесткового гиперболического параболоида [87] или треугольных плит, развернутых вершиной внутрь емкостного сооружения [88].

В конце XX ст. вопросы теоретической оптимизации внешней формы емкостных конструкций начал освещаться в работах известного в России исследователя по теории бункерных конструкций Х. Ягофарова [45] и его сына А. Х. Ягофарова [89]. Ими были получены выражения, позволяющие указать оптимальные соотношения геометрических размеров отдельных частей упрощенных емкостных конструкций (без разгрузочных отверстий) – квадратного пирамидально-призматического и круглого бункеров, соответственно. В качестве критерия оптимизации выбран критерий минимума расхода конструкционного материала. Полученные результаты подтвердили ошибочность вывода К. В. Алферова и позволяют с достаточной для практических целей точностью выполнять нахождение оптимального решения для рассмотренных случаев.

Таким образом, все имеющиеся на сегодняшний день теоретические исследования относительно назначения внешней формы емкостных конструкций и их геометрических размеров позволяют рассмотреть лишь некоторые частные случаи сооружений с простой геометрической формой. Для более сложных случаев сооружений, состоящих, например, из трех и более вертикальных частей или имеющих непрямолинейное очертание стенок, решения не получены.

По мнению авторов настоящей монографии, выдвинутый критерий оптимизации о минимальности боковой поверхности емкостного сооружения является достаточно удачным и вполне может быть использован для практических нужд. Именно он достаточно объективно отражает такую важную технико-экономическую характеристику любой строительной конструкции, как ее материалоемкость, поскольку весь материал как раз и оказывается сосредоточенным на боковых стенках.

### **3.2. Экономичность внешней формы**

Если попытаться проанализировать приведенные в первом разделе настоящей монографии современные наиболее часто применяемые геометрические формы емкостных конструкций для сыпучих материалов с точки зрения расхода стали (или любого иного материала, из которого может быть изготовлена подобная емкость, например, железобетона), то закономерно возникнет вопрос об их экономичности, т. е. о том, для какой же геометрической формы емкости требуется меньше материала? А, возможно, количество расходуемого материала приблизительно одинаково или вообще не зависит от соотношения форма - размеры для рассматриваемых емкостных конструкций?

Сформулированные вопросы, фактически, могут быть разделены на два самостоятельных отдельных вида. Во-первых, какая форма, круглая или многоугольная, является более предпочтительной? И, во-вторых, что более рационально, проектировать емкость меньшего размера в плане, но с высокой вертикальной частью или невысокую емкость равного объема, но занимающую бóльшую площадь?

Начнем с первого вопроса. Фактически, ответ на него известен еще из школьного курса элементарной математики: при равенстве площадей меньший периметр (а именно так звучит математическая формулировка рассматриваемой задачи) будет иметь круг. Столь простые факты авторы не считали бы необходимым излагать в данной монографии, если бы не их стремление к практически важной количественной оценке эффективности различных геометрических

форм. Проведем для этого несложные математические преобразования.

### 3.2.1. Эффективность круглой в плане формы

Первым может быть сформулирован вопрос об эффективности круглой в плане формы емкостной конструкции по сравнению с многоугольной формой, в частном случае – четырехугольной (квадратной или прямоугольной).

Рассмотрим правильный многоугольник с произвольным количеством сторон  $n$ , которое в предельном случае может равняться бесконечности, т. е. многоугольник трансформируется в круг. На рис. 3.1 для определенности приведен восьмиугольник с радиусом вписанной окружности  $R$ .

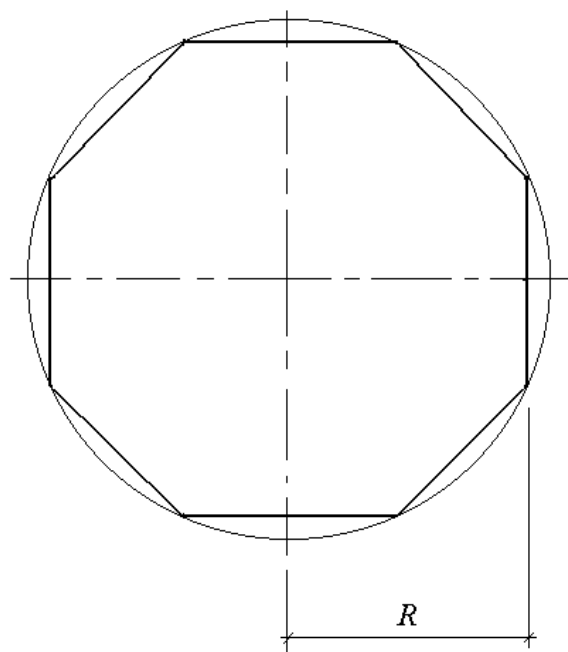


Рис. 3.1. Правильный восьмиугольник

Площадь  $A$  и периметр  $P$  правильного многоугольника определяются выражениями (3.1) и (3.2), соответственно:

$$A = n \cdot R^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (3.1)$$

$$P = 2 \cdot n \cdot R \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.2)$$

Считая площадь константой при изменении количества сторон многоугольника, выразим из выражения (3.1) радиус  $R$  и подставим в выражение (3.2). После преобразований получим функциональную зависимость  $P(n)$  в виде выражения (3.3):

$$P(n) = 2 \cdot \sqrt{A \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n)}. \quad (3.3)$$

Для отыскания многоугольника с наименьшим периметром далее необходимо взять первую производную данной функции и приравнять ее нулю. После чего можно будет убедиться в справедливости утверждения о круге, как о фигуре с наименьшим периметром (длиной окружности) при заданной площади.

Однако нас интересует иная сторона вопроса. Найдем отношение периметра многоугольника с произвольным числом сторон  $P_n$  к периметру (длине окружности) круга ( $n \rightarrow \infty$ )  $P_\infty$ . Оно представится соотношением (3.4):

$$\frac{P_n}{P_\infty} = \sqrt{\frac{n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n)}{\pi}}. \quad (3.4)$$

Далее несложно для различных значений  $n$  из натурального ряда (кроме  $n = 2$  для физически не существующего «двухугольника») рассчитать полученное соотношение. Результаты приведены в табл. 3.1.

Видно, что при  $n \geq 6$  различие в длине периметра лежит в пределах практической инженерной точности расчетов в 5 %. Для случая квадратной в плане емкости ( $n = 4$ ) потребуется почти на 13 % больше материала, чем для равной по площади горизонтального сечения круглой емкости.

Далее постараемся количественно оценить насколько прямоугольная в плане емкость оказывается более материалоемкой по сравнению с квадратной. Для этого составим выражения для определения площади  $A_k$  и периметра  $P_k$  прямоугольника, приняв соотношение между его большей  $a$  и меньшей  $b$  сторонами равным  $k$ . Получим выражения (3.5) и (3.6), соответственно:

$$A_k = k \cdot b^2, \quad (3.5)$$

$$P_k = 2 \cdot (k + 1) \cdot b. \quad (3.6)$$

Таблица 3.1

**Отношение периметра многоугольника к периметру (длине окружности) круга**

Количество сторон $n$	Отношение $P_n / P_\infty$
3	1,286
4	1,128
5	1,075
6	1,050
8	1,021
12	1,012
20	1,004

Выражая, как и ранее, из (3.5) значение стороны  $b$  и подставляя в (3.6), после преобразований получим зависимость (3.7):

$$P_k(k) = 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{1+k}{\sqrt{k}}. \quad (3.7)$$

Далее, найдем отношение периметра прямоугольника с произвольным соотношением сторон  $k \geq 1$   $P_k$  к периметру квадрата  $P_4$ . Оно представится соотношением (3.8):

$$\frac{P_k}{P_4} = \frac{1+k}{2 \cdot \sqrt{k}}. \quad (3.8)$$

В табл. 3.2 приведены результаты количественного расчета данного соотношения при различных значениях параметра  $k$ .

Из таблицы видно, что при  $k \leq 2$  различие в длине периметра практически находится в пределах инженерной точности, а при более вытянутой в плане прямоугольной форме емкости – значение монотонно возрастает, но не очень значительно.

Таблица 3.2

**Отношение периметра прямоугольника к периметру квадрата**

Параметр $k$	Отношение $P_k/P_4$
1,0	1,000
1,2	1,004
1,5	1,021
2,0	1,061
3,0	1,155
5,0	1,342
10,0	1,739

Если сравнить соотношение периметров (боковых площадей, и масс конструкций) для прямоугольной в плане емкости с отношением сторон 2:1 и круглой емкости, то при равном объеме оно составит, как нетрудно подсчитать, величину равную 1,197. Это означает, что практически в этом случае принимая прямоугольную форму емкости взамен круглой в плане еще на этапе проектирования мы тратим на 20 % больше материала. Думается, что данная цифра уже заставляет задуматься.

**3.2.2. Эффективность низкой по высоте формы**

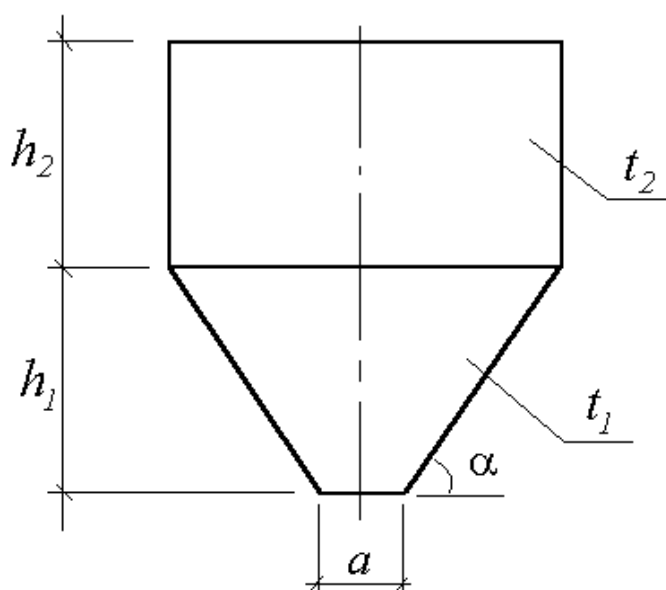
Рассмотрим емкость пирамидально-призматической формы. Ее вертикальное поперечное сечение в одной из плоскостей симметрии представлено на рис. 3.2.

Объем такой емкости  $V$  можно вычислить как сумму объемов нижней пирамидальной части  $V_1$  и верхней призматической  $V_2$ . Поскольку обе фигуры прямые и правильные, то выражение с учетом обозначений приведенных на рис. 3.2 примет вид (3.9):

$$V = V_1 + V_2 = h_1 \cdot \left( a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + h_2 \left( a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2. \quad (3.9)$$

Объем затраченного на емкость материала  $M$  будет равен произведению площади боковой поверхности каждой из частей емкости, умноженной на их толщину  $t_1$  или  $t_2$ , и определится выражением (3.10):

$$M = \frac{4 \cdot h_1}{\sin \alpha} \left( a + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_1 + 4 \cdot h_2 \cdot \left( a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_2. \quad (3.10)$$



*Рис. 3.2. Вертикальное сечение пирамидально-призматической емкости*

Математическая формулировка задачи будет заключаться в отыскании минимума этой функции двух переменных  $h_1$  и  $h_2$ . Для этого используем метод сведения к задаче об исследовании на экстремум функции одной переменной. В данном случае это может быть выполнено достаточно легко.

Выразим из выражения (3.9) величину  $h_2$ . Получим выражение для отыскания высоты вертикальной части емкости (3.11):

$$h_2 = \frac{V - h_1 \cdot \left( a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{\left( a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2}. \quad (3.11)$$

Подставив выражение (3.11) в выражение (3.10), получим функцию одной переменной  $M(h_1)$  в виде (3.12):

$$M(h_1) = \frac{4 \cdot h_1}{\sin \alpha} \left( a + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_1 + 4 \cdot \frac{V - h_1 \cdot \left( a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha}} \cdot t_2. \quad (3.12)$$

Далее, взяв первую производную, выполнив промежуточные преобразования и приравняв ее нулю, получим кубическое уравнение (3.13):

$$\begin{aligned} & \frac{t_1}{\sin \alpha} \left( a + \frac{2h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) - t_2 \left( a + \frac{4h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) - \frac{2Vt_2 \operatorname{tg} \alpha}{(a \operatorname{tg} \alpha + 2h_1)^2} + \\ & + \frac{t_2 \left( 12ah_1^2 + 4a^2 h_1 \operatorname{tg} \alpha + \frac{32h_1^3}{3 \operatorname{tg} \alpha} \right)}{(a \operatorname{tg} \alpha + 2h_1)^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.13)$$

Выполнив ряд преобразований, данное уравнение может быть приведено к классическому виду (3.14) с достаточно простыми коэффициентами при неизвестных, но сложным свободным членом:

$$\begin{aligned} & h_1^3 + (1,5a \operatorname{tg} \alpha) h_1^2 + (0,75a \operatorname{tg} \alpha) h_1 + \\ & + \frac{3a^3 \operatorname{tg}^3 \alpha (t_1 - t_2 \sin \alpha)}{8(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)} - \frac{6Vt_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha}{8(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)} = 0. \end{aligned} \quad (3.14)$$

Для решения этого уравнения будем использовать формулы Кардано [90]. Коэффициенты «неполного» кубического уравнения определяются выражениями (3.15) и (3.16):

$$p = 0, \quad (3.15)$$

$$q = -\frac{a^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 6 \cdot V \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{8 \cdot (3 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}. \quad (3.16)$$

Вспомогательный параметр  $Q$  оказывается положительным, что означает наличие у уравнения одного действительного корня и двух сопряженных комплексных корней. Нас интересует только действительный корень, который для «неполного» кубического уравнения определится выражением (3.17):

$$x_1 = \sqrt[3]{|q|}. \quad (3.17)$$

Окончательно, корень исходного кубического уравнения (3.14) определится выражением (3.18):

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{a^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 6 \cdot V \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{8 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.18)$$

Используя принятые ранее обозначения, решение (3.18) может быть переписано в виде (3.19):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.19)$$

Для отыскания величины  $h_2$  возможно использовать полученное в ходе настоящих выкладок выражение (3.11). Однако не является достаточно громоздким и может быть непосредственно использовано при проведении практических расчетов.

Используя принятые ранее обозначение выражение (3.11) может быть переписано в виде (3.20):

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot \left( a_0^2 \cdot y_1 + \frac{a_0 \cdot y_1^2}{tg \alpha} + \frac{y_1^3}{3 \cdot tg^2 \alpha} \right)}{4 \cdot \left( a_0 + \frac{y_1}{tg \alpha} \right)^2}. \quad (3.20)$$

Здесь же отметим коротко, что как показывают расчеты, выполненные в соответствии с выражениями (3.19) и (3.20), более рациональными емкостями следует считать емкости с невысокой вертикальной призматической частью. При этом для емкостей равных объемов с высокой и низкой вертикальными частями различие в затратах материала может составлять до нескольких раз.

Сделаем несколько дополнительных замечаний, относительно изложенного материала.

Во-первых, выполнив аналогичные выкладки для случая конусно-цилиндрической емкости можно получить решения, аналогичные решениям для пирамидально-призматической емкости. Они отличаются лишь одним единственным коэффициентом и имеют вид выражений (3.21) и (3.22), аналогичных выражениям (3.19) и (3.20), соответственно:

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot a_0^3 \cdot t_2 \cdot tg^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot V \cdot tg^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot tg \alpha. \quad (3.21)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - \pi \cdot \left( a_0^2 \cdot y_1 + a_0 \cdot y_1^2 / tg \alpha + y_1^3 / (3 \cdot tg^2 \alpha) \right)}{\pi \cdot \left( a_0 + y_1 / tg \alpha \right)^2}. \quad (3.22)$$

Во-вторых, в целом изложенное решение поставленной задачи методом сведения к отысканию экстремума функции с одной переменной оказывается пригодным только для случая емкостей, состоящих из двух частей. Это связано с тем, что в общем случае возможно составить лишь два выражения (для вычисления объема емкости, подобное выражению (3.9) настоящей работы, и для находж-

дения массы затрачиваемого материала, подобное выражению (3.10) настоящей работы), которые будут содержать столько неизвестных, сколько частей имеет рассматриваемая емкость. Поэтому, с математической точки зрения в общем случае свести задачу к отысканию экстремума функции двух переменных просто невозможно.

### 3.3. Модель оптимизации геометрических размеров

Подойдем теперь с более общих позиций к вопросу оптимизации геометрических размеров вертикальных емкостных конструкций для сыпучих материалов и постараемся получить некие достаточно общие закономерности, которые позволили бы ответить на поставленные в начале этой главы вопросы.

#### 3.3.1. Геометрическая модель

Рассмотрим емкость, состоящую из произвольного количества  $k$  отдельных частей, связанных конструктивно (рис. 3.3). Каждая часть представляет собой пространственную объемную фигуру, имеющую горизонтальное поперечное сечение в любом месте в виде правильного многоугольника с количеством сторон  $n$  или, в предельном случае, круга. Боковые поверхности образованы прямыми, описываемыми функцией  $R(y)$ . Вся конструкция предполагается двоякосимметричной относительно вертикальной оси  $Y$ .

В качестве заданных параметров используются следующие величины: ширина выпускного отверстия  $a$  в нижней части емкости, определяемая технологическими параметрами емкости, такими как производительность, отсутствие сводообразования и пр.; форма боковой стенки произвольной  $i$ -ой части емкости  $R_i(y_i)$ , также определяемая технологическими параметрами; толщина  $i$ -ой части емкости  $t_i$ , назначаемая в первом приближении на основе накопленного опыта проектирования (заметим, что для емкостей с оребрением боковой поверхности в качестве толщины стенки может быть принята условная величина, с учетом материала ребер жесткости). Заданными по технологическим и конструктивным сообра-

жениям предполагаются количество отдельных частей емкости  $k$  и количество сторон многоугольника в горизонтальном поперечном сечении  $n_i$ . При этом предполагается, что в каждой части может быть принята своя форма поперечного сечения, не обязательно единообразная для всей емкости. Например, воронка может быть выполнена в виде фигуры с сечением в форме круга, а следующая часть емкости – иметь поперечное сечение форме квадрата. Вопросы конструктивной стыковки таких частей в данном разделе не рассматриваются.

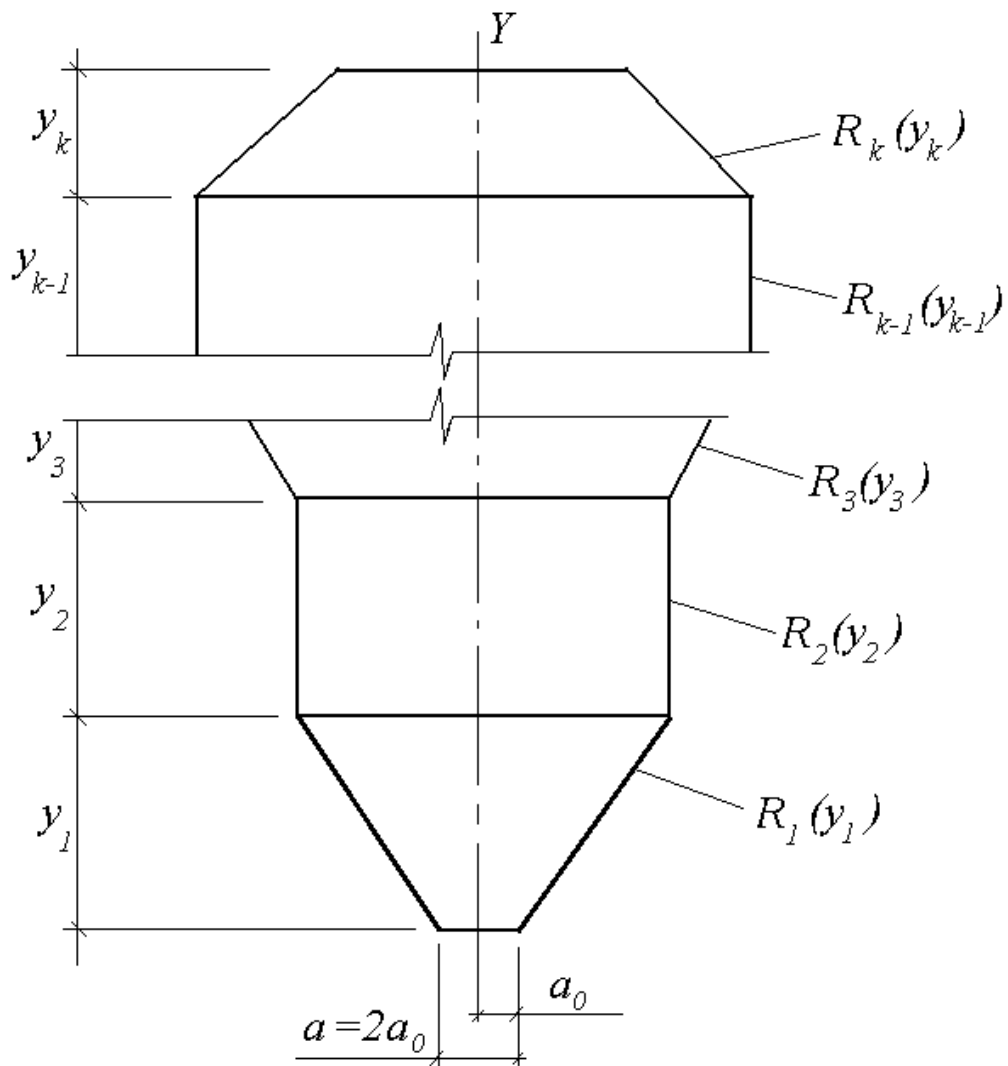


Рис. 3.3. Геометрическая модель емкостной конструкции

Еще одним заданным по технологическим соображениям параметром является объем емкости  $V$ , который и определяет возможность постановки математической задачи. Величина объема на

практике может определяться, также, и конструктивными параметрами, связанными, например, с условиями размещения емкости на территории, где предполагается проходящим технологический процесс.

Условимся, также, что в дальнейших выкладках нумерация отдельных частей емкости будет выполняться последовательно снизу вверх, начиная с нижней выпускной части (см. рис. 3.3).

### 3.3.2. Математическая модель

В ходе решения задачи требуется определить оптимальные высоты отдельных частей емкости  $y_i$  при условии получения минимальной массы сооружения.

Для количественного описания сути сформулированной задачи рассмотрим пространственную фигуру, изображенную на рисунке 3.4.

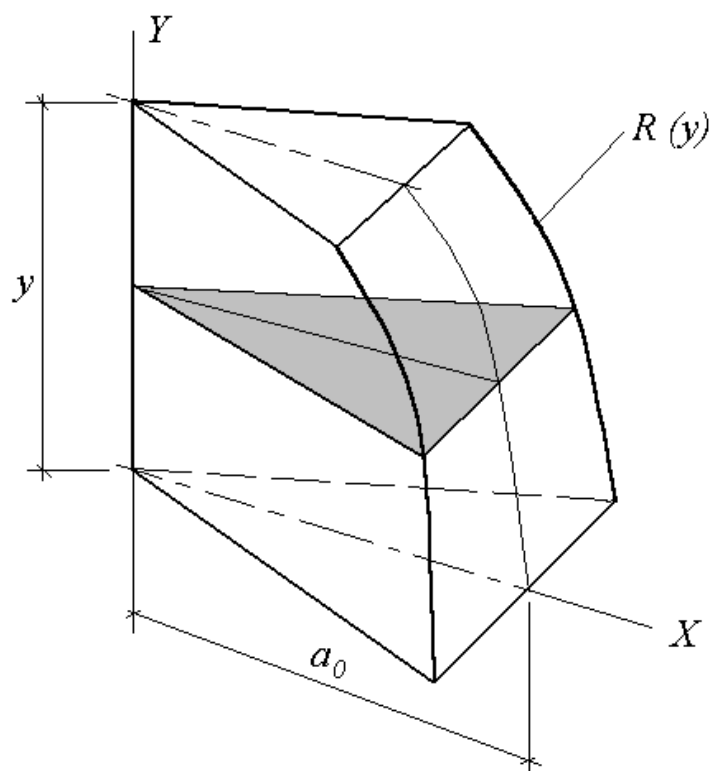


Рис. 3.4. Произвольный сегмент емкости

Она представляет собой произвольный сегмент емкости, образованный двумя горизонтальными плоскостями, ограничивающими фигуру сверху и снизу, двумя вертикальными плоскостями, выде-

ляющими сегмент из всей части емкости, а также боковой поверхностью, описываемой уравнением  $R(y)$ . Произвольное горизонтальное сечение фигуры (на рис. 3.4 показано более темным цветом) является сектором  $n$ -угольника для поперечного сечения соответствующей части емкости (рис. 3.5).

Величина радиуса вписанной окружности, необходимая для дальнейших преобразований, определяется по условию  $C(y) = a_0 + R(y)$ .

Площадь поперечного сечения фигуры (по рис. 3.3) в приведенных обозначениях будет равна  $A(y) = C^2(y) \cdot \text{tg}(\pi/n)$ . Тогда ее объем определится выражением (3.23):

$$V_1 = \int_0^y A(y) dy = \int_0^y C^2(y) \cdot \text{tg}(\pi/n) dy. \quad (3.23)$$

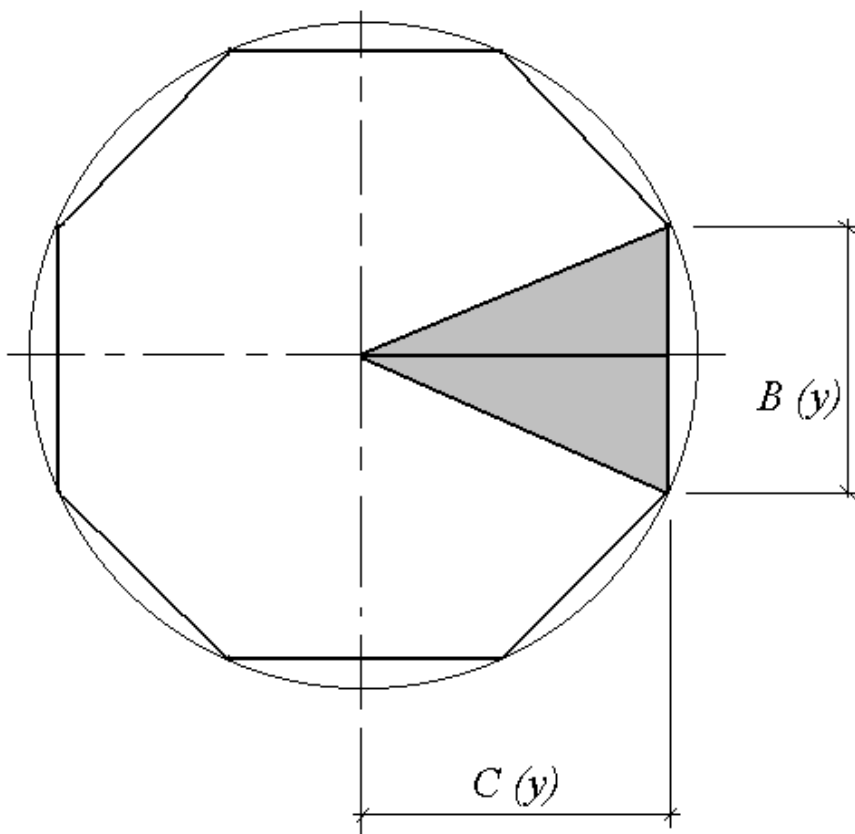


Рис. 3.5. Поперечное сечение  $i$ -ой части емкости

Соответственно, для фигуры составленной из  $n$  аналогичных сегментов объем определится выражением (3.24):

$$V = n \cdot V_1 = n \cdot \int_0^y C^2(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) dy = n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \int_0^y C^2(y) dy. \quad (3.24)$$

Рассуждая аналогично, выражение для площади боковой поверхности сегмента определится выражением (3.25), а для фигуры составленной из  $n$  аналогичных сегментов – выражением (3.26):

$$S_1 = \int_0^y B(y) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy = \int_0^y 2 \cdot C(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy, \quad (3.25)$$

$$S = n \cdot S_1 = 2 \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \int_0^y C(y) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy. \quad (3.26)$$

Масса всего сегмента будет равна площади боковой поверхности, по выражению (3.26), умноженной на толщину стенки сегмента  $t$  и определится выражением (3.27):

$$V_m = S \cdot t = 2 \cdot t \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot \int_0^y C(y) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy. \quad (3.27)$$

Для емкостей, состоящих из произвольного количества  $k$  отдельных частей, выражение для нахождения массы конструкции примет вид (3.28):

$$V_m = S \cdot t = 2 \cdot \sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \int_0^{y_i} C_i(y_i) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right)^2} dy_i. \quad (3.28)$$

Полученное выражение (3.28) и является той функцией, которая должна быть минимизирована для решения сформулированной ранее задачи об отыскании оптимальных высот всех частей емкостного сооружения.

Ограничениями при этом являются выражения, отражающие взаимосвязь отдельных частей конструкции между собой. При условии связанности частей данной условие математически запи-

шется в виде (3.29), при отсутствии такой связанности – в виде (3.30):

$$C_i(y_i) = a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j), \quad (3.29)$$

$$C_i(y_i) = a_{0i} + R_i(y_i). \quad (3.30)$$

Заметим, что в последнем случае исходная задача трансформируется в задачу отыскания оптимальных высот отдельных геометрических пространственных фигур, например, конусов или цилиндров, между собой никак не соединенных. Сформулированная математическая задача представляет собой задачу на отыскание условного экстремума при заданных ограничениях. При этом исследуемая функция является функцией нескольких переменных.

Как правило, при решении подобных задач поступают примерно следующим образом. Все ограничения вносят в исследуемую функцию и далее находят для нее условные экстремумы, пользуясь известными из курса дифференциального исчисления необходимым условием наличия экстремума. После этого найденные точки исследуют на характер экстремума, для чего используют уже достаточное условие. Основной трудностью при этом является внос ограничений в исходную функцию, доставляющий массу проблем и ограничивающий возможности исследований.

Для обхождения данной проблемы воспользуемся достаточно известным методом неопределенных множителей Лагранжа [90, 91], который является одним из частных приложений теории неявных функций. Суть метода заключается в необходимости сформировать вспомогательную функцию  $L$  в виде выражения (3.31):

$$L = F + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot O_i, \quad (3.31)$$

где  $F$  – исследуемая функция;

$\lambda_i$  – вспомогательный параметр;

$O_i$  – ограничение, записанное в виде уравнения, правая часть которого равна 0.

Поскольку в общем виде ограничений может быть несколько, то в правой части выражения (3.31) они суммируются.

Для рассматриваемого нами случая выражение (3.31) может быть записано в виде выражения (3.32), в котором исследуемая функция  $F$  опишется выражением (3.28), а ограничение будет иметь вид уравнения (3.24), записанного для конструкции емкости, состоящей из произвольного количества  $k$  частей:

$$F_m = \sum_{i=1}^k S_i \cdot t_i = 2 \cdot \sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi / n_i) \times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right)^2} dy_i + \lambda \cdot \left[ \sum_{i=1}^k n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi / n_i) \cdot \int_0^{y_i} C_i^2(y_i) dy_i - V \right] \quad (3.32)$$

Заметим, что в данной постановке задача имеет число математических смысл, поскольку получаемые решения могут быть как положительными, так и отрицательными или даже комплексными значениями. Для получения физической задачи требуется заложить в систему исходных ограничений выражения, отражающие тот факт, что получаемые решения (величины высот отдельных частей емкостной конструкции) должны быть неотрицательными. К сожалению, такие ограничения должны иметь вид математических неравенств и при использовании метода Лагранжа не могут быть учтены. Однако физически несуществующие значения могут быть легко отброшены на последующей стадии проектирования с необходимым пересчетом новых значений.

Следуя далее методу неопределенных множителей Лагранжа, для вновь сформированной функции (3.32) отыскиваем ее экстремумы. Как известно из теории математического анализа, экстремумами функции могут являться либо стационарные точки, обращающие ее первые частные производные в нуль, либо точки разрыва. Это формулировка необходимого условия.

Для функции (3.32) точками разрыва являются только те точки, в которых функция  $\operatorname{tg}(\pi / n)$  является разрывной, т.е. выполняется следующее условие (3.33):

$$\pi / n_i = \pi / 2 + \pi \cdot N, \text{ где } N \in \mathbb{Z}. \quad (3.33)$$

Математически данное выражение означает, что количество сторон в многоугольнике, являющемся поперечным сечением любой  $i$ -ой части емкости, не должно равняться числам дробного ряда  $2/3, 2/5, 2/7 \dots 2/(2 \cdot N + 1)$ . Физически такие многоугольники, естественно, не существуют, поэтому данные точки не могут нас интересовать с позиций решения поставленной задачи.

Попробуем отыскать стационарные точки. Для этого необходимо решить систему уравнений вида  $\partial F_m / \partial y_i = 0$  совместно с уравнением связи  $\partial F_m / \partial \lambda = 0$ . Для получения общего вида первого уравнения используем выражение (3.27) для случая емкости, состоящей из полностью конструктивно связанных между собой частей, которое подставляем в выражение (3.32). Далее, взяв первую частную производную по произвольному  $i$ -ому члену  $y_i$  и выполнив ряд преобразований, заключающихся в удалении нулевых членов в имеющихся суммах, а также анализе и упрощении вида интегралов и производных, получим общий вид решения в виде выражения (3.34).

Полученное выражение является достаточно громоздким и при практическом использовании требует значительной доли внимания, однако, его применение позволяет значительно сократить процесс отыскания оптимальных решений для самых разнообразных случаев, поскольку получаемые уравнения являются алгебраическими, а не дифференциальными.

Кроме этого, полученное решение является универсальным в плане возможности учета в нем самых разнообразных видов ограничивающих боковых поверхностей, которые возможно описать аналитически, а также, количества и конструктивного решения отдельных частей емкости, из которых она составлена.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_m}{\partial y_i} = & 2 \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot t_i \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j)) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dR_i(y_i)}{dy_i}\right)^2} + \\
& + 2 \cdot \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot t_m \cdot \int_0^{y_m} \sqrt{1 + \left(\frac{dR_m(y_m)}{dy_m}\right)^2} dy_m + \\
& + \lambda \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j))^2 + \lambda \cdot \frac{dR_i^2(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot y_m + \\
& + \lambda \cdot 2 \cdot \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot \int_0^{y_m} (a_0 + \sum_{l=1, l \neq i}^k R_l(y_l)) dy_m = 0.
\end{aligned} \tag{3.34}$$

Уравнение связи, фактически, представляет собой исходное ограничение, записанное в виде выражения (3.35):

$$\sum_{i=1}^k n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot \int_0^{y_i} \left( a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right)^2 dy_i - V = 0. \tag{3.35}$$

Дальнейшее решение системы уравнений вида (3.34) совместно с уравнением связи (3.35) и позволяет получить искомое оптимальное решение. Для упрощения решения может быть рекомендована процедура, заимствованная из метода неопределенных множителей Лагранжа. Ее суть сводится к отысканию вначале параметра  $\lambda$ , а затем подстановки его в выражения для отыскания значений  $y_i$ . Такой подход, как показывает накопленный авторами опыт, действительно позволяет сократить время решения.

Общего универсального решения в замкнутом виде сразу для выражений оптимальных высот  $y_i$ , по всей видимости, получено быть не может, поскольку оно определяется видом функции боковой поверхности  $R_i(y_i)$ , которое в свою очередь и определяет характер разрешения системы уравнений (3.34) и (3.35).

Отметим и еще одну особенность полученного решения: оно является лишь необходимым условием наличия экстремума. Доказательство его достаточности в общем виде является довольно сложным и в настоящей работе не приводится. Во многих случаях

по смыслу полученного решения можно оценить, является ли оно искомым минимумом, что легко может быть выполнено на практике.

### **3.4. Частные случаи применения полученного решения**

Рассмотрим применение полученного решения для ряда частных случаев, имеющих наиболее важное практическое значение. Для них достаточно просто могут быть получены готовые аналитические зависимости в замкнутом виде, позволяющие отыскать требуемые оптимальные размеры конструкции, и пригодные для непосредственного практического применения.

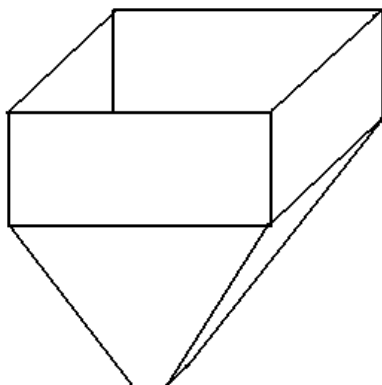
#### **3.4.1. Случай двухступенчатой емкости**

Одним из достаточно распространенных видов емкостей для хранения сыпучих материалов являются пирамидально-призматические емкости. Они представляют собой сооружение, составленное из двух частей: верхней призматической и нижней – в форме усеченной пирамиды. На практике, для возможности восприятия давления сыпучего материала, стенки стальной емкости подкрепляются горизонтальными либо вертикальными ребрами жесткости. Их учет в рассматриваемой математической модели выполняется за счет задания приведенной (увеличенной) толщины стенок.

Для данного частного случая (рис. 3.6) исходные параметры, подставляемые в общее решение, будут следующие: количество частей  $k = 2$ ; количество сторон многоугольника в поперечном сечении  $n_1 = n_2 = 4$ ; выражения, определяющие форму боковой поверхности нижней пирамидальной части и верхней призматической, будут описываться соотношениями (3.36), соответственно:

$$R_1(y_1) = y_1 / \operatorname{tg} \alpha, \quad R_2(y_2) = 0, \quad (3.36)$$

где  $\alpha$  – угол наклона стенок нижней пирамидальной части к горизонту, а  $a_0$  – половина ширины выпускного отверстия.



*Рис. 3.6. Геометрическая схема пирамидально-призматической емкости*

Величины угла  $\alpha$ , размеров выпускного отверстия  $a_0$ , толщин стенок емкости  $t_1$  и  $t_2$ , а также объема емкости  $V$  предполагаются заданными и фиксированными постоянными величинами.

Подставив все оговоренные величины в выражение (3.33) и выполнив промежуточные преобразования, получим два уравнения (3.37) и (3.38):

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot t_2 + \lambda \cdot 4 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2 = 0, \quad (3.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_m}{\partial y_1} = & \frac{8 \cdot t_1}{\sin \alpha} \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right) + \frac{8 \cdot t_2}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot y_2 + \\ & \lambda \cdot \left(4 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2 + \frac{8 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{8 \cdot a_0 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha}\right) = 0. \end{aligned} \quad (3.38)$$

Уравнение связи (3.35) для данного случая с учетом оговоренных параметров может быть преобразовано к виду (3.39):

$$\frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = 4 \cdot \left( a_0^2 \cdot y_1 + \frac{a_0 \cdot y_1^3}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) +$$

$$\left( 4 \cdot a_0^2 \cdot y_2 + \frac{2 \cdot a_0 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} \right) - V = 0 \quad (3.39)$$

Далее, решая совместно уравнения (3.38) и (3.39), может быть получено окончательное решение для отыскания оптимальной величины высоты нижней пирамидальной части, опуская промежуточные математические преобразования, в виде выражения (3.40):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot t_2 \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - a_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (3.40)$$

Соответственно, величина оптимальной высоты верхней призматической части может быть найдена из выражения (3.39) и, опуская промежуточные математические вычисления, может быть представлена в виде выражения (3.41):

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 3 \cdot V}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha + 3 \cdot K^2)}}. \quad (3.41)$$

где вспомогательный коэффициент  $K$  определяется согласно выражению (3.42):

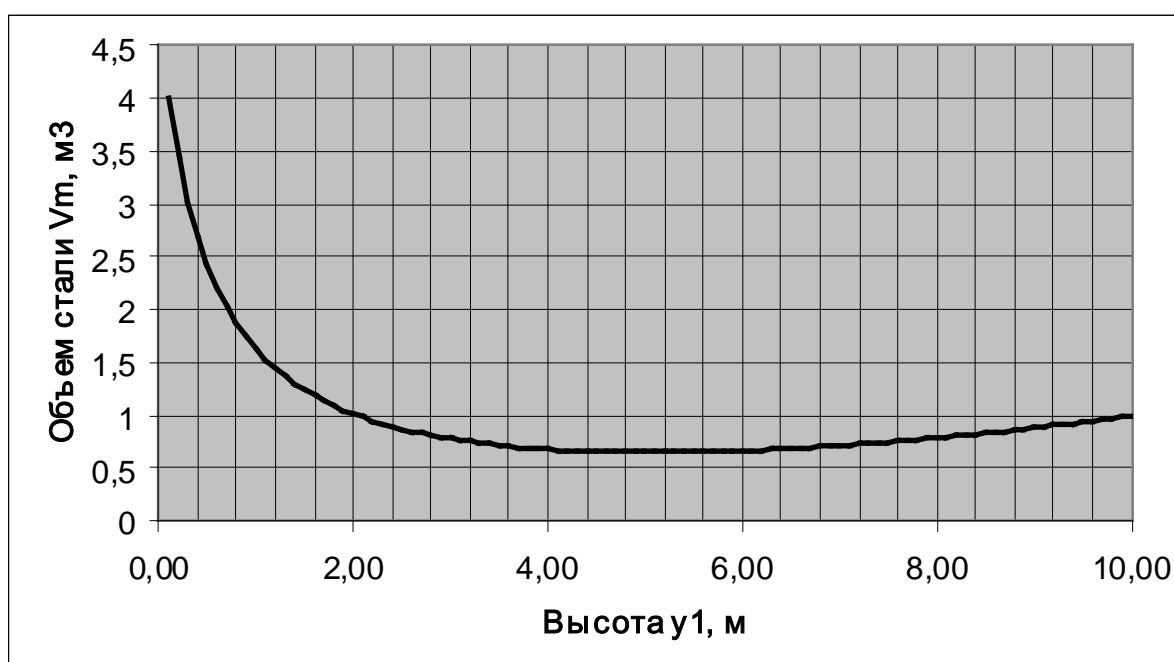
$$K = \frac{t_2 \cdot \cos \alpha}{t_1 - t_2 \cdot \sin \alpha}. \quad (3.42)$$

Заметим, также, что выражение (3.41) может быть легко приведено к виду выражения (3.43), которое совпадает с полученным ранее выражением (3.20) и является более удобным при практическом использовании.

Приведенные зависимости (3.40) и (3.41), также, могут быть представлены более наглядно в графическом виде. Для этого зада-

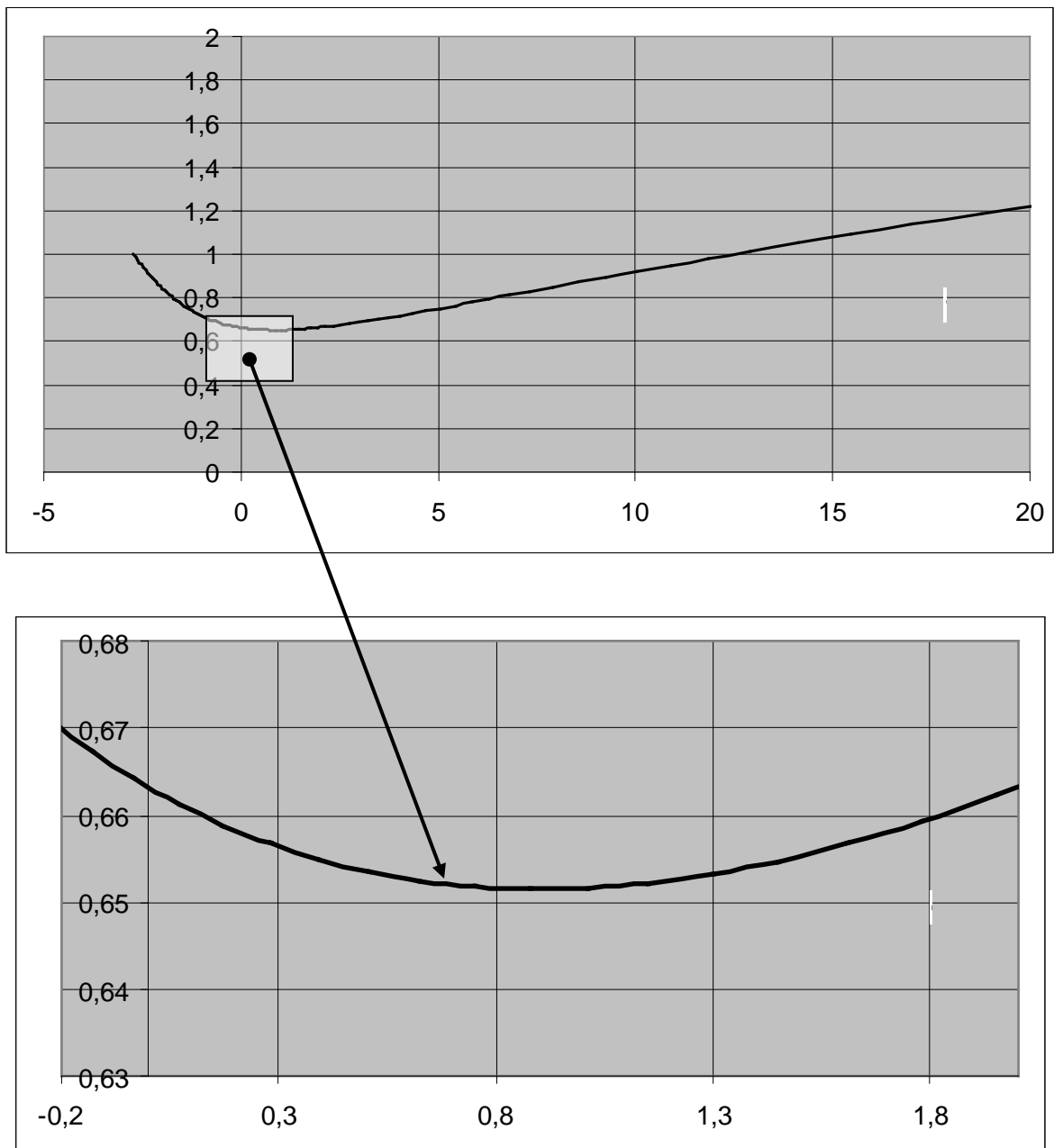
димся конкретными числовыми значениями основных параметров рассматриваемой емкости. Пусть объем ее будет равен  $V = 120 \text{ м}^3$ , толщины стенок пирамидальной и призматической частей примем одинаковыми и равными  $t_1 = t_2 = 6 \text{ мм}$ , размер выпускного отверстия  $a_0 = 0,3 \text{ м}$ , угол наклона стенок пирамидальной части  $\alpha = 60^\circ$ .

Графики зависимости объема конструктивного материала емкости  $V_m$  от величин высот нижней пирамидальной  $y_1$  и верхней призматической  $y_2$  частей представлен на рис. 3.7 и 3.8, соответственно. Они построены в одном из современных математических пакетов прикладных программ.



*Рис. 3.7. График изменения высоты пирамидальной части емкостной конструкции*

Видно, что оба графика имеют явно выраженный минимум, который в количественном отношении (с использованием выражений (3.40) и (3.41)) равен:  $y_1^{opt} = 5,17 \text{ м}$ ,  $y_2^{opt} = 0,74 \text{ м}$ . Таким образом, как уже было отмечено ранее, вывод К. В. Алферова о том, что оптимальной является пирамидально-призматическая емкость с нулевой верхней частью, не подтверждается математически (см. увеличенный фрагмент графика на рис. 3.8).



*Рис. 3.8. График изменения высоты призматической части емкостной конструкции*

Для более простого частного случая пирамидально-призматической емкости, в которой условно принята ширина выпускного отверстия  $a_0 = 0$ , решения (3.40) и (3.41) упрощаются до вида, соответственно, (3.43) и (3.44):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}}, \quad (3.43)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot y_1^3 / (3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha)}{4 \cdot (y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (3.44)$$

Заметим, также, что вычисленные значения оптимальных высот пирамидальной и призматической частей емкости по формулам (3.43) и (3.44) отличаются от результатов, подсчитанных по формулам (3.40) и (3.41), на незначительную величину:  $y_1^{opt} = 5,69$  м (против 5,70 м в подкоренном выражении формулы (2.40)),  $y_2^{opt} = 0,88$  м (против 0,74 м). Поэтому выражения (3.43) и (3.44) могут быть рекомендованы для практического использования при нахождении приближенных оценок величин искомых оптимальных высот емкостной конструкции.

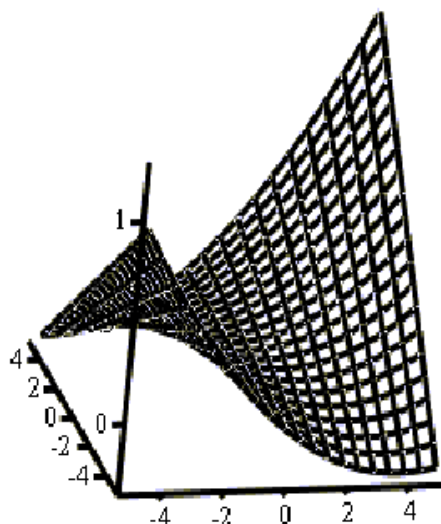
На основе приведенных на рис. 3.7 и 3.8 графиков возможно, также, достаточно просто оценить экономичность реальных проектных решений. Так, например, если конструкция пирамидально-призматической емкости будет принята с развитой по высоте призматической частью равной, допустим, 10 м, тогда высота пирамидальной части при рассмотренных ранее остальных конструктивных параметрах будет равна 2,30 м. При этом объем стали увеличится с величины  $0,65 \text{ м}^3$  (для оптимальных размеров емкости) до величины  $0,92 \text{ м}^3$ , что в процентном отношении составит приблизительно 40 %. Дальнейшее развитие вертикальной части сооружения по высоте приведет к еще более неэкономичному решению.

Интересным, также является графическое представление исследованных в данном случае зависимостей. Они приведены в проекционном виде на рис. 3.9 и 3.10.

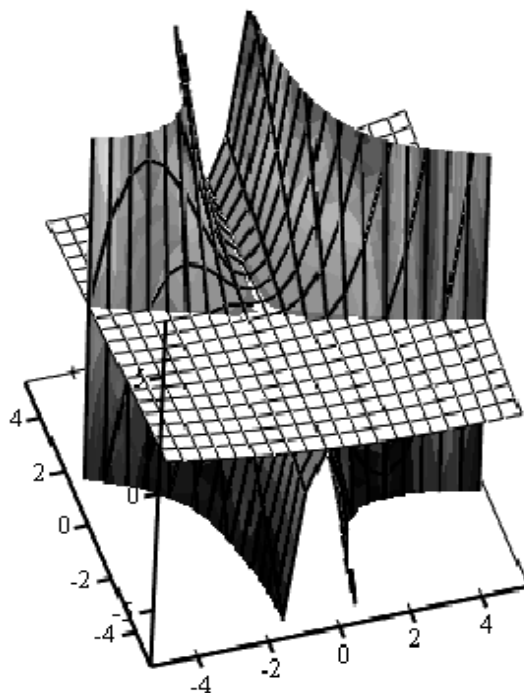
Любопытным, также, представляется проследить влияние различных параметров на изменчивость графиков оптимизации. На рис. 3.11 приведена полученная функция формы для случая пирамидально-призматической емкости при изменении параметра толщин  $\delta = t_1 / t_2$ . Для случая  $\delta = 2$  график, изображенный на рис. 3.7 приобретает вид представленный на рис. 3.11, а, для случая  $\delta = 0,5$  – рис. 3.11, б. Видно, что в последнем случае вообще не существует оптимального решения.

Еще одним интересным случаем, имеющим немаловажное практическое значение, является случай конусно-цилиндрической емкости (рис. 3.12).

Для частного случая упрощенной емкости (при ширине выпускного отверстия  $a_0 = 0$ ) выражения для оптимальных величин высот конусной и цилиндрической частей сооружения (выражения (3.45) и (3.46), соответственно) оказываются практически тождественны соответствующим выражениям для случая пирамидально-призматической емкости. Все различие между ними сводится к различию в одном коэффициенте, характеризующем количество сторон в поперечном сечении емкости.



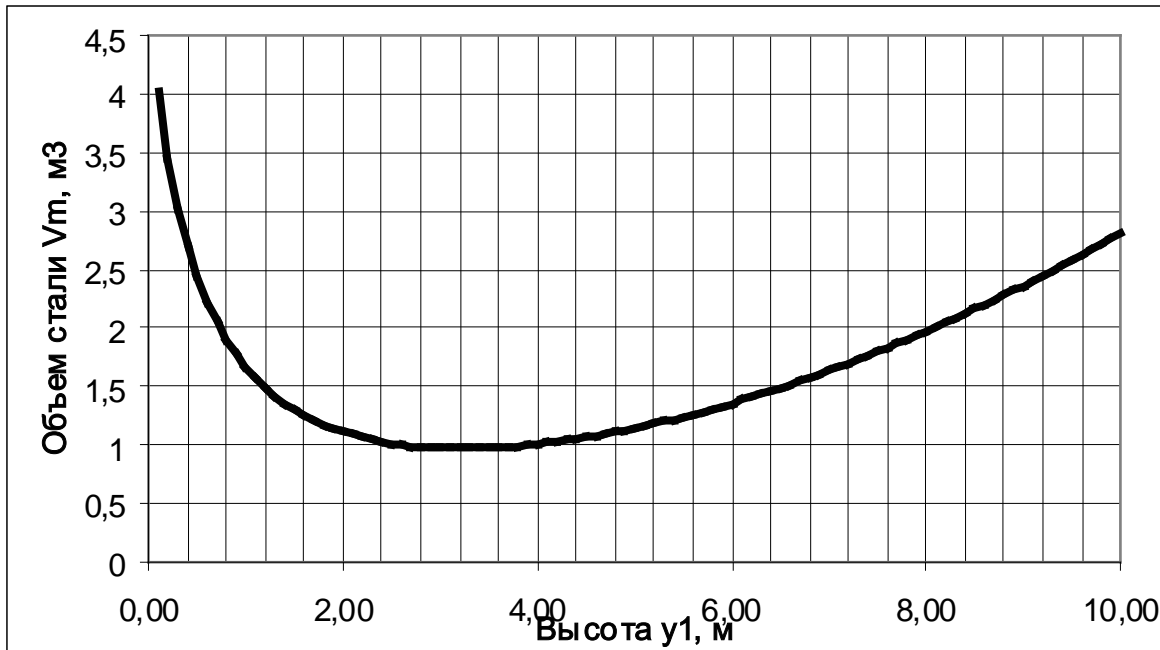
*Рис. 3.9. Графическое изображение функции формы*



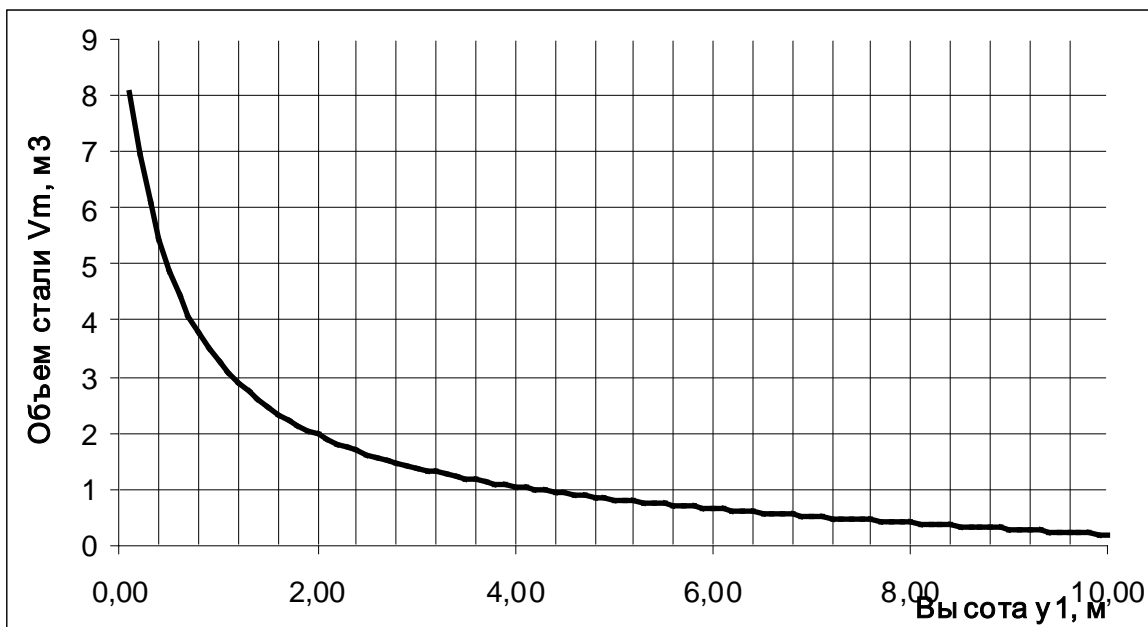
*Рис. 3.10. Графическое изображение функции формы с использованным ограничением*

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{\pi \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}}, \quad (3.45)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot y_1^3 / (3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha)}{\pi \cdot (y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (3.46)$$

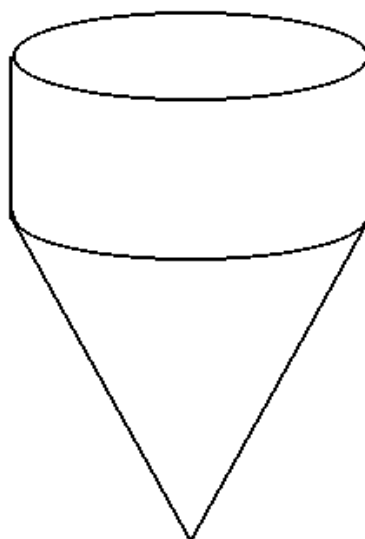


а)



б)

Рис. 3.11. График изменения высоты пирамидальной части емкостной конструкции:  
а) при  $\delta = 2$ , б) при  $\delta = 0,5$



*Рис. 3.12. Геометрическая схема упрощенной конусно-цилиндрической емкости*

Из полученных решений можно заключить, что для емкостей с количеством сторон многоугольника в поперечном сечении емкости больше четырех аналогичные решения будут заключаться в пределах, установленных полученными решениями (3.43), (3.44) с верхней стороны и (3.45), (3.46) с нижней стороны.

Так, например, для принятых ранее конструктивных параметров емкости величины оптимальных высот, рассчитанные по формулам (3.45) и (3.46) составят:  $y_1^{opt} = 6,17$  м,  $y_2^{opt} = 1,17$  м.

Как видно, границы изменения высот невелики, поэтому при проведении практических вариантных прикидочно-оценочных расчетов как для многоугольных, так и для круглых в плане емкостей вполне возможным оказывается использовать только какие-либо однотипные выражения, например, (3.45) и (3.46), как для стальной конусно-цилиндрической емкостной конструкции.

Более общим частным случаем является емкость пирамидально-призматического типа, вертикальная часть которой образует с горизонтом некоторый угол, отличный от  $90^\circ - 0 < \beta < 90^\circ$  (рис. 3.13).

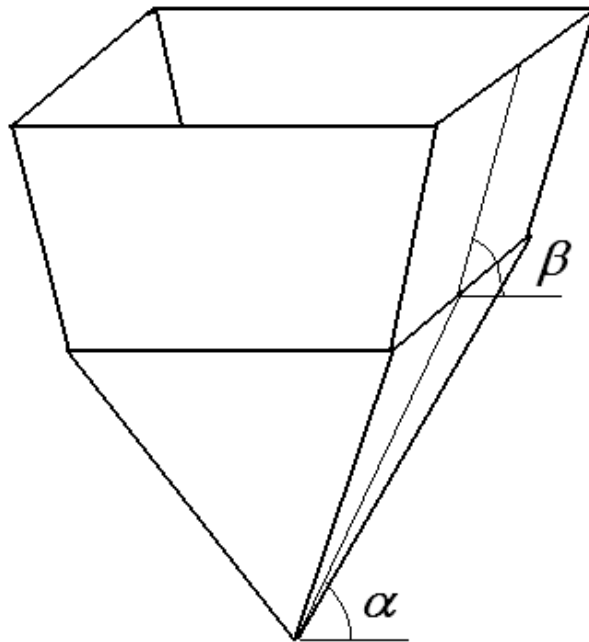
Полученные для этого случая оптимальные решения имеют вид выражений (3.47) для нижней части конструкции и (3.48) для верхней части конструкции:

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta \cdot V \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1\right)^3}{4 \cdot t_1 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^3 + 4 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}}, \quad (3.47)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}}, \quad (3.48)$$

где коэффициент  $K$  определяется выражением (3.49):

$$K = \frac{t_2 \cdot \cos \alpha - t_1 \cdot \cos \beta}{t_1 \cdot \sin \beta - t_2 \cdot \sin \alpha}. \quad (3.49)$$



*Рис. 3.13. Геометрическая схема упрощенной пирамидально-призматической емкости с неvertикальной верхней частью ( $0 < \beta < 90^\circ$ )*

В предельном случае° ( $\beta \rightarrow 90^\circ$ ) данные выражения приобретут вид выражений (3.43) и (3.44), соответственно, что дополнительно подтверждает справедливость проведенных выкладок.

Более точные выражения для случая емкости рассматриваемого типа с учетом размеров выпускного отверстия могут быть найдены согласно выражений (3.50) и (3.51) для нижней и верхней частей конструкции, соответственно:

$$y_1^{opt} = \operatorname{tg} \alpha \cdot (K \cdot y_2^{opt} - a_0), \quad (3.50)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}}. \quad (3.51)$$

Для получения аналогичных выражений для емкости конусоцилиндрического типа, вертикальная часть которой образует с горизонтом некоторый угол, больший  $90^\circ$ , достаточно заменить в выражениях (3.47) – (3.50) коэффициент 4 на  $\pi$ .

### 3.4.2. Случай трехступенчатой емкости

Для данного случая трехступенчатой емкости (рис. 3.14), в которой углы наклона сторон обшивки к горизонту равняются для нижней и верхней частей, соответственно,  $\alpha$  и  $\beta$  уравнения основной разрешающей системы, полученные из общего решения (3.34), будут иметь достаточно сложный вид выражений (3.52 – 3.55):

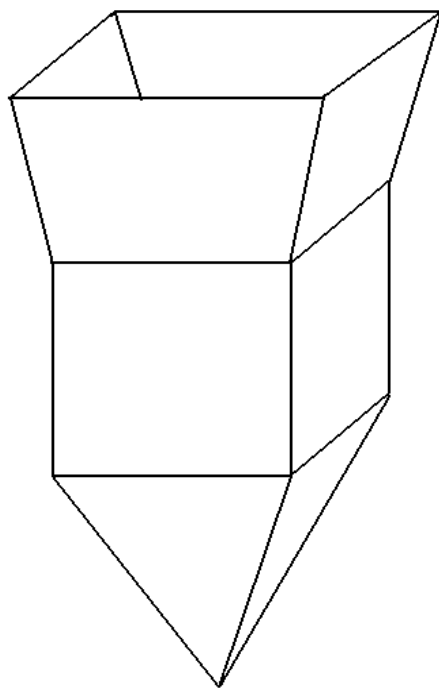
$$\frac{\partial F_m}{\partial y_1} = 8 \cdot \left( \frac{t_1 \cdot y_1}{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{t_2 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{t_3 \cdot y_3}{\sin \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) + \lambda \cdot 4 \cdot \left( \left( \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + \frac{2 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{2 \cdot y_1 \cdot y_3}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{2 \cdot y_2 \cdot y_3}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} + \frac{y_3^3}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) = 0, \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \cdot \frac{t_2 \cdot y_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \lambda \cdot 4 \cdot \frac{y_1^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} = 0, \quad (3.53)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_3} = 8 \cdot \left( \frac{t_3 \cdot y_1}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta} + \frac{t_3 \cdot y_3}{\sin \beta \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) + \lambda \cdot 4 \cdot \left( \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_3}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 = 0, \quad (3.54)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = 4 \cdot \left( \frac{y_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_3}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \right. \\ \left. + \frac{y_1 \cdot y_3^2}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} + \frac{y_3^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} \right) - V = 0 \quad (3.55)$$

Последующее решение системы этих алгебраических уравнений не представляет затруднений, особенно, если для этого использовать один из современных специализированных математических программных пакетов. С его помощью, приняв необходимые параметры равными  $\alpha = 60^\circ$ ,  $\beta = 45^\circ$ ,  $V = 200 \text{ м}^3$ ,  $t_1 = t_2 = t_3 = 1 \text{ см}$ , авторы получили следующие количественные значения оптимальных высот для заданного емкостного сооружения:  $y_1^{\text{opt}} = 6,17 \text{ м}$ ,  $y_2^{\text{opt}} = -0,29 \text{ м}$ ,  $y_3^{\text{opt}} = 1,48 \text{ м}$ .



*Рис. 3.14. Геометрическая схема упрощенной трехступенчатой емкостной конструкции пирамидально-призматического типа*

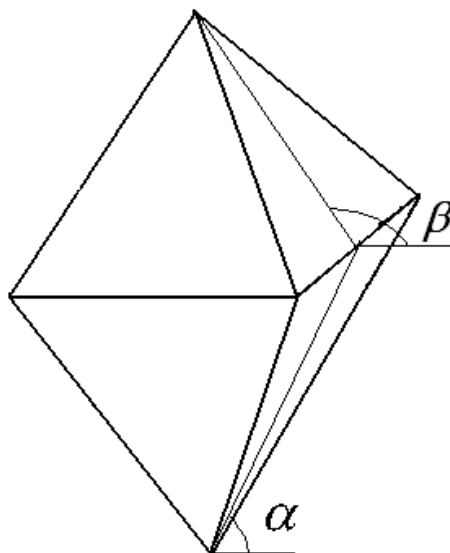
С физической точки зрения данное решение существовать не может. При этом наглядно прослеживается следствие несколько упрощенного задания исходных ограничений при формулировке исходной задачи, на что обращалось внимание в подразделе 3.3

настоящей монографии. Поэтому, предполагая монотонность изменения функции материала для параметра  $y_2^{\text{opt}}$  на участке  $0 - -0,29$ , выполним обратный пересчет для величины  $y_2^{\text{opt}} = 0$  м. При этом, безусловно, изменятся и величины двух других величин:  $y_1^{\text{opt}} = 6,43$  м,  $y_3^{\text{opt}} = 1,22$  м. Это означает, что для выбранной формы и размеров емкости наиболее рациональной с точки зрения расходов стали будет емкость без средней вертикальной части.

Такой подход оказывается достаточно удобным для практического использования, поскольку требует минимальные навыки работы за компьютером, однако дает значительный эффект, предупреждая инженера-проектировщика о возможной ошибочности его решения.

### 3.4.3. Случай парной многоступенчатой емкости

Рассмотрим случай емкости, изображенной на рис. 1.3 данной монографии. Хотя она и состоит из многих  $k$  частей, однако каждая из них представляет собой двухступенчатую емкостную конструкцию с невертикальной верхней частью. Однако в отличие от емкости, изображенной на рис. 3.13, угол наклона верхней части в данном случае будет находиться в диапазоне  $90^\circ < \beta < 180^\circ$  (рис. 3.15).



*Рис. 3.15. Геометрическая схема упрощенной пирамидально-призматической емкости с невертикальной верхней частью ( $90^\circ < \beta < 180^\circ$ )*

Полученные для этого случая решения будут иметь вид выражений (3.50) и (3.51) для нижней и верхней частей конструкции, соответственно, где коэффициент  $K$  определится выражением (3.56):

$$K = -\frac{1}{\operatorname{tg}\beta}. \quad (3.56)$$

Выражение (3.51) после соответствующих преобразований может быть приведено к виду выражения (3.57). Для случая емкости упрощенной формы (без выпускного отверстия) это выражение также упростится и приобретет вид выражения (3.58):

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg}\alpha \cdot \operatorname{tg}^3\beta + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^3\beta}{4 \cdot (\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha)}}, \quad (3.57)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^3\beta}{4 \cdot (\operatorname{tg}\beta - \operatorname{tg}\alpha)}}. \quad (3.58)$$

Заметим, что для подобного случая двухступенчатой емкостной конструкции, у которой верхняя часть наклонена под углом к горизонту больше, чем  $90^\circ$ , решение становится вырожденным и потому оказывается проще аналогичного выражения (3.46). В частности, оно перестает зависеть от толщин отдельных частей емкостной конструкции.

### 3.5. Сферы применимости полученных решений

В заключении данного раздела хотелось бы остановиться на некоторых моментах, связанных со сферами применимости полученных решений.

Во-первых, при выводе всех зависимостей данного раздела авторы преднамеренно избегали привязки к конкретному строительному материалу, из которого может быть сделана емкостная конструкция. Ведь предложенная геометрическая модель включает в

общем виде параметр толщины стенки отдельной части емкости  $t_i$ . Следовательно, все полученные на ее основе решения и установленные закономерности пригодны и могут быть использованы, как для стальных емкостей, так и для железобетонных, либо вообще выполненных из любого иного материала.

Во-вторых, если из всех полученных решений исключить параметр толщины стенки  $t_i$  ( $\delta = 1$ ), который на стадии проектирования зачастую оказывается неизвестным, то исходная задача отыскания конструкции с минимальной массой трансформируется в задачу отыскания конструкции с минимальной боковой поверхностью. Такая задача уже оказывается лишена возможного субъективизма и одновременно оказывается практически важной для конструкций, работающих в особо агрессивной внешней среде.

В-третьих, рассмотренный подход к оптимизации геометрических размеров емкостных сооружений может быть использован не только для конструкций емкостей, которые оперируют с сыпучими материалами. Он пригоден и для других видов листовых конструкций, таких как, например, воздухонагреватели, пылеуловители, скрубберы и, даже, конструкции кожуха доменной печи – рис. 3.16, которые являются оболочечными конструкциями и в которых углы наклона отдельных частей сооружения определяются соответствующими технологическими условиями.

И наконец, в-четвертых, следует обратить внимание на то обстоятельство, что исходные предпосылки представленной в данном разделе геометрической модели, а также полученные на их основе аналитические выражения, не предусматривают никаких ограничений с точки зрения размеров емкостных конструкций. Это означает, что приведенные решения пригодны как для малоразмерных сооружений, так и сооружений значительных габаритов.

## **Раздел 4. Выбор конструктивного решения стальных емкостей**

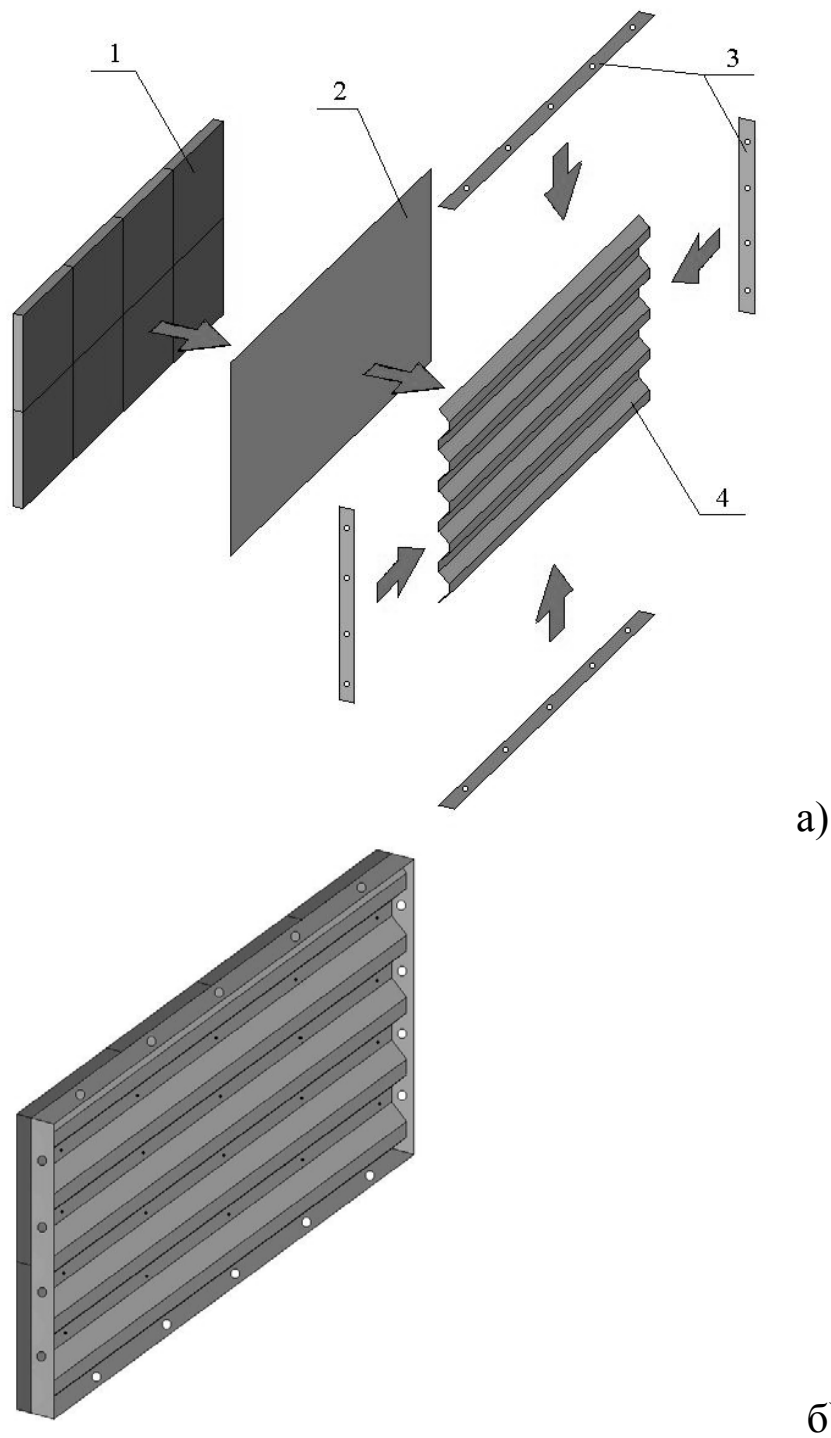
В результате детального анализа особенностей работы и эксплуатации емкостных конструкций авторами было предложено принципиально иные конструктивные решения. Они касаются как емкостей с плоскими стенками (бункерного типа в традиционной классификации), для которой предлагается панельная конструктивная схема, так и емкостей с круглыми стенками (силосного типа в традиционной классификации), для которой предлагаются новый тип гофрированного листа стенки вместе с узлом его крепления.

### **4.1. Емкость с плоскими стенками**

#### **4.1.1. Панельная конструктивная схема**

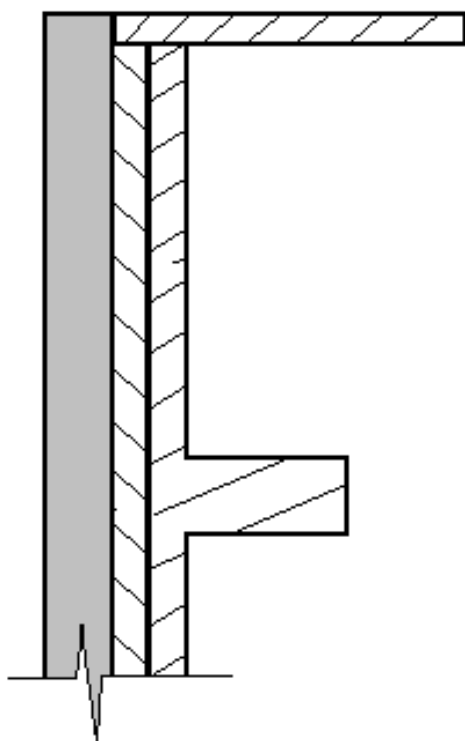
Панельная конструктивная схема предполагает формирование емкостной конструкции из отдельных независимых панелей. Конструкция предлагаемой панели приведена на рис. 4.1. Панель представляет собой составной двухслойный элемент. Наружный слой является профилированным и предназначен для восприятия нагрузки от давления хранимых сыпучих материалов. Конструктивно он представляет собой стальной лист с имеющимися усиливающими элементами. Наиболее технологичным решением в данном случае является использование цельных гофрированных стальных листов, хорошо зарекомендовавших себя в практике эксплуатации, хотя конструкции с их применением являются относительно новыми. Толщина листа при этом может колебаться от 2 – 3 мм при использовании профилей отечественного производства до 5 – 6 мм при использовании профилей заграничного производства [92]. За счет

этого удастся добиться более равномерного распределения жесткости усиливающего элемента. К тому же гофрированный профиль является закрытым, что также отвечает приведенным в разделе 2 монографии соображениям относительно улучшения существующего конструктивного решения.



*Рис. 4.1. Конструктивная схема панели (а) и ее внешний вид (б):  
1 – футеровочный слой, 2 – внутренний лист,  
3 – обвязочный элемент, 4 – внешний профилированный лист*

Заметим также, что в качестве внешнего слоя панели могут применяться и более традиционные, но менее технологичные решения. Так, возможно выполнять внешний слой из обычных плоских стальных листов, к которым прикрепляются сваркой (или болтами) ребра жесткости в виде замкнутых профилей или обычно применяемых прокатных профилей. При этом шаг ребер устанавливается расчетом и панельная схема приближается к традиционной конструктивной схеме с ребрами жесткости (рис. 4.2) и, фактически, представляет собой некоторый промежуточный вариант между традиционной конструктивной схемой и предлагаемым авторами панельным конструктивным решением.



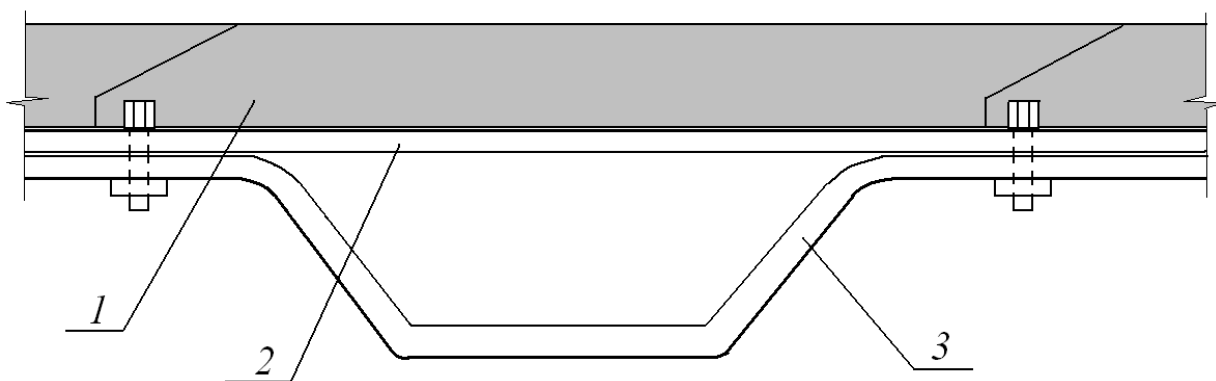
*Рис. 4.2. Внешний слой панели с усиливающими ребрами жесткости*

Внутренний слой панели представляет собой плоский стальной лист, также, небольшой толщины, порядка 3 – 4 мм. Необходимость его постановки обусловлена тем, что только наружного слоя может оказаться недостаточным для восприятия внешних нагрузок и обеспечения жесткости сооружения. Это особенно справедливо для бункерных емкостей, предназначенных для работы с тяжелыми рудными материалами. И, наоборот, в случае относительно легких сыпучих материалов внутренний слой может и не

потребоваться. В таком случае конструкция панели упрощается и становится однослойной.

Между собой наружный и внутренний слои панели соединяются с помощью промежуточных болтовых креплений, количество и несущую способность которых устанавливают соответствующим расчетом.

С внутренней стороны к панели прикрепляется футеровочный слой. Он может быть выполнен как по известным традиционным схемам, так и из современных полимерных материалов со сроком бессменной эксплуатации до 10 лет, как например, из резиновых футеровочных плит (РФП) небольших размеров, разработанных и успешно применяемых в производственной практике предприятием УНИКТИ «ДИНТЕМ» (г. Днепропетровск, Украина) [93, 94]. Болтовые крепления, служащие для соединения внешнего и внутреннего слоев панели, одновременно могут быть использованы и для крепления футеровочного слоя. При этом в случае применения РФП головка болта оказывается запрессованной в толщине плиты и не подвергается непосредственному контакту с хранимым сыпучим материалом, что предохраняет ее от преждевременного износа и коррозии (рис. 4.3).



*Рис. 4.3. Схема крепления РФП:*

*1 – футеровочный слой, 2 – внутренний плоский лист,  
3 – внешний профилированный лист*

По внешнему периметру панель усиливается обвязочными элементами, представляющими собой стальные полосы толщиной порядка 6 – 12 мм. Они прикрепляются на сварке к элементам панели и создают жесткий каркас, снижающий сдвиговые напряже-

ния по контуру. Кроме этого, обвязочные элементы являются одновременно и усиливающими конструкцию ребрами жесткости.

Размеры отдельной панели зависят от многих факторов, среди которых можно назвать вид хранимого сыпучего материала, геометрическую форму и размеры емкости, расположение панели в емкостной конструкции, и определяются соответствующими расчетами. Так, например, в малых емкостях (до 3 – 3,5 м в плане), применяемых, в основном, для перегрузочных бункеров, вся боковая стенка конструкции может представлять собой отдельную панель; в более крупных емкостях, используемых в доменном производстве, может потребоваться установка нескольких панелей по высоте сооружения.

Заметим, также, что при этом появляется возможность выполнять нижнюю пирамидальную часть емкости в виде ломаных очертаний, изменяя тем самым угол наклона к горизонту отдельных панелей. Это позволяет улучшать условия истечения материала из емкости и создает дополнительные жесткие контуры, заметно улучшающие работу конструкции. Обвязочные элементы при этом располагают повернутыми на необходимый угол, равно как и при стыковке панелей соседних стенок в углах бункерной конструкции.

Форма панели может быть принята прямоугольной для формирования вертикальной части конструкции бункера или трапециевидной – для нижней пирамидальной части емкости. Однако конструктивно они оказываются совершенно тождественны.

Соединение панелей между собой выполняется на высокопрочных болтах. Поскольку отличительная особенность этих соединений состоит в том, что оно основано на трении, возникающем между соприкасающимися поверхностями собранных элементов в результате сильного контролируемого сжатия их болтами, ослабление деталей отверстиями не имеет практического значения. Создается монолитность соединения, которая сохраняется, как свидетельствует опыт на протяжении всего периода эксплуатации конструкций [95].

#### **4.1.2. Узловые решения**

Отдельным аспектом при создании емкостных конструкций с подобной панельной конструктивной схемой является организация надежного, долговечного и высокотехнологичного стыкового узла,

а также его защита элементами футеровки от абразивного и иного негативного воздействия сыпучей среды. Возможным вариантом в этом случае может являться авторский вариант, приведенный на рис. 4.4. При этом футеровка может быть выполнена по навесной схеме, что не только повышает ее ремонтпригодность, но и улучшает технологичность сборки и эксплуатации емкостных конструкций (рис. 4.5).

Таким образом, разработанная авторами панельная конструктивная схема жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, оказывается лишенной большинства недостатков, присущих традиционной конструктивной схеме и, кроме этого, имеет ряд существенных преимуществ, среди которых следует отметить следующие:

- повышение ремонтпригодности конструкции, за счет возможности в короткие сроки и технологически несложно произвести замену поврежденной панели;

- возможность изготовления панелей в условиях завода, что существенно повышает их качество и позволяет снизить вероятность ошибок при монтаже;

- упрощение сборки бункерных емкостей на монтажной площадке;

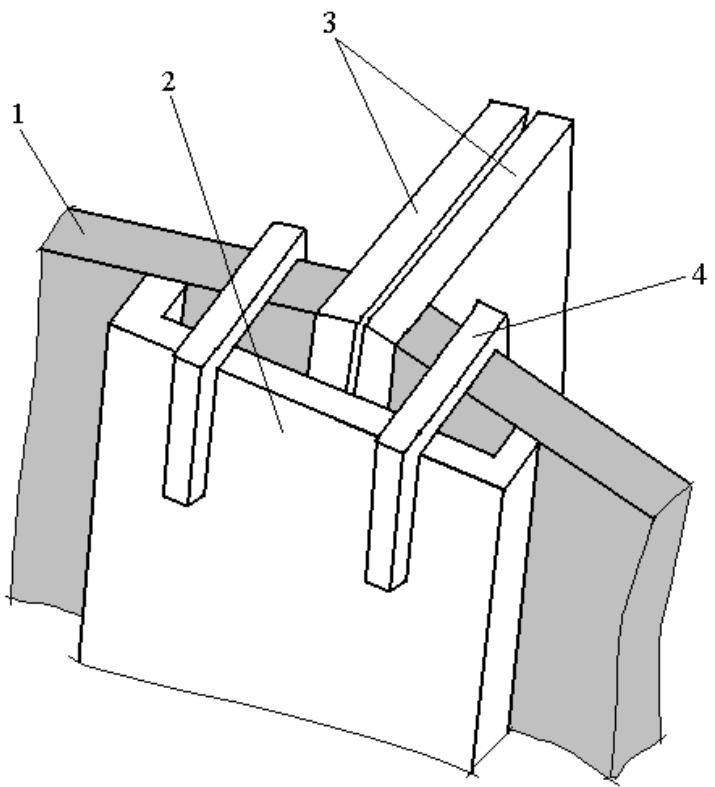
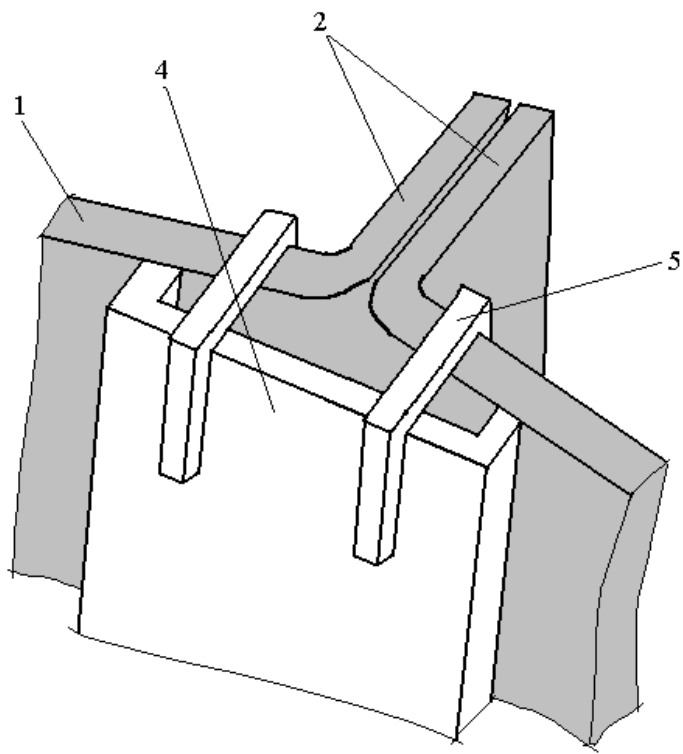
- существенное снижение общей протяженности сварных швов в конструкции, особенно в случае применения цельных гофрированных листов;

- возможность предварительной проработки конструктивного решения панели под различные виды сыпучих материалов и условий работы, включая наличие агрессивной внешней среды;

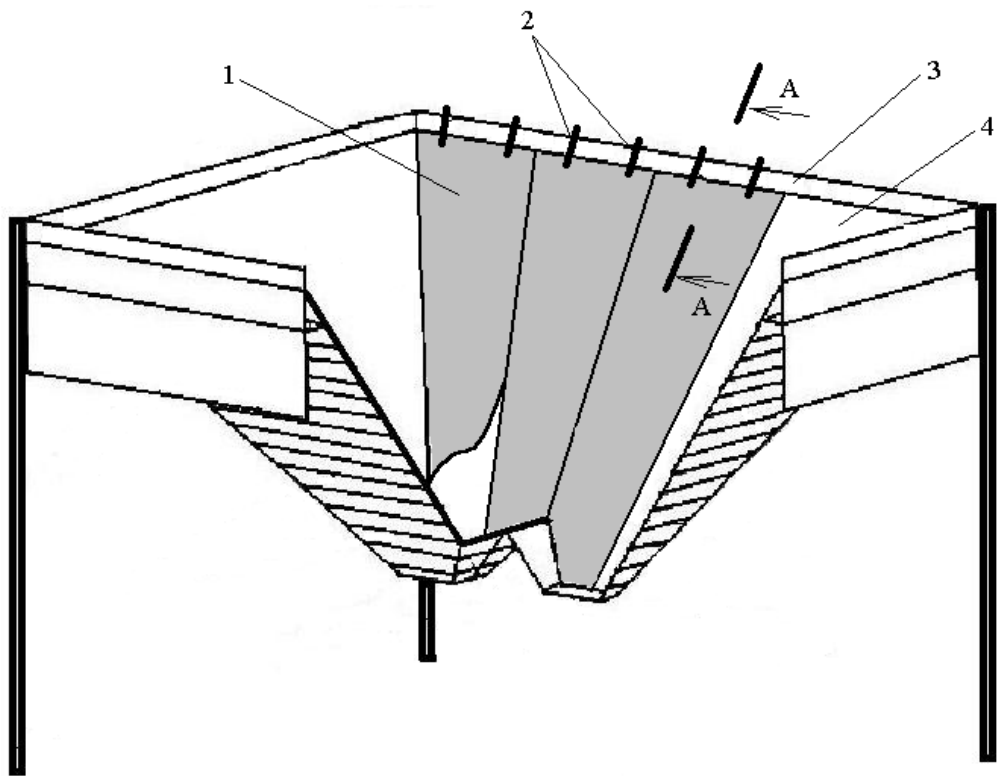
- возможность ориентации элементов внешнего слоя панели под углом к горизонту, что ухудшает условия скопления на его поверхности производственной пыли и снижает вероятность возникновения и развития коррозионных повреждений;

- повышение эстетических качеств конструкции емкости.

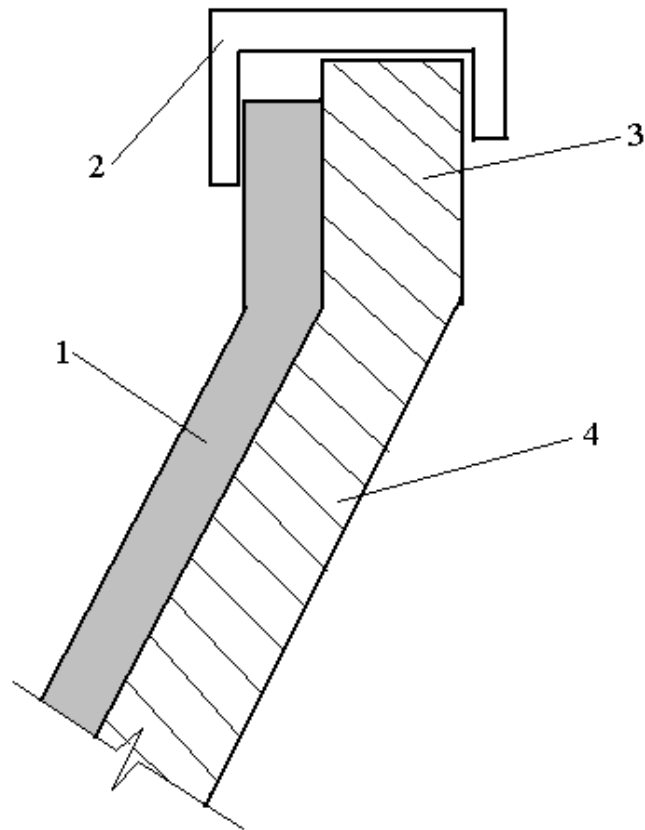
Кроме этого, для емкости, выполненной по панельной схеме, распределение напряжений в конструкции, как будет показано далее в следующем разделе настоящей монографии, оказывается гораздо более равномерным, практически отсутствуют зоны их резкой концентрации, характерные для традиционной конструктивной схемы.



*Рис. 4.4. Возможные варианты  
 вертикального узла соединения панелей:  
 1 – несущий элемент панели, 2 – отгиб,  
 3 – дополнительный элемент, 4, 5 – навесной защитный вкладыш*



a)



б)

*Рис. 4.5. Общий вид (а)  
и схема расположения (б) навесной футеровки:  
1 – элемент навесной футеровки, 2 – крепящий захват,  
3 – вертикальная часть емкости, 4 – наклонная часть емкости*

Предложенные профессором Банниковым Д.О. технические решения защищены декларационными патентами Украины [96 – 98] и могут уже сейчас с успехом применяться для создания более экономичных со всех точек зрения, более надежных и долговечных вертикальных жестких стальных емкостей для сыпучих материалов.

## 4.2. Емкость с круглыми стенками

### 4.2.1. Новый гофрированный профиль

На сегодняшний день существует проблема выбора рационального типа сечения гофрированного листа для восприятия действующих нагрузок при одновременном уменьшении его материалоемкости и расходов на его изготовление. Анализ продукции современных зарубежных и отечественных производителей стальных емкостей обнаружил, что существует множество вариантов профилей гофра для стенки силоса. Для их сравнительного анализа были рассмотрены профили с одинаковой высотой гофра (44 мм), длиной волны (138 мм) и толщиной листа (1 мм) – рис. 4.6.

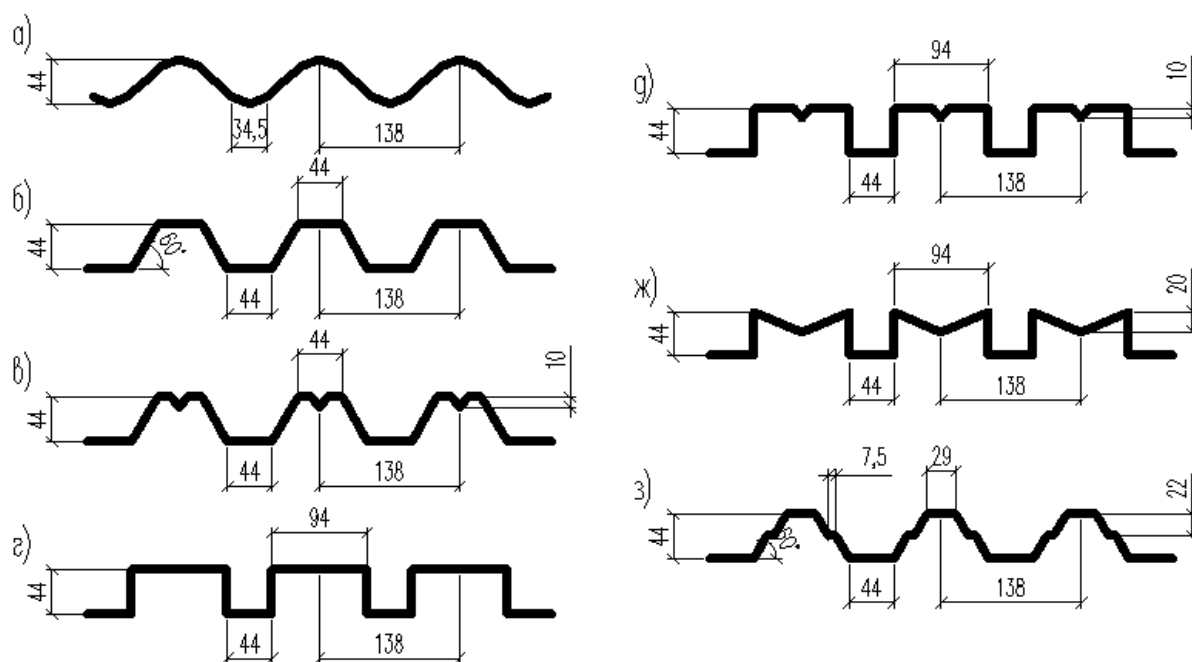










Рис. 4.6. Рассмотренные типы гофрированных профилей

Для каждого из этих типов профилей были вычислены основные геометрические характеристики, играющие наибольшую роль при работе емкостных конструкций под нагрузкой – площадь поперечного сечения  $A$  и момент в горизонтальном направлении  $W$ . Рассматривалась одна волна гофра. Также был дополнительно вычислен параметр  $\rho = W / A$ , характеризующий эффективность использования профиля. Полученные результаты приведены в табл. 4.1.

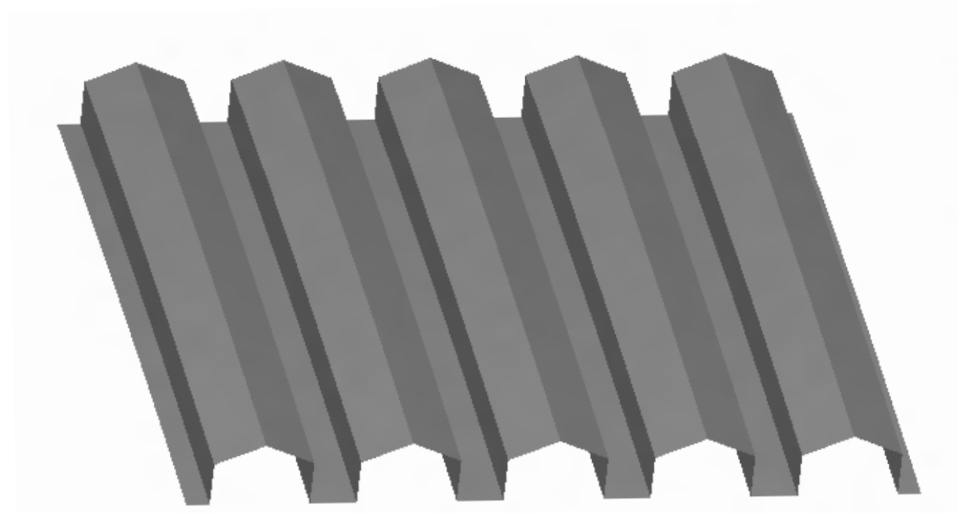
В процессе совместной работы авторов был разработан новый тип профиля для емкостных конструкций, обладающий более высокой эффективностью использования (в табл. 4.1 профиль № 8). Он позволяет обеспечивать необходимую прочность с меньшей толщиной металла по сравнению с традиционными волнистым и корытным профилями, применяющимися в силосных емкостях.

Таблица 4.1

**Геометрические характеристики гофрированных профилей**

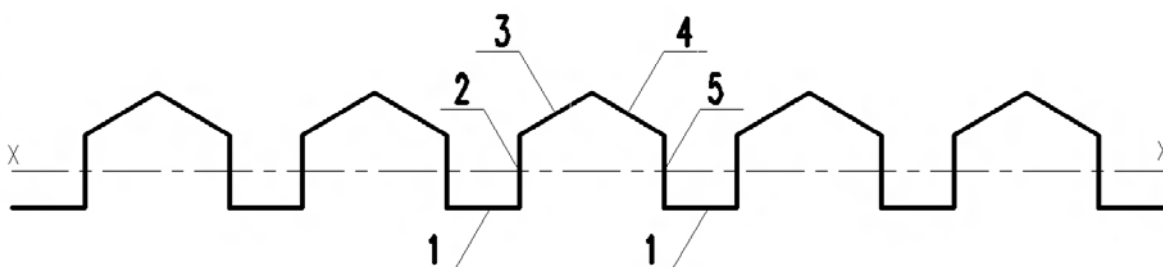
№ п/п	Тип профиля	Площадь сечения, $A$ , см <sup>2</sup>	Момент сопротивления, $W$ , см <sup>3</sup>	Коэффициент эффективности, $\rho$
1		1,666	1,502	0,902
2		1,892	2,619	1,384
3		1,992	2,570	1,290
4		2,260	2,764	1,223
5		2,360	2,725	1,155
6		2,342	2,260	0,965
7		1,892	2,108	1,114
8		2,342	3,705	1,582

Такой профиль, содержащий систему выполненных по площади листа гофр, имеет прямоугольное их сечение по всей длине стального листа и отличается от наиболее близкого корытного профиля (№ 3) тем, что усиливается изгибом одной из полок в виде двухскатной крыши (рис. 4.7). Выполнение изгиба подобной формы обеспечивает конструкции повышенную несущую способность и жесткость.



*Рис.4.7. Аксонометрическое изображение нового профиля*

На рис. 4.8, приведенном ниже, видно, что каждый гофр такого профиля состоит из системы пластин, в которых параллельно оси  $x-x$  расположены пластины позиции 1. В перпендикулярном направлении от пластин 1 размещаются пластины 2 и 5. Пластины 2 и 5 соединяются между собой пластинами 3 и 4, которые размещаются с наклоном относительно оси  $x-x$  в зеркальной ориентации друг к другу и образуют сечение, подобное абрису крыши двускатного дома. Угол наклона пластин 3 и 4 одинаковый и может варьироваться в зависимости от параметров предполагаемого сыпучего материала и сферы его использования.



*Рис. 4.8. Общий вид поперечного сечения конструкции профиля повышенной жесткости*

Конечно, по сравнению с корытным профилем материалоемкость отдельного гофра несколько увеличивается, но с учетом того, что новый профиль дает возможность уменьшить толщину самого металла не меняя при этом несущую способность конструкции, материалоемкость всей конструкции в общем уменьшается.

Профилированный лист прост в монтаже, надежный в эксплуатации и может быть изготовлен в условиях современного промышленного производства с использованием стандартного оборудования, стандартных материалов и комплектующих. Авторами подана патентная заявка на гофрированный профиль нового типа.

#### 4.2.2. Узловое крепление

При использовании гофрированного профиля нового типа отдельным вопросом является возможность обеспечения надежного стыкового узла крепления листов между собой. Основная сложность при этом заключалась в том, что стандартный типовой узел для подобных конструкций не может быть использован, поскольку в данном случае не хватает достаточного расстояния для размещения шапки болта.

Вероятным решением в этом случае может являться предложенный ниже на рис. 4.9 вариант, который улучшает технологичность сборки и повышает ремонтпригодность конструкции узла и сооружения в целом.

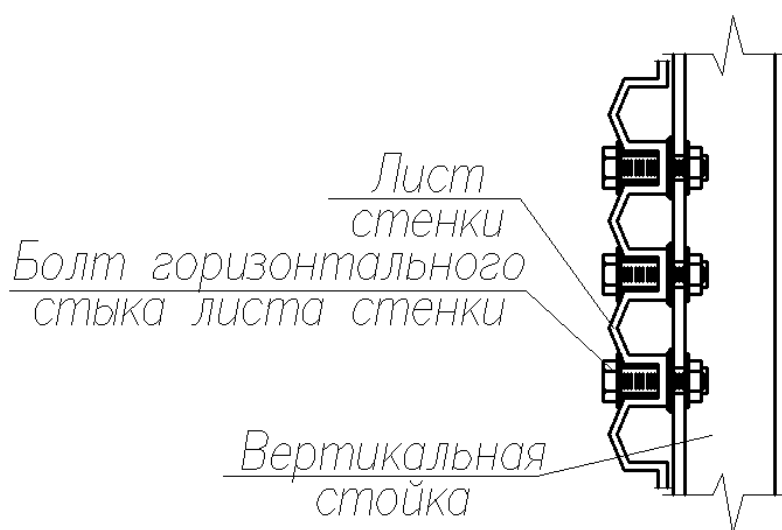
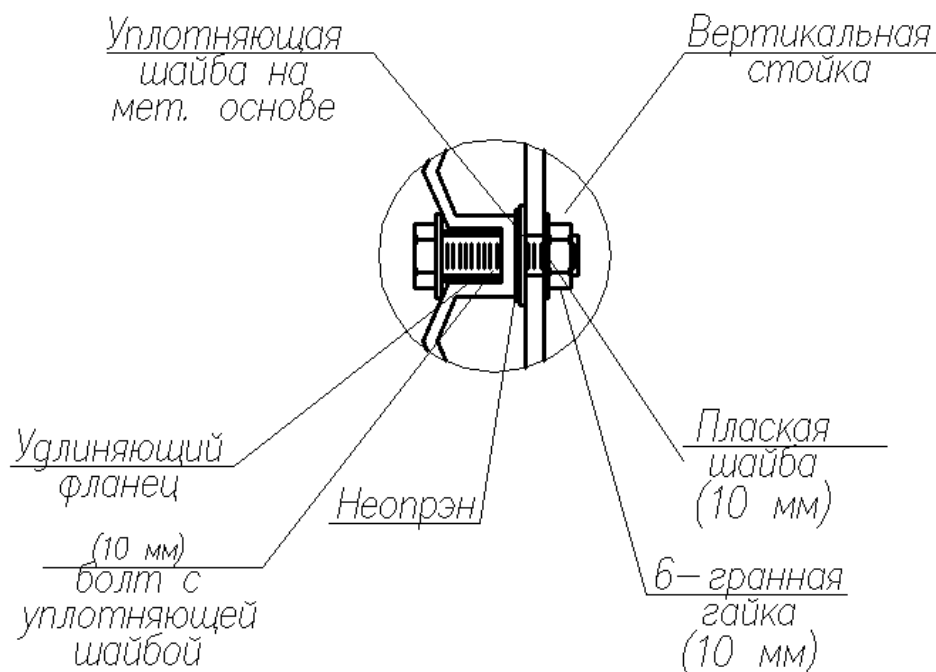


Рис. 4.9. Общий вид стыкового крепления гофрированных листов

Особенность этого узла заключается в том, что для обеспечения надежной работы соединения и корректной передачи усилий на стальные листы используется болт совместно с удлиняющим фланцем (рис. 4.10).



*Рис. 4.10. Стыковой узел крепления гофрированного профиля нового типа*

Данное решение также патентуется авторами, и может с успехом применяться в практике для проектирования и строительства более экономичных и менее материалоемких конструкций для сыпучих материалов.

## **Раздел 5. Теоретические исследования работы стальных емкостей**

### **5.1. Существующие аналитические подходы**

Расчет вертикальной жесткой стальной емкости для сыпучих материалов – достаточно сложный процесс, который включает анализ работы пространственных тонких оболочек и оробренных пластин. Потому господствующий в настоящее время подход к расчету таких сооружений в отечественной нормативно-справочной литературе, как уже отмечалось ранее, предполагает рассмотрение конструкции как системы несвязанных геометрически простых конструктивных элементов [33 – 38].

Накопленный опыт аварий и отказов емкостных конструкций, часть которого отражена в первом разделе настоящей монографии, постепенно приводил к мысли, что проводимые исследования нужно переориентировать на изучение пространственной работы конструкций емкостей для сыпучих материалов, поскольку именно такое направление могло объяснить причины отклонений экспериментальных результатов от теоретических, а также фиксируемые аварийные ситуации.

Это направление достаточно активно начало разрабатываться одним из современных теоретических исследователей бункерных емкостей Х. Ягофаровым, чьи работы уже упоминались в ходе предыдущего изложения [45]. Ему удалось частично решить проблему учета пространственной работы конструкции пирамидально-призматического бункера за счет использования вертикальной жесткости стенок воронки. Однако она предусматривает постановку снова-таки подкрепляющих ребер жесткости.

Широкое распространение в конце XX века одного из современных численных методов строительной механики – метода ко-

нечных элементов (МКЭ) [99 – 101] – открыло новые возможности для исследователей. С его помощью начали рассчитываться множество сложных пространственных конструкций, аналитическое описание работы которых оказывалось затруднительным.

Приоритет, по данным авторов настоящей монографии, в использовании МКЭ к моделированию емкостных конструкций для сыпучих материалов принадлежит работе [102], в которой исследователи анализировали влияние температурных воздействий на бункерные сооружения.

В своих предыдущих исследованиях профессор Банников Д.О. впервые использовал МКЭ для установления закономерностей пространственной работы стальных бункерных емкостей [2] под действием сыпучей среды. Им была разработана методика использования этого метода для конструкций такого типа, исследованы ее возможности, а также, установлены определенные закономерности пространственной работы бункерных емкостей, указано на их основные конструктивные недостатки и приведены некоторые рекомендации по поводу возможности их устранения.

Интересные работы в данном направлении применительно к исследованию работы круглых бункерных емкостей принадлежат А. Х. Ягофарову [89]. В них, также, достаточно четко прослеживается общая направленность на изучение работы конструкции как пространственной структуры и в связи с этим была обоснована идея учета в работе конструкции несущей способности хранимого сыпучего материала.

Отметим, что в последнее время МКЭ начал применяться не только для моделирования работы бункерных емкостей, но и силовых. В работе [103] проанализирован целый элеваторный комплекс и установлены закономерности распределения усилий в его несущих элементах.

## **5.2. Численные исследования**

МКЭ в настоящее время оказывается, пожалуй, единственным приемлемым методом, позволяющим не только учесть пространственность работы сложных строительных сооружений, к которым

относятся и емкостные конструкции для сыпучих материалов, но и использовать современные достижения в области компьютерной техники. Поскольку МКЭ является уже достаточно апробированным методом строительной механики и авторы настоящей монографии используют его уже на протяжении довольно значительного периода времени, то именно МКЭ был выбран для проведения ряда численных исследований. При этом использовался один из достаточно мощных и современных проектно-вычислительных комплексов, практически реализующих МКЭ, – комплекс SCAD for Windows [104]. Заметим, что этот комплекс оказался единственным из всех представленных на рынке программных продуктов, позволивших обеспечить проводимые автором исследования в полном объеме.

### **5.2.1. Работа отдельной панели**

Прежде всего, необходимо представить работу отдельной панели, описанной в предыдущем разделе данной монографии, изучить ее основные особенности и закономерности. Для этого был выполнен ряд конечно-элементных расчетов. Они приводятся далее в последовательности, иллюстрирующей постепенное развитие панельной схемы и ее доведение до практически реализуемого вида.

Первоначально была рассмотрена панель традиционной конструкции. Фактически она представляла собой элемент обшивки, соответствующий традиционной конструктивной схеме. Размеры фрагмента были выбраны такими, чтобы с одной стороны было возможно проследить особенности напряженно-деформированного состояния (НДС) такого элемента, а с другой стороны – в дальнейшем перейти к анализу работы панели с аналогичными размерами. Это позволило более корректно сопоставлять полученные результаты. Окончательно были приняты габаритные размеры моделей во всех случаях –  $4 \times 6$  м.

Панель загружалась равномерно распределенным по всей рабочей поверхности давлением, моделировавшим давление сыпучей среды. Закрепление принималось шарнирным по внешнему периметру модели. Дискретизация выполнялась согласно более ранним авторским разработкам [2].

На рис. 5.1 приведено НДС фрагмента оробренной стенки традиционной конструкции. Видно, что оно отличается достаточно

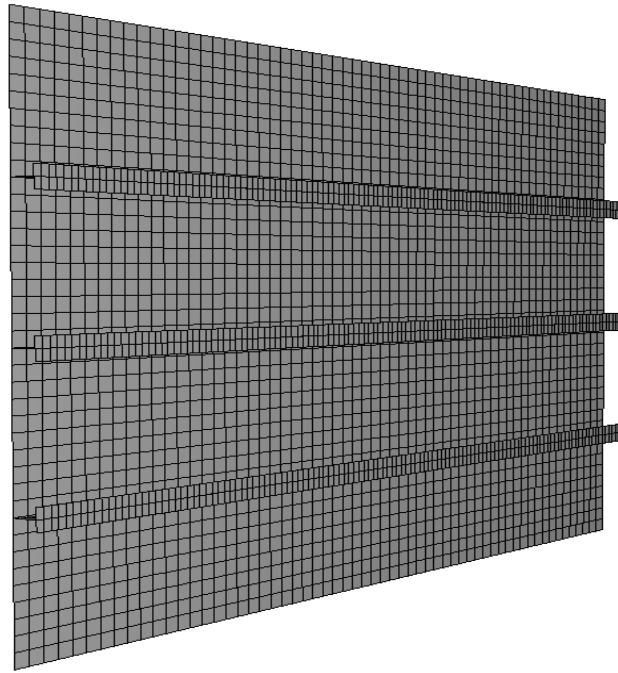
высокой неравномерностью с наличием четких зон локальной концентрации напряжений. Более темным участкам на данном рисунке соответствуют зоны с более высоким уровнем напряжений. Приведенные в табл. 5.1 основные показатели НДС дают представление об их величинах.

Принимая во внимание эти результаты, которые были получены и детально описаны автором еще во время его более ранних исследований, было решено заменить плоский лист на гофрированный с той же самой толщиной, что и в предыдущем случае (6 мм). Полученная при этом картина напряженного состояния такого листа приведена на рис. 5.2. Видно, что несущая способность такой панели оказывается ниже, чем в предыдущем случае (см. табл. 5.1).

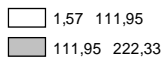
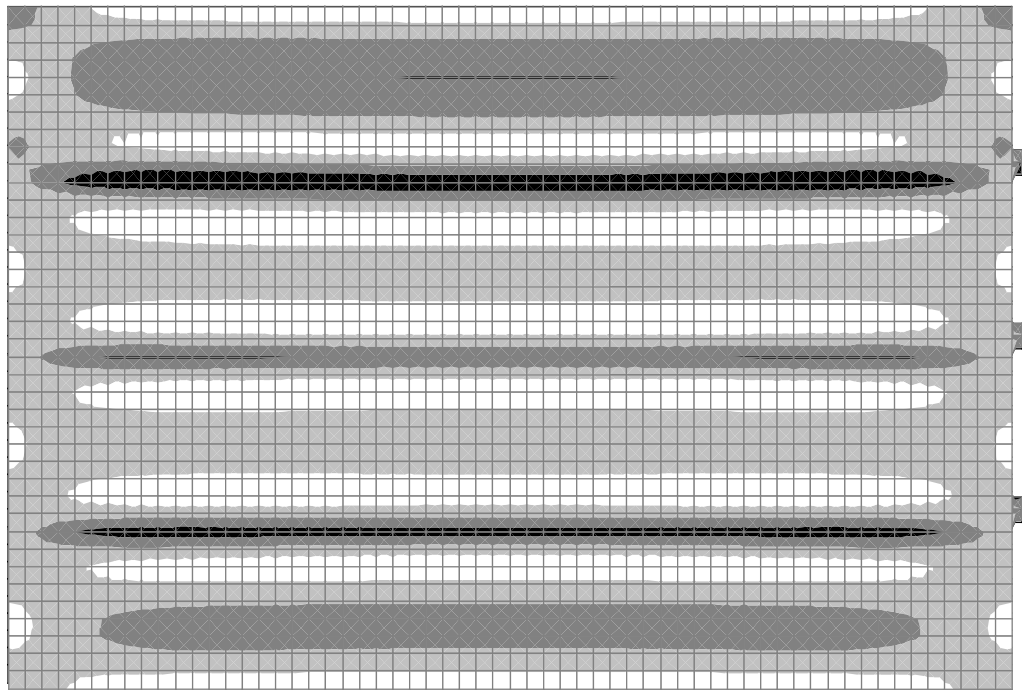
Поэтому, такой одиночный гофрированный лист был дополнительно усилен плоским листом, располагаемым с внутренней стороны (со стороны приложения внешней нагрузки) и при этом появилась возможность уменьшить толщину гофрированного листа в два раза. Таким образом, масса получившегося пакета осталась практически без изменений по сравнению с первоначальным конструктивным вариантом.

Однако, полученная картина напряженного состояния (рис. 5.3) позволила констатировать, что подобный составной элемент обладает существенным недостатком – по контуру панели возникают значительные сдвиговые усилия. Поэтому для их восприятия в конструкцию были добавлены обвязочные элементы в виде полосовых элементов, располагаемых по внешнему контуру в плоскости перпендикулярной основным листам (как говорят специалисты, «из плоскости конструкции»).

Напряженное состояние такой панели приведено на рис. 5.4. Сравнивая этот конструктивный вариант панели с первоначальным (рис. 5.1) возможно констатировать, что показатели напряженно-деформированного состояния для такой панели значительно ниже, при почти одинаковой массе (см. табл. 5.1).



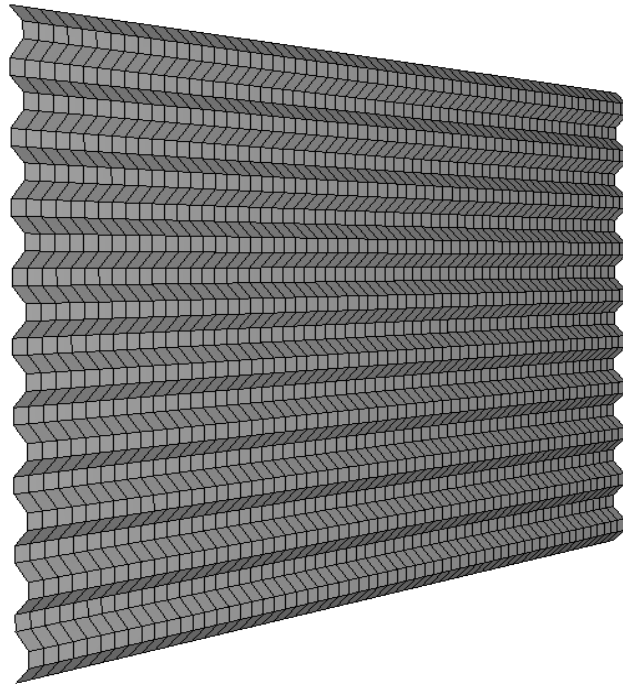
a)



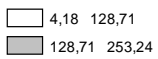
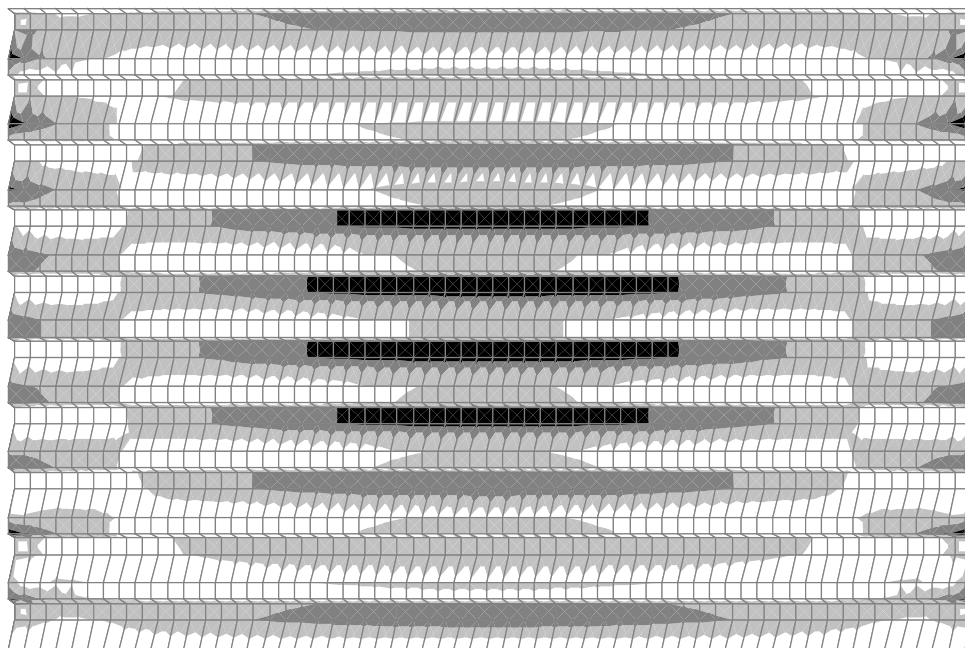
Внешний слой NE4 Н/мм<sup>2</sup> Загружение 1

б)

*Рис. 5.1. Внешний вид (а) и напряженное состояние (б) панели традиционной конструкции с ребрами жесткости*



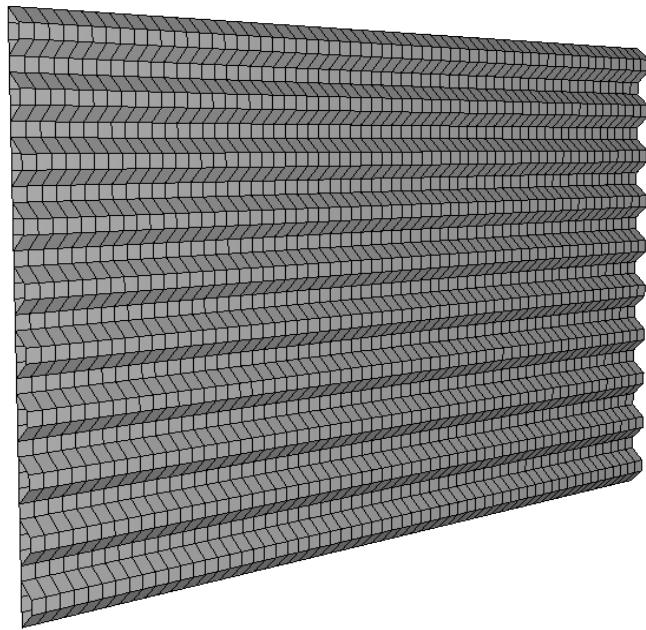
a)



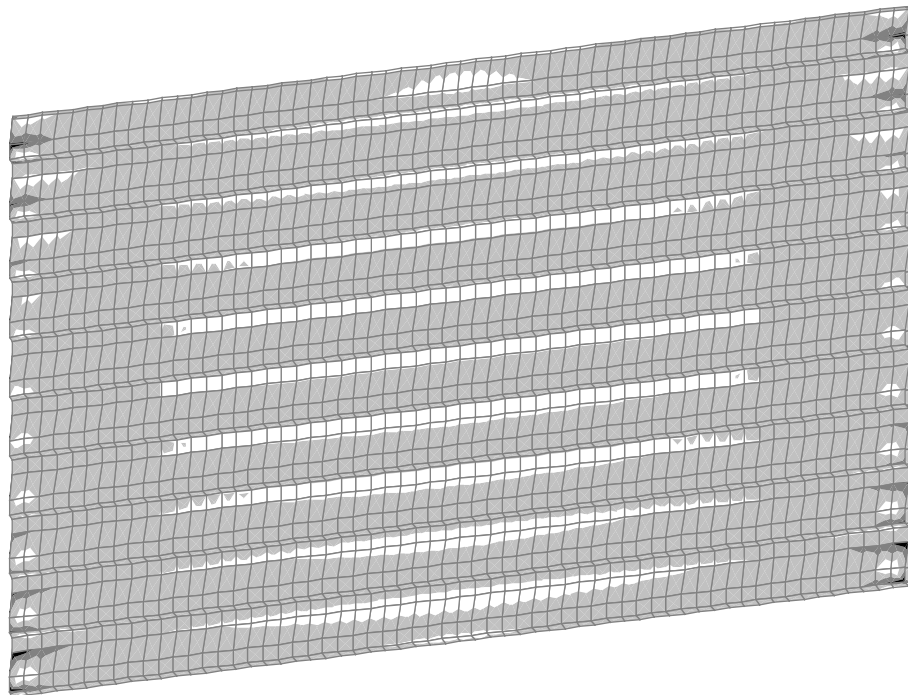
Внешний слой NE4 Н/мм2 Загружение 1

б)

*Рис. 5.2. Общий вид (а) и напряженное состояние (б) панели из гофрированного листа*



а)



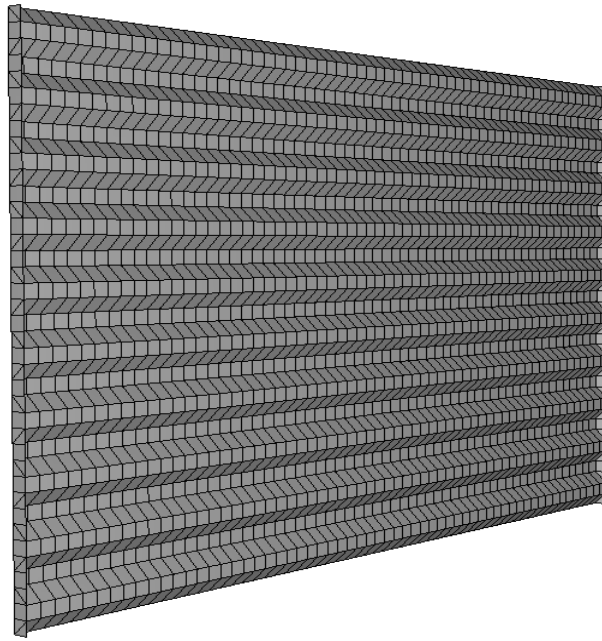
□ -452,94 21,05  
■ 21,05 495,05

■ 495,05 969,04  
■ 969,04 1443,03

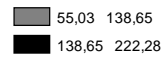
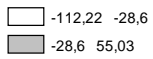
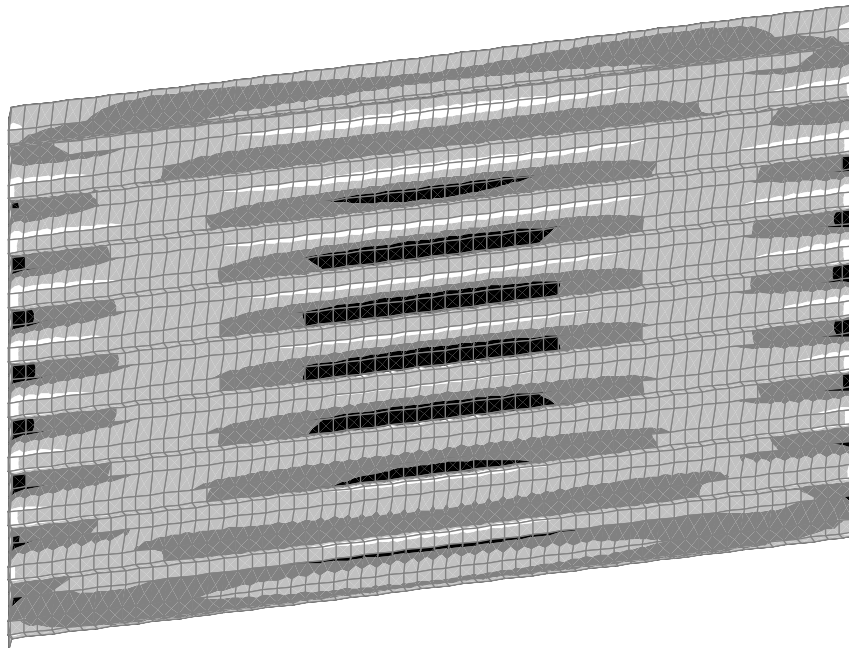
Внешний слой S1 Н/мм2 Загружение 1

б)

*Рис. 5.3. Общий вид (а) и напряженное состояние (б) панели из гофрированного листа с подкрепляющим плоским листом*



a)



Внутренний слой S1 Н/мм2 Загружение 1

б)

*Рис. 5.4. Общий вид (а) и напряженное состояние (б) панели из гофрированного листа с подкрепляющим плоским листом и обвязочными элементами*

**Показатели НДС панелей  
различных конструктивных схем**

Конструктивная схема	Показатель НДС		Масса, кг
	максимальные напряжения, МПа	максимальный прогиб, мм	
плоский лист с ребрами жесткости	443	56	1625
гофрированный лист	502	97	1640
гофрированный лист с плоским листом	1443	30	1670
гофрированный лист с плоским листом и обвязочными элементами	222	30	1730

Таким образом, последний конструктивный вариант панели оказался наиболее эффективным по сравнению с остальными решениями, и именно он был принят в качестве окончательного конструктивного варианта панельной схемы для бункерной емкостной конструкции. Отметим, что каждый из его элементов является не только несущим элементом, т.е. воспринимает какие-либо возникающие в элементе усилия, но и выполняет определенную конструктивную функцию, как это было описано ранее в предыдущем разделе настоящей монографии.

### **5.2.2. Работа емкостной конструкции**

Как и в предыдущем случае исследования работы отдельной панели выполним сопоставительный конечно-элементный анализ существующей традиционной и авторской панельной конструктивных схем стальных емкостных конструкций. Попутно рассмотрим также и ряд промежуточных конструктивных вариантов, предла-

гавшихся для устранения недостатков традиционной схемы и описанных в предыдущем разделе настоящей монографии.

Всего сопоставлялось 4 конструктивных решения с примерно близкими массовыми показателями. В качестве базового был принят вариант бункерной емкости, рассмотренный в примере проектирования в работе [38]: размеры емкости в плане  $6 \times 6$  м, высота вертикальной части 2 м, высота наклонной части 4,6 м, угол наклона боковых стенок нижней части  $60^\circ$ . Нагрузка – статическое давление угля. В ходе проводимого сопоставительного анализа базовый вариант конструктивного решения емкости изменялся в соответствии с исследуемыми конструктивными решениями.

Они представляли собой следующие конструктивные варианты:

- вариант № 1 (базовый) представлял собой емкость с горизонтальной ориентацией ребер жесткости, соответствующий традиционно принятой конструктивной схеме. Толщина стенки была принята 6 мм, подкрепляющие ребра выполнялись из уголка  $140 \times 140 \times 9$  мм. Общая масса емкости – 9020 кг;

- вариант № 2 представлял собой емкость с расположением ребер жесткости независимо на каждой из стенок с разрывом в угловой зоне. Толщина стенки была принята 6 мм, подкрепляющие ребра выполнялись из тавра 20ШТ1 по ТУ 14-2-685-86. Общая масса емкости – 9220 кг;

- вариант № 3 представлял собой емкость с ребрами, выполненными в виде V-образного профиля размерами  $250 \times 250 \times 4$  мм. Толщина стенки была оставлена равной 6 мм. Общая масса емкости – 8920 кг;

- вариант № 4 представлял собой емкость из составных гофрированных панельных элементов. Внутренний лист был принят толщиной 3 мм, а внешний – гофрированный толщиной 3 мм с размерами гофра  $450 \times 100 \times 4$  мм. Общая масса емкости – 9180 кг.

На рис. 5.5 – 5.8 приведены полученные картины НДС для всех четырех рассматриваемых конструктивных вариантов бункерной емкости. В ходе расчетов рассматривалась четверть модели емкости с заданием соответствующих граничных условий симметрии деформаций по краям. ОпираНИЕ емкостей моделировалось для всех конструктивных вариантов однотипно – постановкой в угло-

вой зоне шарнирной опоры, имитировавшей угловой опорный элемент. Расчет выполнялся в геометрически нелинейной постановке.

Под буквой «а» на этих рисунках приведены поля распределения эквивалентных напряжений по четвертой теории прочности. Для удобства их визуального сопоставления они представлены в черно-белой шкале с 4-мя оттенками, где более темному оттенку соответствует большее значение напряжения. Картины деформации в каждом случае приведены с одинаковым коэффициентом увеличения деформаций, принятым равным 5.

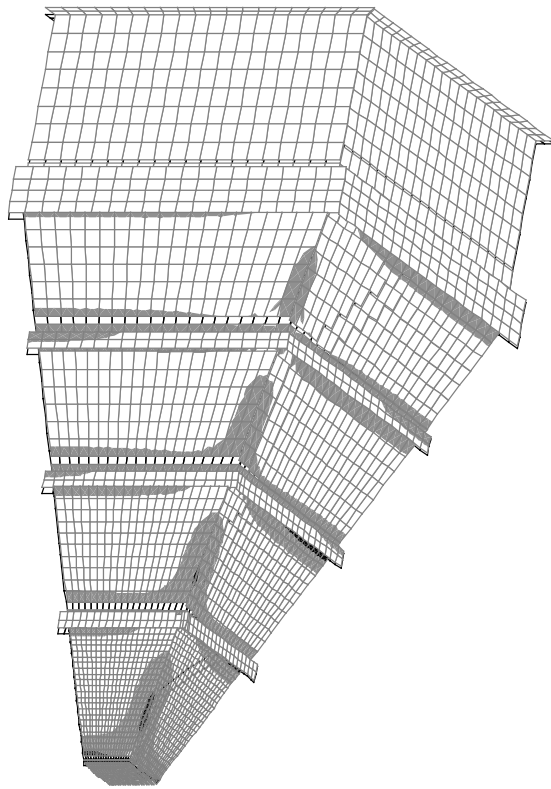
В таблице 5.2 приведены значения полученных напряжений и деформаций в наиболее характерных точках для каждого из конструктивных вариантов.

Таблица 5.2

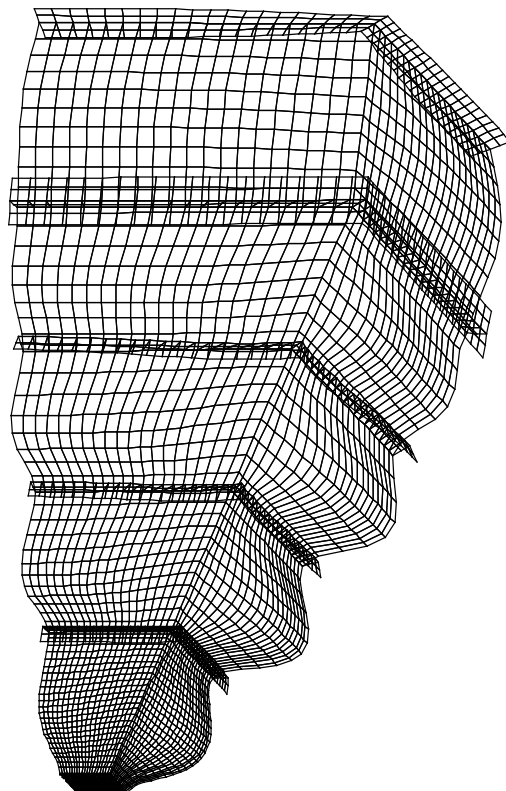
**Параметры НДС  
конструктивных вариантов**

Конструктивный вариант	Эквивалентные напряжения (МПа)				Наибольший прогиб стенки, мм
	в				
	ребре в пролете	ребре в угловой зоне	стенке в пролете	стенке в угловой зоне	
№ 1	205	360	105	145	32
№ 2	135	470	270	245	45
№ 3	65	155	80	135	20
№ 4	-		40	75	12

Приведенные в таблице данные по результатам выполненных расчетов для различных конструктивных вариантов позволяют сделать несколько практически очень важных выводов.

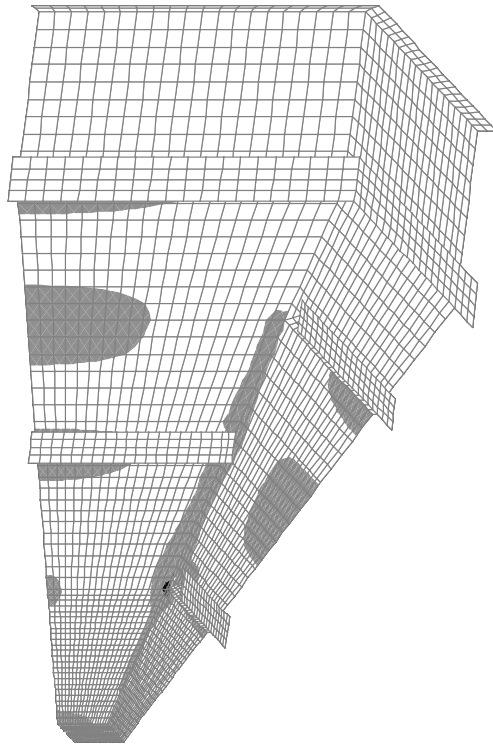


а)

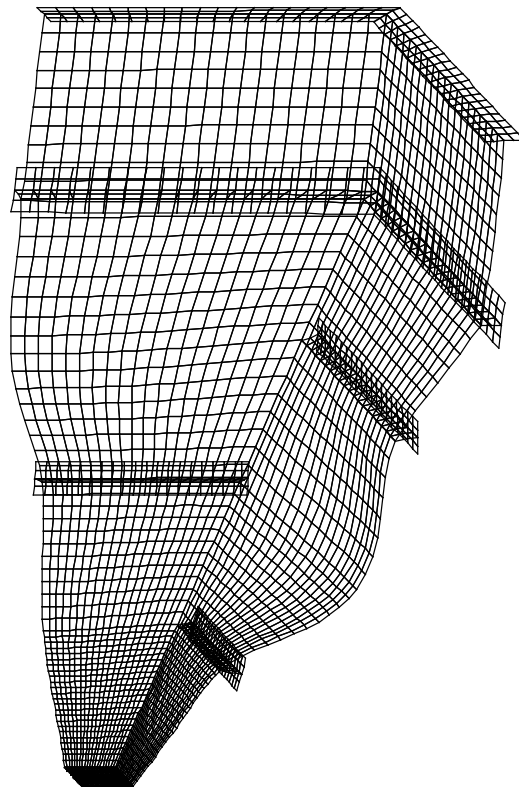


б)

*Рис. 5.5. Картина распределения напряжений (а)  
и картина деформаций (б)  
для конструктивного варианта № 1*

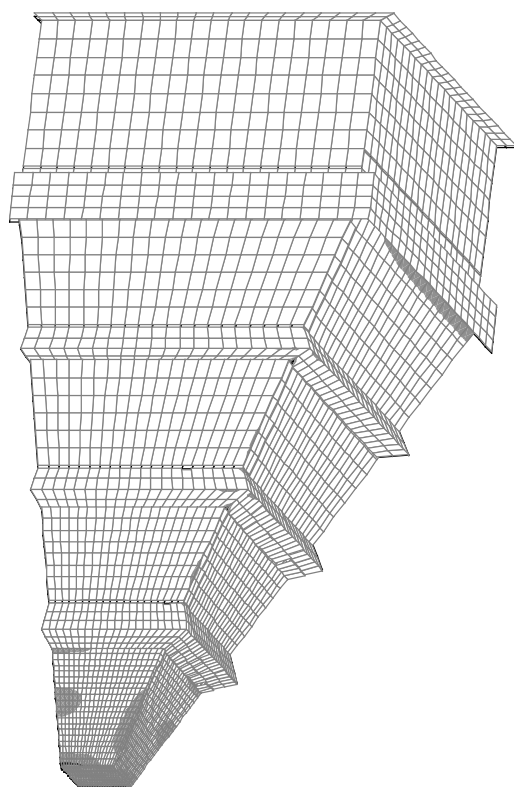


а)

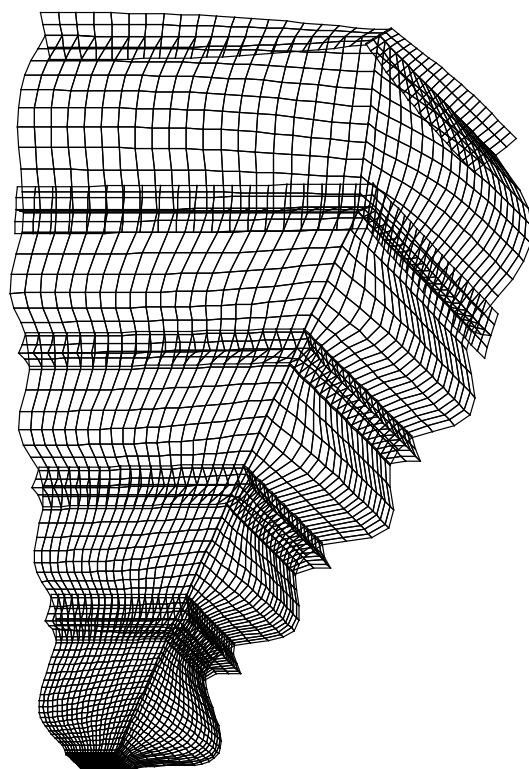


б)

*Рис. 5.6. Картина распределения напряжений (а)  
и картина деформаций (б)  
для конструктивного варианта № 2*

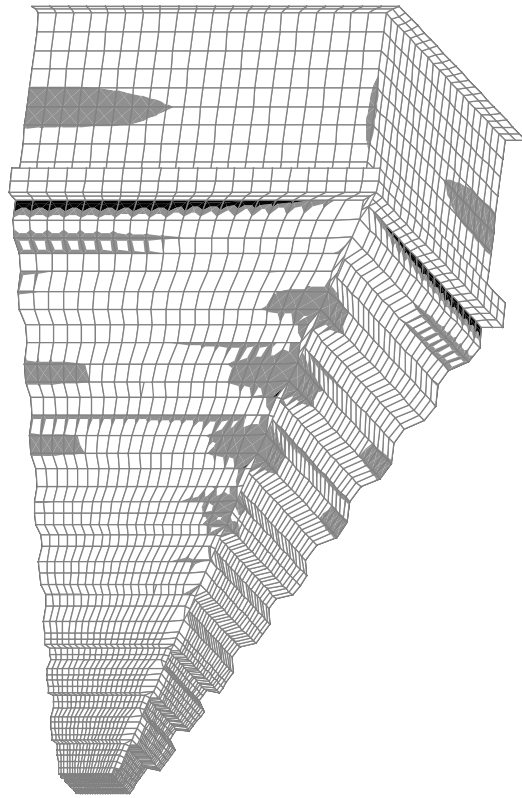


а)

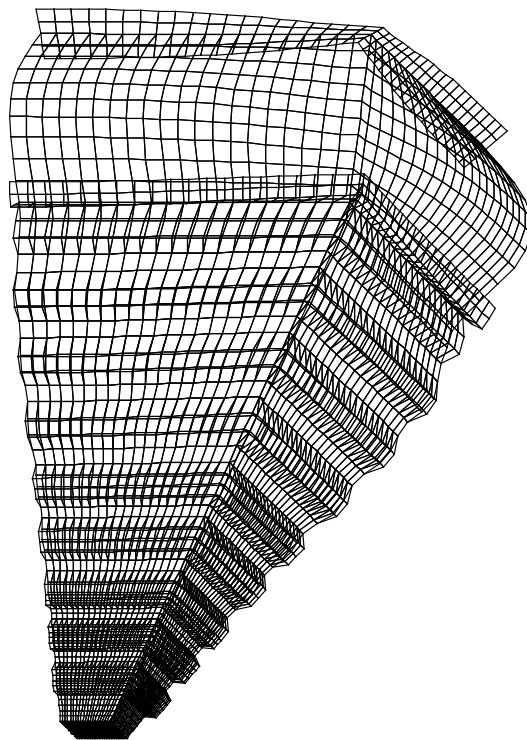


б)

*Рис. 5.7. Картина распределения напряжений (а)  
и картина деформаций (б)  
для конструктивного варианта № 3*



a)



б)

*Рис. 5.8. Картина распределения напряжений (а)  
и картина деформаций (б)  
для конструктивного варианта № 4*

Во-первых, вариант № 2, в котором реализована идея разрывности подкрепляющих ребер жесткости для снижения в них и в угловой зоне уровня концентрации напряжений, не оправдывает себя. Хотя в пролете и наблюдается почти двукратное снижение напряжений благодаря постановке более мощных ребер жесткости, однако, в угловой зоне уровень концентрации напряжений наоборот увеличивается, что означает на практике проявление на этих участках значительных пластических деформаций. При этом общая деформативность конструкции возрастает.

Во-вторых, вариант № 3, в котором подкрепляющие ребра жесткости имеют V-образное поперечное сечение, позволяет снизить общий уровень напряжений и деформаций конструкции, в среднем, примерно на 25 – 30 %. При этом все же заметна достаточно высокая неравномерность распределения напряжений в различных местах емкости и не удается полностью избежать их концентрации в угловой зоне сооружения.

И наконец, в-третьих, и главное – для варианта № 4, в котором реализована идея использования составных гофрированных панелей, оказывается возможным получить не только снижение напряжений в конструкции на 30 – 35 %, но и добиться гораздо более равномерной работы самой стенки и практически полного отсутствия концентрации напряжений в угловой зоне. При этом деформативность емкости снижается по сравнению с исходным вариантом примерно в 3 раза. Это оказывает позитивное влияние на характер ее работы с точки зрения возникновения и развития усталостных деформаций. Следует отметить, что в месте стыковки вертикальной и наклонной частей емкости, где гофрированная стенка переходит в вертикальную часть, выполненную по традиционной конструктивной схеме, заметен повышенный уровень концентрации напряжений.

Таким образом, предложенная панельная конструктивная схема для жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов оказывается наиболее эффективной как по сравнению с существующим конструктивным решением, так и по отношению к ряду иных предлагаемых конструктивных схем.

## **5.3. Особенности моделирования гофрированных профилей**

### **5.3.1. Вычислительный эксперимент**

В процессе практического применения МКЭ для моделирования стальных емкостных конструкций возник вопрос о корректном задании давления сыпучих материалов на гофрированные элементы при автоматизированном расчете.

Детальный анализ литературных источников обнаружил отсутствие рекомендаций для аналитического расчета перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра, из которых состоит стенка силоса. В работе [103] проанализирован целый элеваторный комплекс и установлены закономерности распределения усилий в его несущих элементах. Однако не рассматриваются закономерности распределения усилий в каждой отдельной пластине.

Для изучения взаимодействия сыпучего материала со стенками емкости в процессе его хранения проводились и продолжают проводиться многочисленные аналитические исследования и создаваться разного рода теоретические модели [53, 63], описывающие качественно или количественно поведение сыпучего материала в замкнутых объемах. Кроме того, был проведен ряд экспериментальных исследований [45, 105], однако, все они сконцентрированы на изучении работы емкостей с плоской, а не с гофрированной стенкой вертикальной части. В принятых нормативных документах также не раскрыт этот вопрос, даны только рекомендации по определению коэффициента трения по вертикальным поверхностям для гофрированных стенок, но дальнейший расчет ведется как для плоских оболочек [40].

Становится непонятным, какая из пластин будет более загружена, а какая менее, и под каким углом будет распределяться давление сыпучего материала. Поэтому для достижения поставленной цели было решено смоделировать расчетную ситуацию с помощью пакета компьютерных программ. Как и при проведении предыдущих исследований, авторами использовался уже хорошо апробиро-

ванный и зарекомендовавший себя комплекс SCAD for Windows [104].

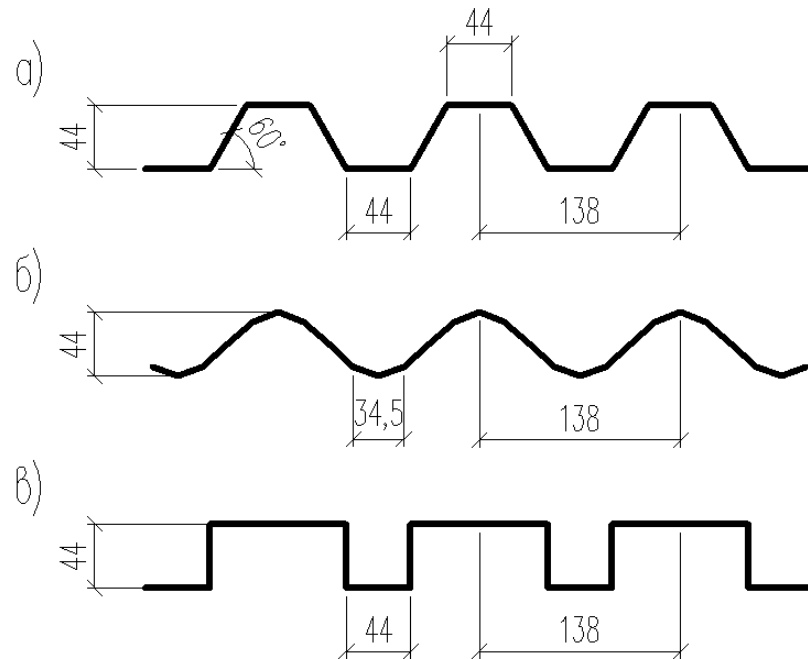
В процессе моделирования рассматривались два крайних возможных случая задания нагружения от сыпучего материала на гофрированную стенку силоса. Первый – гидростатический, когда крупность зерна сыпучего заполнителя будет приближаться к нулю, а давление на каждую отдельную пластину гофра будет одинаковым и направлено под прямым углом. Второй – когда горизонтальная составляющая нагрузки воспринимается только внутренней вертикальной пластиной гофра, как результат довольно существенной крупности зерна сыпучего. В этом случае нагрузка также будет направлена перпендикулярно к внутренней вертикальной пластине, поскольку это будет худшим случаем из всех возможных. В действительности расчетная ситуация, которая исследуется, будет промежуточной между двумя смоделированными крайними вариантами.

Для оценки полученных результатов модели силоса с одним типом профиля гофра недостаточно. Разнообразие типов гофрированных профилей для стеновых панелей почти не имеет границ [92]. Однако наиболее распространенными из них являются трапециевидный и волнистый профили. Для получения корректных результатов дополнительно использовался и третий распространенный вид профиля – квадратный. С целью повышения объективности исследований в работе были приняты гофрированные профили с одинаковой высотой гофра, длиной волны и толщиной листа. Подробные схемы избранных видов профилей приведены на рис. 5.9.

Расчетная модель (РМ) представляла собой кольцо, высота которого равна десяти длинам волны гофрированного профиля потому, что напряженное состояние по высоте силоса является однотипным по периметру. При этом обеспечивается необходимая точность получаемых результатов, а РМ значительно упрощается. Моделировалась нижняя часть вертикальной стенки силоса. Граничные условия расчетной модели по краям кольца представлены в виде как жесткого, так и шарнирного закрепления, поскольку реальную степень заземления краев оценить трудно.

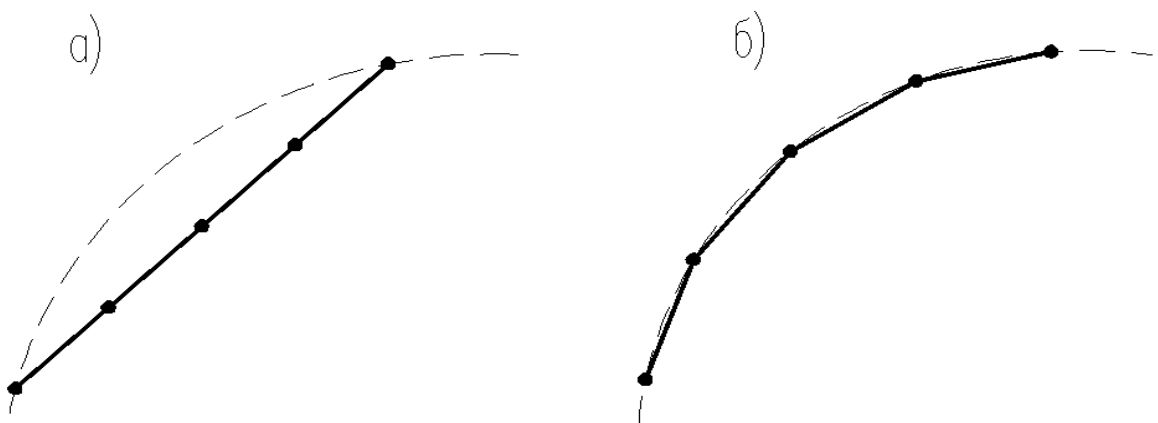
Известная проблема сходимости результатов в МКЭ решалась подбором нужного размера конечного элемента путем сгущения сетки конечных элементов [106]. На первом этапе принимался один

конечный элемент по пластине гофра, на втором – два конечных элемента, на третьем четыре конечных элемента, соответственно.



*Рис. 5.9. Типы профилей, используемых при моделировании:  
а) трапецевидный; б) волнистый; в) квадратный*

Были проанализированы два способа сгущения сетки: последовательным путем деления предыдущей (рис. 5.10, а) и созданием более мелкой сетки копированием (рис. 5.11, б). В первом случае полученные конечные элементы лежали на одной прямой, во втором – на дуге.

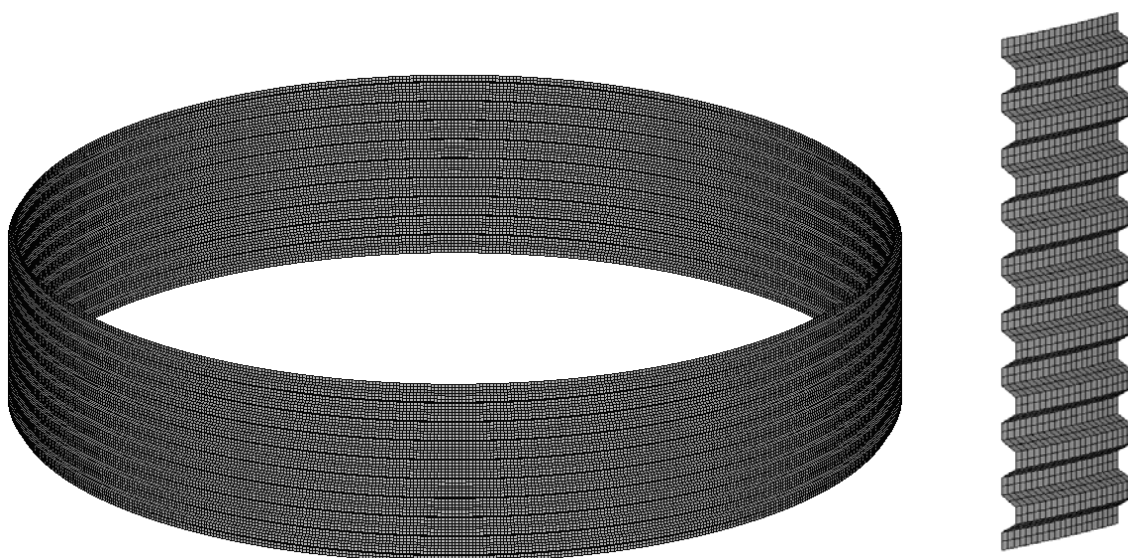


*Рис. 5.10. Схематическое изображение создания КЭ-сетки:  
а) последовательным путем деления предыдущей;  
б) создание более мелкой сетки копированием*

Итогом полученных результатов было решение выбрать второй способ построения сетки, ведь первый давал большую погрешность. Достаточная точность была получена уже на втором шаге сгущения сетки. При разделении пластины на конечные элементы их пропорции максимально возможно приближались к квадрату для получения корректных аппроксимирующих функций в виде квадратных полиномов [107].

Размеры РМ по высоте составляли 1,38 м, а диаметр был принят типовой [29] из условия наиболее широкого применения в строительстве подобных сооружений и составлял 6 м. Толщина гофрированной стенки для расчета задавалась равной 1 мм.

Модель, построенная в проектно-вычислительном комплексе SCAD для первого типа профиля (по рис. 5.9, а), изображена ниже на рис. 5.11.



*Рис. 5.11. Расчетная модель для трапецевидного типа профиля*

Нагрузка задавалась равномерно-распределенной. Ее значение принималось из опыта проектирования, согласно теории Г. Янсена [29] и соответствовала среднему значению давления зерна в силосной емкости диаметром до 9 м на глубине 20 м, что составило в среднем  $60 \text{ кН/м}^2$ .

В первом случае нагрузка была задана под прямым углом одинаковой интенсивности на каждую пластину со значением  $60 \text{ кН/м}^2$ . Во втором – для воспроизведения одинаковых расчетных условий и сохранения общего значения интенсивности давления на всю высоту стенки модели давление для внутренней вертикальной пластины было вычислено с учетом геометрических размеров и пропорций

профиля. Поскольку высота стенки РМ составляла 1,38 м, а сумма длин 10 внутренних вертикальных пластин гофра – 0,44 м, то необходимая интенсивность давления была достигнута при задании значения нагрузки, которая равнялась 188,2 кН/м<sup>2</sup>.

После проведения расчета было проанализировано напряженно-деформированное состояние гофра и были отобраны максимальные значения деформаций и напряжений по каждой пластине отдельно для всех типов профилей стенки. Результаты для первого и второго варианта нагрузки собраны в табл. 5.3 и табл. 5.4, соответственно. В них приведены следующие условные обозначения:

$f_{max}$  – максимальное значение деформаций для соответствующих пластин, мм;

$\sigma_I$  – первые главные напряжения, МПа;

$\sigma^{IV}$  – эквивалентные напряжения по IV теории прочности, МПа.

Таблица 5.3

**Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния пластин гофра для варианта с гидростатическим способом задания нагрузки**

№ п/п	Профиль	Способ закрепления	Результаты								
			$f_{max}$ , мм			$\sigma_I$ , МПа			$\sigma^{IV}$ , МПа		
			№ пластины			№ пластины			№ пластины		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		Жесткое защемление	1,90	1,97	1,97	<u>122,2</u> 140,6	<u>136,3</u> 140,2	<u>149,7</u> 139,1	<u>139,4</u> 125,3	<u>140,0</u> 136,5	<u>138,7</u> 150,5
		Шарнирное закрепление	1,91	1,96	1,97	<u>124,2</u> 140,3	<u>134,2</u> 140,5	<u>149,6</u> 139,4	<u>138,9</u> 125,9	<u>140,3</u> 134,7	<u>138,6</u> 150,5
2		Жесткое защемление	2,14	2,26	2,26	<u>141,4</u> 158,4	<u>157,2</u> 160,9	<u>164,3</u> 151,7	<u>160,3</u> 142,9	<u>160,6</u> 156,7	<u>153,0</u> 163,2
		Шарнирное закрепление	2,12	2,28	2,28	<u>138,7</u> 158,3	<u>160,0</u> 161,0	<u>164,4</u> 151,8	<u>161,4</u> 141,0	<u>160,5</u> 159,2	<u>153,7</u> 163,1
3		Жесткое защемление	1,84	1,60	1,59	<u>139,6</u> 131,9	<u>117,0</u> 110,8	<u>118,7</u> 132,6	<u>143,9</u> 139,9	<u>110,9</u> 116,9	<u>144,8</u> 119,0
		Шарнирное закрепление	1,82	1,60	1,57	<u>140,5</u> 131,0	<u>115,7</u> 111,4	<u>118,4</u> 131,8	<u>142,6</u> 141,0	<u>111,5</u> 115,6	<u>143,4</u> 118,8

Анализируя данные, приведенные в таблицах, можно видеть, что различные способы моделирования нагрузки по-разному влияют на напряженно-деформированное состояние каждой из пластин гофра. Так, например, для квадратного профиля в первом варианте максимальные деформации возникают в первой пластине, а для второго

варианта – во второй. При детальном сравнении видно, что количественная разница между полученными результатами для первого и второго способов моделирования нагрузки по максимальным деформациями приближается к 20 %, а по напряжениям: для внутреннего слоя пластин доходит до 50 %, а для внешнего слоя достигает 80 %. В то же время заметно, что способ закрепления несущественно влияет на значение результатов. И хотя для каждого профиля гофра изменение картины НДС в зависимости от способа приложения нагрузки несколько отличается, общая тенденция наблюдается в одинаковом направлении, что свидетельствует о том, что данные смоделированные случаи являются крайними из возможных действительных и реальная картина НДС будет между ними промежуточной.

Таблица 5.4

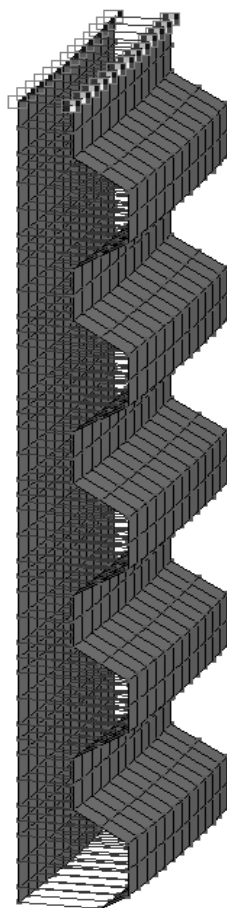
**Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния пластин гофра для варианта с давлением только на внутренние вертикальные пластины**

№ п/п	Профиль	Способ закрепления	Результаты								
			$f_{max}$ , мм			$\sigma_I$ , МПа			$\sigma^{IV}$ , МПа		
			№ пластины			№ пластины			№ пластины		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		Жесткое защемление	1,92	2,20	1,97	$\frac{137,9}{133,6}$	$\frac{205,1}{140,8}$	$\frac{137,7}{154,9}$	$\frac{133,8}{138,9}$	$\frac{193,6}{241,7}$	$\frac{161,8}{139,2}$
		Шарнирное закрепление	1,90	2,18	1,95	$\frac{140,4}{134,0}$	$\frac{202,1}{141,3}$	$\frac{140,3}{155,3}$	$\frac{134,1}{142,0}$	$\frac{190,1}{237,6}$	$\frac{163,5}{142,2}$
2		Жесткое защемление	2,18	2,37	2,27	$\frac{158,5}{145,3}$	$\frac{187,2}{149,3}$	$\frac{159,9}{162,5}$	$\frac{146,4}{159,5}$	$\frac{162,5}{194,9}$	$\frac{168,0}{160,3}$
		Шарнирное закрепление	2,16	2,41	2,30	$\frac{155,1}{145,2}$	$\frac{190,7}{149,4}$	$\frac{162,3}{162,4}$	$\frac{146,0}{155,7}$	$\frac{165,3}{199,3}$	$\frac{168,0}{162,7}$
3		Жесткое защемление	1,75	1,93	1,75	$\frac{147,7}{148,4}$	$\frac{178,7}{148,4}$	$\frac{146,4}{148,4}$	$\frac{166,6}{162,5}$	$\frac{168,9}{210,4}$	$\frac{166,6}{162,5}$
		Шарнирное закрепление	1,74	1,91	1,80	$\frac{148,3}{149,4}$	$\frac{176,8}{135,9}$	$\frac{147,0}{149,4}$	$\frac{168,9}{164,4}$	$\frac{166,2}{207,3}$	$\frac{168,9}{16,44}$

**Примечание:** в числителе колонок 7-12 приведены значения напряжений для внутреннего слоя пластины, в знаменателе – для внешнего.

В дальнейшем, исследование развивалось в направлении уточнения характера перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра. С этой целью был создан и просчитан ряд расчетных моделей, с дополнительно построенной внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочкой. Расчетная

модель самого силоса осталась прежней, с теми же размерами и пропорциями, но каждый ее узел соединялся с помощью стержневого элемента с узлом внутреннего мембранного цилиндра, разделенного на конечные элементы по тому же принципу, что и силос. Закрепление внутреннего мембранного цилиндра выполнялось только по верхнему краю кольца в направлении, которое препятствовало вертикальным перемещением. Предельные условия самого силоса остались неизменными и были представлены в виде как жесткого, так и шарнирного закрепления. Продольная жесткость стержневых элементов была назначена равной  $10^6$  кН с целью препятствования восприятию нагрузки самими стержнями, поскольку они использовались только для передачи давления от мембранной оболочки в узлы силоса. Расчетная модель силоса с трапецевидным профилем гофра изображена на рис. 5.12.



*Рис. 5.12. Расчетная модель силоса для трапецевидного типа профиля с дополнительно построенной внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочкой*

Нагрузка задавалась равномерно-распределенной, под прямым углом на внутреннюю гибкую мембранную цилиндрическую оболочку и, как и в предыдущем случае, составляла  $60 \text{ кН/м}^2$ .

Толщина пластин внутреннего мембранного цилиндра итерационным методом была поэтапно уменьшена от 1 мм до 0,001 мм.

После проведения расчета было проанализировано напряженно-деформированное состояние гофра силоса на основе отобранных максимальных значения деформаций и напряжений по каждой пластине отдельно. Сравнительные результаты для трапецевидного профиля гофра с разной толщиной внутреннего мембранного цилиндра приведены в табл. 5.5.

Таблица 5.5

**Результаты расчетов напряженно-деформированного состояния пластин гофра для варианта с давлением через внутреннюю гибкую мембранную цилиндрическую оболочку**

№ п/п	Профиль	Способ закрепления	Результаты								
			$f_{max}$ , мм			$\sigma_I$ , МПа			$\sigma^{IV}$ , МПа		
			№ пластины			№ пластины			№ пластины		
			1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Толщина внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочки 0,001 м = 1 мм											
1		Жесткое защемление	1,07	1,13	1,10	$\frac{72,6}{73,7}$	$\frac{82,1}{74,7}$	$\frac{77,2}{75,3}$	$\frac{73,2}{72,3}$	$\frac{75,6}{81,3}$	$\frac{75,1}{76,5}$
		Шарнирное закрепление	1,10	1,19	1,13	$\frac{72,0}{73,7}$	$\frac{82,6}{74,6}$	$\frac{77,7}{75,3}$	$\frac{73,2}{71,8}$	$\frac{75,9}{81,9}$	$\frac{75,2}{76,9}$
Толщина внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочки 0,0001 м = 0,1 мм											
2		Жесткое защемление	1,75	1,85	1,81	$\frac{123,3}{120,0}$	$\frac{137,5}{120,3}$	$\frac{126,7}{125,0}$	$\frac{119,3}{122,3}$	$\frac{124,0}{136,8}$	$\frac{124,5}{125,4}$
		Шарнирное закрепление	1,76	1,84	1,79	$\frac{125,2}{119,7}$	$\frac{135,5}{120,6}$	$\frac{125,0}{125,0}$	$\frac{119,2}{124,2}$	$\frac{122,9}{134,7}$	$\frac{124,5}{124,0}$
Толщина внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочки 0,00001 м = 0,01 мм											
3		Жесткое защемление	1,86	1,98	1,92	$\frac{131,3}{128,0}$	$\frac{146,5}{128,4}$	$\frac{135,1}{133,3}$	$\frac{127,3}{130,3}$	$\frac{132,2}{145,8}$	$\frac{132,7}{133,7}$
		Шарнирное закрепление	1,89	1,96	1,91	$\frac{133,3}{127,7}$	$\frac{144,5}{128,7}$	$\frac{133,3}{133,3}$	$\frac{127,2}{132,3}$	$\frac{131,1}{143,7}$	$\frac{132,7}{132,3}$
Толщина внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочки 0,000001 м = 0,001 мм											
4		Жесткое защемление	1,87	1,99	1,94	$\frac{132,2}{128,9}$	$\frac{147,5}{129,3}$	$\frac{136,0}{134,1}$	$\frac{128,2}{131,2}$	$\frac{133,1}{146,7}$	$\frac{133,6}{134,6}$
		Шарнирное закрепление	1,89	1,97	1,92	$\frac{134,2}{128,6}$	$\frac{145,5}{129,6}$	$\frac{134,2}{134,2}$	$\frac{128,1}{133,1}$	$\frac{132,0}{144,6}$	$\frac{133,6}{133,1}$

Из анализа данных табл. 5.3 – 5.5, видно, что НДС модели с дополнительно построенной внутренней гибкой мембранной цилиндрической оболочкой, в целом, является промежуточным вариантом между двумя предыдущими крайними случаями, подтверждающий предположения относительно реальной картины характера перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра. Также, следует отметить, что значения максимальных деформаций и напряжений, возникающих в пластинах при последнем способе загрузки силоса находятся в прямо пропорциональной зависимости от толщины внутренней гибкой мембранной оболочки и с уменьшением этой толщины постепенно приближаются к предварительно полученным результатам. Можно сделать вывод, что реальную картину характера перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра возможно наблюдать в том случае, когда толщина внутренней гибкой мембранной оболочки при третьем способе нагрузки будет равна нулю. Однако, это проблематично смоделировать в проектно-вычислительном комплексе.

Полученные результаты для различных способов задания нагрузки свидетельствуют о существенном различии значений максимальных деформаций и напряжений в пластинах, следовательно, способом задания нагрузки при расчете пренебрегать нельзя. Конечно, можно ориентироваться на худший результат из полученных, но в этом случае запасы прочности будут существенными, а следовательно и перерасход материала и средств становится неизбежным.

### **5.3.2. Модельный эксперимент**

Поскольку полученные результаты численных исследований математических моделей не были однозначны и требовали уточнения, возникла необходимость в постановке и проведении более совершенных экспериментальных исследований. Они позволяют качественно определить характер деформации гофрированной стенки при воздействии нагрузки от сыпучих материалов и помочь понять, как горизонтальное давление перераспределяется на каждую отдельную пластину гофра.

Именно с таких позиций авторами были спланированы и подготовлены собственные экспериментальные исследования.

Поскольку экспериментальные исследования было решено проводить на экспериментальной установке в помещении для исключения возможного неблагоприятного воздействия погодных факторов (влажность, температура и др.) на свойства материалов, то ее габариты определили весь характер исследований. Другим ограничивающим фактором была стоимость проведенных работ.

Основная задача экспериментальных исследований заключалась в определении характера и направления деформаций гофра в процессе загрузки сыпучих материалов и получении количественных показателей деформаций для сопоставления их с расчетными, полученными при исследовании численной модели.

Для решения поставленной задачи пришлось выполнить тщательный предварительный теоретический анализ и моделирование предполагаемой в эксперименте ситуации. Общее количество параметров, которые отбирались таким образом превысило пятнадцать. В их число вошли как конструктивные размеры и форма емкости (материал, толщина гофрированной стенки, количество волн гофра, размер и форма каждого гофра, способ крепления гофрированного элемента к основной конструкции модели), так и физико-механические характеристики сыпучего материала (размер и форма зерна, насыпная плотность, удельный вес, угол естественного откоса, угол внутреннего трения и т. д.).

Основная сложность при установлении возможных диапазонов изменения каждого из параметров заключалась в необходимости правильно воспроизвести те эффекты, которые были необходимы для проведения измерений – соответствие размеров емкости фракционному составу сыпучего материала, проведения измерений без разрушения конструкции для возможности их многократного повторения, необходимость получения результатов на как можно большей комбинации переменных параметров.

Для решения этих задач в качестве экспериментальной установки была изготовлена одноступенчатая симметричная емкость призматического типа с тремя плоскими и одной сменной гофрированной стенками. Сменная стенка позволяет провести эксперимент многократно с различными исходными условиями (изменяя размер и форму гофра). Дополнительно облегчается разгрузка емкости, учитывая возможность разбора одной стороны. Материалы дна и двух плоских вертикальных стенок были изготовлены из листов МДФ, третья плоская стенка для улучшения условий наблюдения за проте-

канием процесса эксперимента выполнялась из стекла. Гофрированная сменная панель изготовлялась из технической бумаги. Общий вид экспериментальной конструкции приведен на рис. 5.13.



*Рис. 5.13. Общий вид экспериментальной емкости с гофрированной стенкой в пазах*

В процессе проведения экспериментальных исследований гофрированная панель изготовлялась и нагружалась с различными исходными параметрами. Профиль гофра для панели был выполнен в трех вариантах. При этом длина волны, в зависимости от желаемых значений деформаций и типа профиля также варьировалась.

В качестве материала засыпки использовалось просо, с крупностью зерен порядка 1 – 2 мм. Материал засыпался в емкость у наиболее удаленной стены от гофрированной панели для того, чтобы нагрузка от сыпучего передавалась постепенно, самотеком, без ударов.

Моделирование нагрузки на отдельные пластины гофра выполнялось в проектно-вычислительном комплексе Structure CAD по двум основным схемам. Первая – гидростатическая, когда крупность зерна сыпучего заполнителя будет стремиться к нулю, а давление на каждую отдельную пластину гофра будет одинаковым и направлено под прямым углом. Вторая – когда горизонтальная составляющая

нагрузки воспринимается только внутренней вертикальной пластиной гофра, как результат довольно существенной крупности зерна сыпучего.

В результате проведенных экспериментальных исследований можно уверенно утверждать, что в случае, когда диаметр сыпучего материала более чем в десять раз меньше размера самой маленькой пластины гофра, тогда схема нагрузки максимально близка к гидростатической, кроме того, качественно и количественно полученные результаты математического моделирования и натурального эксперимента совпадают с отклонением до 10 %.

Следует заметить, что почти все разрушения панелей с квадратным профилем происходили вследствие потери местной устойчивости отдельных полок гофра в нижней наиболее нагруженной части панели (вторая или третья волна), что показано на рис. 5.14, в то время как треугольный (зигзагообразный) профиль терял устойчивость волн практически одновременно по всей высоте модели (рис. 5.15). Исключениями из выше указанных ситуаций были случаи, когда в результате начальных деформаций гофра (погрешности при изготовлении, нарушен угол между пластинами под собственным весом и пр.) волну гофра заклинивало в пазах. В общем количестве проведенных экспериментов такие ситуации случались в 10 – 12 % опытов.

В общем, треугольный профиль оказался менее прочным и устойчивым, чем квадратный, как и ожидалось в результате теоретических расчетов. Подтверждением этого является то, что только емкость с панелями квадратного профиля выдерживала полную загрузку, в то время, когда панели с треугольным профилем разрушались при загрузке емкости чуть больше, чем на половину высоты.

На основе выполненных экспериментальных исследований был уточнен способ моделирования перераспределения горизонтального давления на каждую отдельную пластину гофра, из которых состоит стенка силоса, определены характер и направление деформаций различных типов гофра в процессе загрузки сыпучих материалов и получены качественные показатели деформаций для сопоставления их с расчетными, определенными при анализе математической модели.

В частности, было установлено, что наиболее верной является первая схема моделирования нагрузки – по гидростатическому закону. Вторая схема дает результаты с грубой погрешностью.



*Рис. 5.14. Разрушение панели вследствие потери местной устойчивости нижних пластин второго и третьего гофров снизу*



*Рис. 5.15. Разрушение панели вследствие потери местной устойчивости пластин гофров по всей высоте*

Полученные экспериментальные результаты хоть и подтверждают правильность предварительно выполненных математических моделей, однако они свидетельствуют о том, что способом задания нагрузки при расчете пренебрегать нельзя и в дальнейшем необходимо улучшить нормативную базу, дополняя ее разделами с детальной проработкой данной тематики и рекомендациями, относительно корректного моделирования горизонтального давления на гофрированную стенку силоса с учетом крупности зерна сыпучего материала.

## **5.4. Частные теоретические задачи**

Рассмотрим решение ряда частных теоретических задач, имеющих важное практическое значение при проектировании и эксплуатации жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

### **5.4.1. Определение степени совместности работы обшивки с ребром жесткости**

Задача определения степени совместности работы обшивки с жестко соединенным ребром жесткости имеет самостоятельное практическое значение, поскольку во многих случаях, включая, например, и действующий подход к расчету емкостных конструкций, ребро может рассматриваться как отдельный конструктивный элемент реберной панели.

Данный вопрос исследовался рядом специалистов (см., например, [108 – 110]), однако полученные результаты свидетельствовали о том, что степень включения обшивки в совместную работу с подкрепляющим ее ребром жесткости может варьироваться существенным образом.

Согласно существующему подходу к проектированию стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов количество толщин оболочки, участвующей в совместной работе с ребром жесткости рекомендуется принимать равной 60 [45] или в более поздних работах – 30 [33 – 38]. Это вносит некоторое разночтение в

процесс проектирования. Поэтому данная задача была исследована автором настоящей монографии (профессором Банниковым Д.О.), но уже с современных позиций – с применением численных расчетов согласно МКЭ.

Данная задача была сформулирована следующим образом. Пусть есть пластина толщиной  $t$ , подкрепленная ребром жесткости (для конкретности на рис 5.16 представлено ребро таврового сечения). При приложении нагрузки к ее внутренней поверхности пластина вместе с ребром жесткости выгибается, причем часть пластины работает совместно с ребром жесткости. Таким образом, возникает вопрос, какая именно часть пластины оказывается при этом задействованной. Конструктивно эту часть определим в количестве толщин пластины  $k \cdot t$ , где  $k$  – и есть искомый параметр.

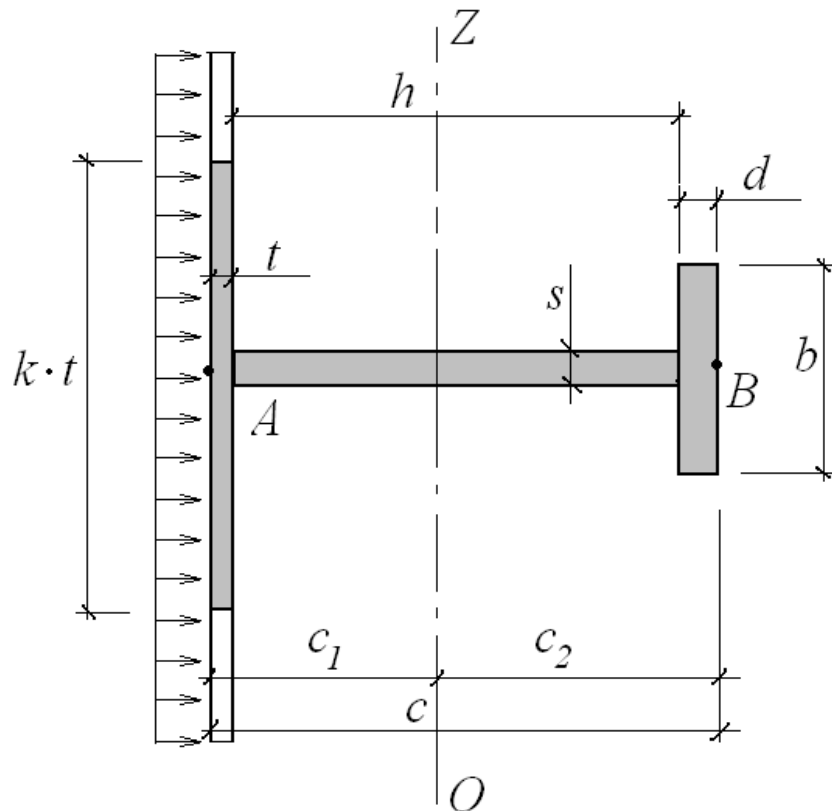


Рис. 5.16. Совместимая работа пластины с ребром жесткости

Для определения параметра  $k$  была использована следующая методика. Его величина может быть найдена, если известно положение нейтральной оси  $OZ$  при изгибе ребра вместе с частью пластины. Она разделяет поперечное сечение сформированной таким образом балки (на рис. 5.16 показано более темным цветом) в об-

щем случае на две части – левую сжатую и правую растянутую. Расстояния до крайних волокон этих частей определяются соответственно, как  $c_1$  и  $c_2$ .

Координата центра тяжести  $c_1$  может быть вычислена согласно выражению (5.1):

$$c_1 = \frac{0,5 \cdot k \cdot t^3 + h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t) + b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t)}{k \cdot t^2 + h \cdot s + b \cdot d}, \quad (5.1)$$

где все обозначения размеров приведены по рис. 5.16.

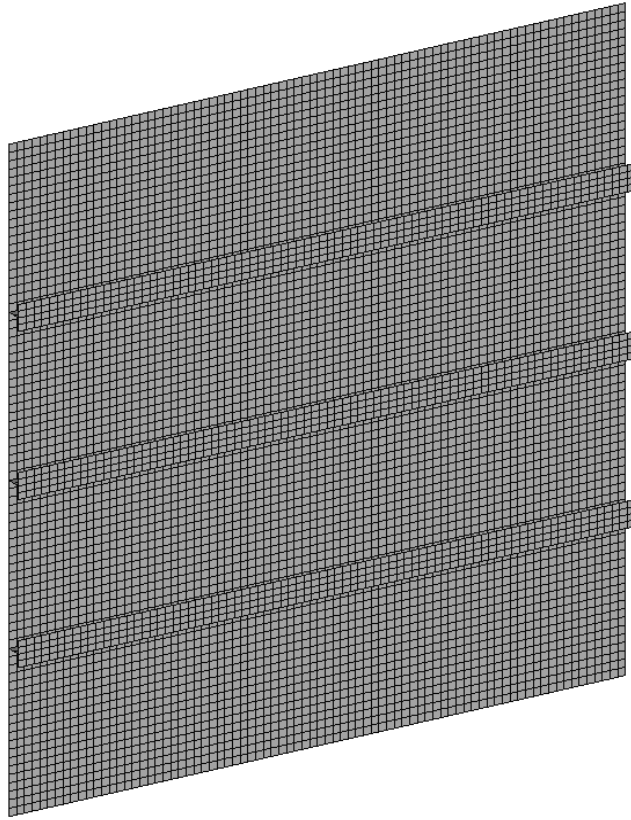
Из этого выражения легко можно получить выражение для определения параметра  $k$  (5.2):

$$k = \frac{h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t - c_1) + b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t + c_1)}{t^2 \cdot c_1 - 0,5 \cdot t^3}. \quad (5.2)$$

В этом выражении остается одна неизвестна величина – расстояние до центра тяжести  $c_1$ . Его, в свою очередь, можно определить, зная уровень напряжений в точках  $A$  и  $B$  сечения –  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$ . Именно их комбинация и определит величину параметра  $k$ .

В свою очередь, напряжение  $\sigma_A$  и  $\sigma_B$  можно найти, используя численные расчеты. Построенная конечно-элементная модель представляла собой пластину, подкрепленную ребрами жесткости (рис. 5.17). По двум вертикальным граням ее были поставлены шарнирно-неподвижные условия опирания. В качестве нагрузки принималась равномерно распределенная по всей внутренней плоскости пластины нагрузка единичного значения.

Основная сложность при определенных напряжений в точках  $A$  и  $B$  состояла в том, что они заключали в себе как изгибистую составляющую, причем в двух плоскостях, так и составляющую, от растяжения. Для вычисления же параметра  $k$  необходим учет только изгибной составляющей в плоскости расположения ребра жесткости. Потому был использован следующий подход.



*Рис. 5.17. Расчетная модель пластины, подкрепленной ребром жесткости*

В точках  $A$  и  $B$  в соответствии с расчетами определялись изгибающие моменты  $M_A$  и  $M_B$ . Далее в каждой из этих точек в соответствии с выражениями (5.3) и (5.4) определялась составляющая от изгиба в плоскости расположения ребра жесткости  $M_z^{lin}$  согласно выражению (5.5):

$$M_x = -D \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = M_x^{lin} + \mu \cdot M_z^{lin}, \quad (5.3)$$

$$M_z = -D \cdot \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = M_z^{lin} + \mu \cdot M_x^{lin}, \quad (5.4)$$

$$M_z^{lin} = \frac{M_z - \mu \cdot M_x}{1 - \mu^2}, \quad (5.5)$$

где  $\mu$  - коэффициент Пуассона.

Найденные таким образом величины моментов соответствуют только изгибу в плоскости ребра жесткости для точек  $A$  и  $B$ , соответственно,  $M_{Az}^{lin}$  и  $M_{Bz}^{lin}$ .

Далее, рассматривая изгиб условной балки, образованной ребром жесткости с частью обшивки, можно записать выражения для определения в точках  $A$  и  $B$  напряжений согласно выражений (5.6) и (5.7), соответственно:

$$\sigma_A = \frac{M_{Az}^{lin}}{I} \cdot c_1, \quad (5.6)$$

$$\sigma_B = \frac{M_{Bz}^{lin}}{I} \cdot c_2, \quad (5.7)$$

где  $I$  – момент инерции условной балки.

Учитывая, что  $c_1 + c_2 = c$ , из выражений (5.6) и (5.7) можно получить выражение для определения расстояния  $c_1$  в виде (5.8):

$$c_1 = \frac{\sigma_A \cdot M_{Bz}^{lin}}{\sigma_A \cdot M_{Bz}^{lin} + \sigma_B \cdot M_{Az}^{lin}} \cdot c. \quad (5.8)$$

Подставляя найденное таким образом расстояние  $c_1$  в выражение (5.2), получим искомое значение параметра  $k$ , который в физическом отношении указывает на количество толщин обшивки, которые принимают участие в изгибе в плоскости ребра жесткости вместе с этим ребром.

Изменяя в ходе численных расчетов шаг расположения ребер жесткости и толщину пластинки при неизменных геометрических параметрах ребра жесткости, условий закрепления и величины прилагаемой нагрузки, были определены величины параметра  $k$ , представленные в табл. 5.6.

Отметим, что указанные конструктивные параметры варьировались в диапазонах, которые наиболее часто используются в практике проектирования стальных емкостных конструкций. Значения параметра  $k$  определялись для средней части оребренной пластины, где при шарнирном опирании возникают наибольшие изгибающие моменты.

Полученные значения параметра  $k$ 

		Шаг ребер жесткости, см		
		80	120	150
Толщина обшивки, см	0,4	21	41	55
	0,6	40	68	90
	0,8	58	95	123
	1,0	76	121	154
	1,2	90	145	183
	1,4	110	166	212
	1,6	122	190	238

Для случая соотношения конструктивных параметров, выделенного в табл. 5.3 более темным цветом, в ходе экспериментальных исследований [105] были получены значения в диапазоне 109 – 119, что достаточно хорошо согласовывается с теоретическими результатами, полученными выше.

Таким образом, следует считать, что минимальное значение параметра  $k = 30$ , рекомендуемое действующей методикой проектирования емкостных сооружений при небольшой толщине стенки емкости оказывается явно не идущим в запас прочности, что является достаточно опасным фактором, который может приводить к возникновению аварийных ситуаций.

Отметим, также, что представленный подход может быть использован для проведения аналогичных расчетов и для ребер жесткости другой формы.

#### 5.4.2. Оптимизация формы ребра жесткости

В предыдущем разделе настоящей монографии было показано, что как с теоретической, так и из практической точек зрения наиболее эффективной является замкнутая форма ребра жесткости. Решим задачу относительно отыскания оптимальной формы его поперечного сечения.

Данная задача формулируется следующим образом. Пусть есть пластина толщиной  $t$ , подкрепленная ребром жесткости замкнутого профиля (для конкретности на рис. 5.18 представлено ребро в виде трапеции). При приложении нагрузки к ее внутренней

поверхности пластина вместе с ребром жесткости выгибается. При этом пластина рассматривается как конструктивно неизменяемый элемент, что никоим образом не отразится на окончательном результате.

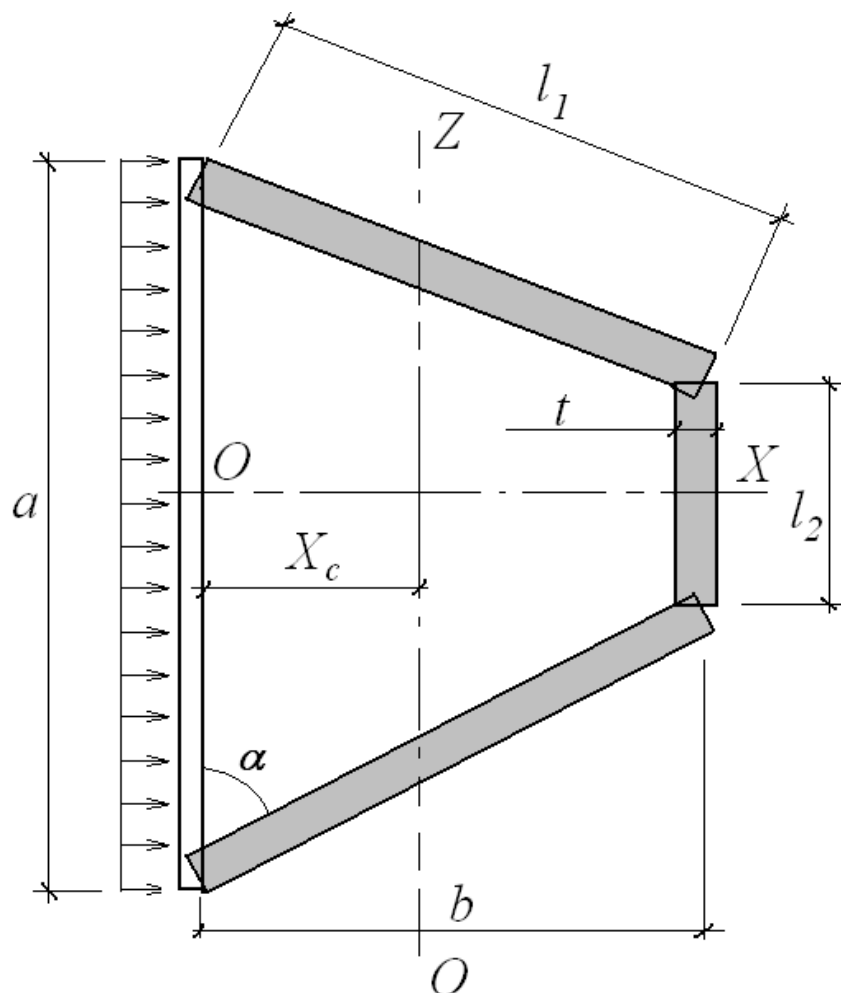


Рис. 5.18. Ребро жесткости в виде трапеции

Физически задача формулируется в виде отыскания таких размеров отдельных элементов ребра жесткости, при которых площадь его поперечного сечения, а значит и масса всего ребра, были бы минимальны при условии постоянной величины изгибного момента инерции поперечного сечения ребра в плоскости действия нагрузки. Толщина ребра при этом является постоянной величиной, которая физически соответствует случаю, когда ребро изготавливается, например, штампованием из плоского листа. Ограничение относительно изгибного момента инерции принято, поскольку именно изгибающие усилия являются во многих случаях определяющими с точки зрения несущей способности конструкции в целом.

Математически задача может быть сформулирована следующим образом. Сначала отыщем величину расстояния до центра тяжести поперечного сечения  $X_c$ , которое определится выражением (5.9):

$$X_c = \frac{(l_1^2 + l_1 \cdot l_2) \cdot \sin \alpha}{2 \cdot l_1 + l_2}, \quad (5.9)$$

где принятые обозначения геометрических размеров отдельных частей поперечного сечения ребра соответствуют представленным на рис. 5.18.

Далее может быть найден центральный момент инерции, который в рассматриваемом случае одновременно будет и главным, согласно выражению (5.10):

$$I_{zc} = \frac{2 \cdot A_0 \cdot t \cdot l_1^3 \cdot \sin^2 \alpha - 3 \cdot t \cdot l_1^4 \cdot \sin^2 \alpha}{3 \cdot A_0}, \quad (5.10)$$

где  $A_0$  – условная площадь, которая определяется отношением площади  $A$  поперечного сечения к толщине ее элементов по выражению  $A_0 = A/t$ .

Теперь отыщем частные решения при условиях, если неизменными являются длина верхней и нижней граней ребра  $l_1$  или угол их наклона  $\alpha$ . Эти два критерия определяют форму поперечного сечения ребра жесткости.

В первом случае математическое условие будет иметь вид выражения (5.11):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial l_1} = 0. \quad (5.11)$$

Найденное при этом решение будет иметь вид выражений (5.12) и (5.13):

$$l_1 = \frac{A}{2 \cdot t}, \quad (5.12)$$

$$l_2 = 0. \quad (5.13)$$

Физически эти выражения означают, что длина вертикальной части трапецеидального ребра жесткости должна равняться нулю. То есть по своей геометрической форме ребро становится вырожденным и принимает форму треугольника. В соответствии со сформулированной задачей при этом изгибный момент инерции такого сечения будет максимален при фиксированной площади ребра.

Во втором случае математическое условие будет иметь вид выражения (5.14):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial(\sin \alpha)} = 0. \quad (5.14)$$

В соответствии с этим условием можно получить два решения. Первое будет иметь вид выражений (5.15) и (5.16):

$$l_1 = \frac{2 \cdot A}{3 \cdot t}, \quad (5.15)$$

$$l_2 = -\frac{A}{3 \cdot t}. \quad (5.16)$$

Такое решение не имеет физического смысла, поскольку длина боковой стороны ребра жесткости не может быть отрицательной величиной.

Второе решение определится выражением (5.17):

$$\alpha = 0. \quad (5.17)$$

Оно оказывается вырожденным и также не имеет физического смысла.

Таким образом, наиболее рациональным в соответствии с условиями сформулированной задачи следует считать ребро жесткости с треугольной геометрической формой поперечного сечения. Именно такой случай был рассмотрен в предыдущем подразделе данной монографии и признан являющимся наиболее эффективным по сравнению с иными конструктивными решениями.

Отметим, также, что поскольку в качестве исходных предпосылок была принята постоянная толщина элементов поперечного сечения ребра жесткости, то сравнив выражения для определения площади поперечного сечения ребра (5.18) и его внешнего периметра (5.19), можно прийти к следующему выводу:

$$A = 2 \cdot l_1 \cdot t + l_2 \cdot t, \quad (5.18)$$

$$P = 2 \cdot l_1 + l_2 \quad (5.19)$$

определенная выше оптимальная треугольная форма поперечного сечения ребра жесткости с точки зрения изгибной прочности оказывается в то же время оптимальной и с точки зрения минимальной площади боковой поверхности. Такое условие имеет важное практическое значение, поскольку оказывается достаточно существенным при агрессивной внешней среде, в которой предусматривается эксплуатация емкостной конструкции. Ведь площадь поверхности, которая будет подвержена взаимодействию с такой средой, оказывается наименее возможной.

Сделанный вывод является справедливым только при постоянной толщине ребра, потому более целесообразными являются штампованные, а не сварные из разных листов ребра жесткости.

Заметим, также, что хотя данная задача и может показаться достаточно простой, однако для инженеров-проектировщиков она все же представляет значительный интерес.

### **5.4.3. Определение наиболее напряженной зоны конструкции**

В практике проектирования в соответствии с традиционным подходом сечения горизонтально расположенных ребер жесткости подбирают по наибольшему значению изгибающего момента, который определяется методом попыток. При этом приходится определять изгибающие моменты и продольные усилия во всех ребрах жесткости, а дальше, вычисляя в них напряжения, находить максимально нагруженное ребро.

Решение данной задачи может быть значительно упрощено, если отыскать наиболее напряженную зону в конструкции в общем

виде. Для этого рассмотрим квадратную в плане симметричную емкость (рис. 5.19).

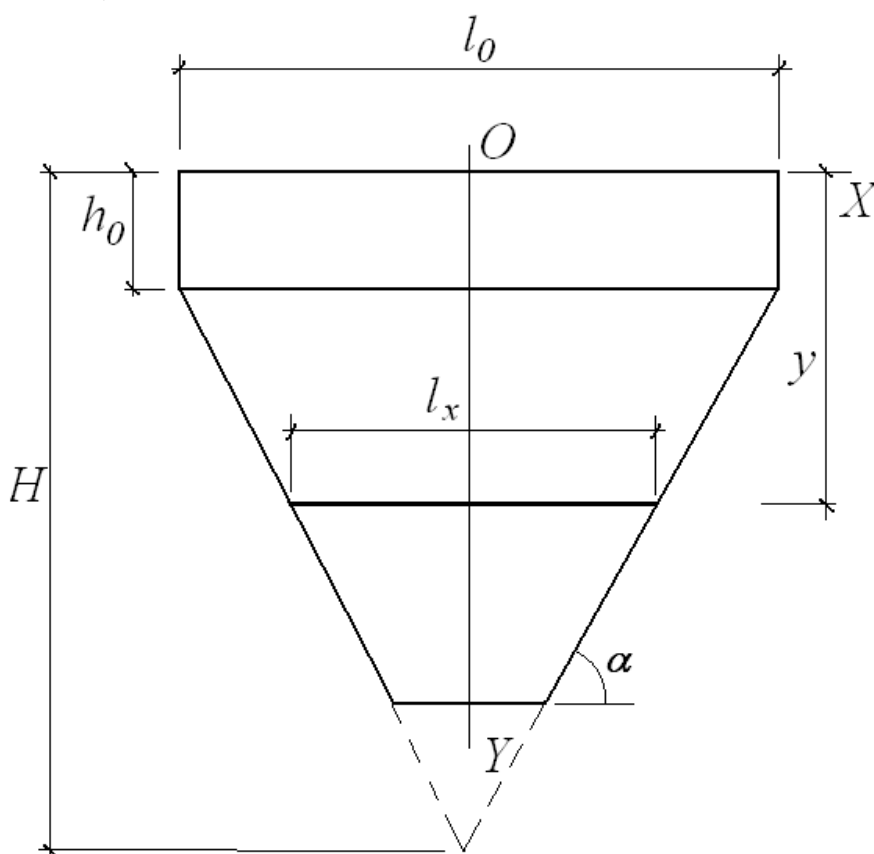


Рис. 5.19. Геометрия емкостной конструкции

В соответствии с традиционным подходом изгибающий момент  $M_x$  в произвольном горизонтальном ребре длиной  $l_x$  определится выражением (5.20):

$$M_x = P_x \cdot l_x / R, \quad (5.20)$$

где  $R$  – коэффициент, который может равняться 8 в случае шарнирного соединения между ребрами жесткости, 12 в случае жесткого соединения или 14 в случае учета упруго-пластичной работы ребра;

$P_x$  – нагрузка на ребро жесткости на глубине  $y$ , определяемая в общем виде согласно выражению (5.21):

$$P_x = C \cdot y, \quad (5.21)$$

где  $C$  – обобщенный коэффициент, который учитывает физико-механические характеристики сыпучего материала.

Длина ребра на глубине  $y$  может быть найдена согласно выражению (5.22):

$$l_x = l_0 - 2(h_0 - y) \cdot ctg\alpha, \quad (5.22)$$

где принятые обозначения геометрических размеров соответствуют приведенным на рис. 5.19.

Подставив выражения (5.21) и (5.22) в выражение (5.20), взяв первую производную по переменной  $y$  и приравняв ее нулю, получим следующие точки экстремума для изгибающего момента по высоте емкости (5.23) и (5.24):

$$y_1 = h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot tg\alpha, \quad (5.23)$$

$$y_2 = (h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot tg\alpha) / 3. \quad (5.24)$$

Заметим, что в случае прямоугольной в плане формы емкости выражения будут несколько более сложными, однако принципиальный результат оказывается таким же, как и в рассмотренном случае.

График, отражающий характер изменения величины изгибающего момента по высоте, приведен на рис. 5.17, а. Из него видно, что точка  $y_1$  – мнимая вершина емкости, где момент обращается в нуль. Максимальное значение момента будет отвечать точке  $y_2$ , которая расположена на уровне трети полной высоты мнимой пирамиды нижней наклонной части емкости.

Аналогичные выкладки могут быть выполнены для определения максимума продольной силы. При этом полученное решение будет иметь вид выражения (5.25):

$$y_2 = (h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot tg\alpha) / 2, \quad (5.25)$$

то есть будет отвечать точке, расположенной на уровне половины полной высоты мнимой пирамиды нижней наклонной части емкости.

Характер изменения величины продольной силы  $N_x$  по высоте емкости приведен на рис. 5.20, б.

Таким образом, можно констатировать, что наиболее опасной зоной с учетом одновременного действия изгибающего момента и продольной силы является зона, расположенная между  $1/3$  и  $1/2$  высоты полной мнимой пирамиды (на рис. 5.20 эта зона изображена более темным цветом). С учетом того, что растягивающие напряжения от продольной силы, как правило, не превышают 10 % от величины напряжений изгибающего момента, наиболее напряженный участок конструкции емкости будет приближаться к уровню  $1/3$  ее полной высоты.

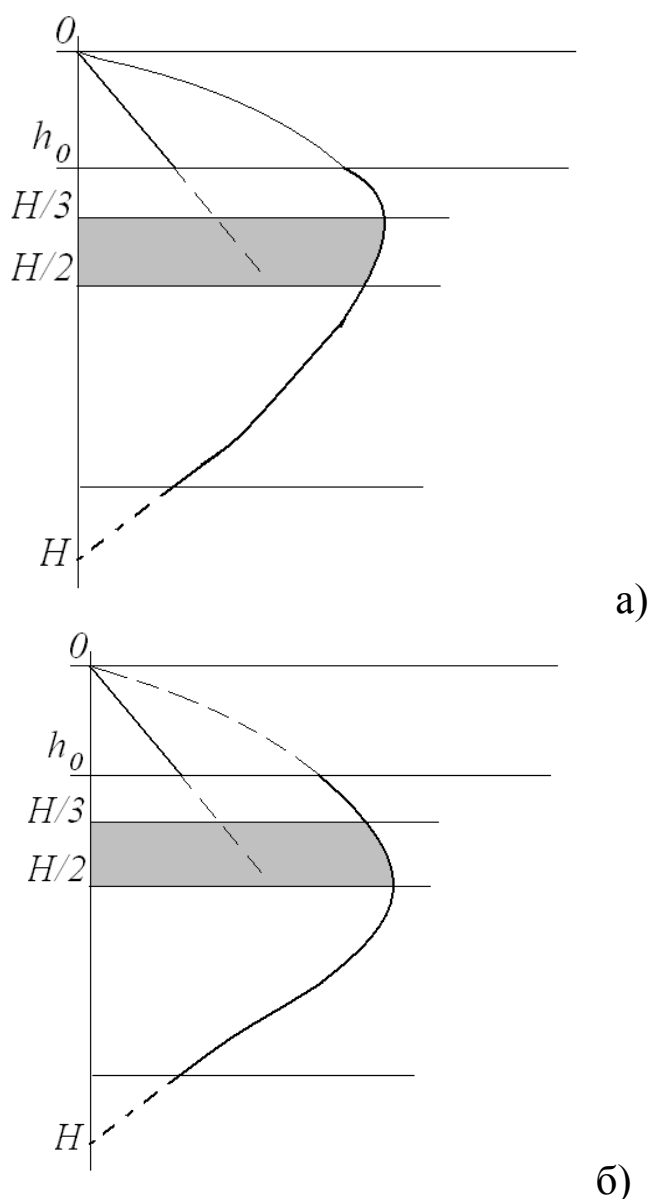


Рис. 5.20. Характер распределения изгибающего момента (а) и продольной силы (б) по высоте емкостной конструкции

Как и в ряде предыдущих случаев, данная задача была проанализирована с использованием возможностей МКЭ. Расчет выполнялся для квадратной в плане емкости с размерами  $6 \times 6$  м в плане, высотой вертикальной части  $h_0 = 0,6$  м и шагом расположения горизонтальных ребер жесткости по высоте емкости  $0,4$  м. При этом высота полной пирамиды, образованной нижней наклонной частью при угле наклона ее боковых граней к горизонту  $\alpha = 60^\circ$ , составила  $4,6$  м. Другие конструктивные параметры не имеют в данном случае принципиального значения.

Полученные результаты расчета обобщены в табл. 5.7. Отметим, что напряжения оказались достаточно высокими, что обусловлено рядом особенностей традиционной методики проектирования емкостных строительных конструкций, на которые было обращено внимание в предыдущих подразделах данной монографии.

Таблица 5.7

**Результаты численного расчета**

Расстояние $y$ , м	Момент $M_x$ , кН·м	Сила $N_x$ , кН	Напряжения, МПа
0,6	26,2	36,5	36,4
1,0	33,1	58,9	256,7
1,4	49,1	64,8	375,4
1,8	47,7	69,2	366,9
2,2	41,2	75,9	325,9
2,6	34,5	76,7	270,4
3,0	24,8	70,9	203,4
3,4	16,4	58,9	133,8
3,8	80,4	42,2	69,2

При внимательном анализе приведенных данных видно, что точки максимума расположены как раз в тех местах, которые определены полученными аналитическими зависимостями. Таким образом, при проектировании емкостной конструкции для сыпучих материалов оказывается возможным определить четко фиксированную зону, в которой конструктивные элементы оказываются наиболее напряженными.

## Заключение

В заключении следует отметить, что применение в проектной практике предлагаемого в данной монографии подхода к конструированию вертикальных жестких стальных емкостей для сыпучих материалов, по мнению авторов работы, позволяет снижать массу конструкции на 50 – 60 %, а в некоторых случаях и до 90 %, без адекватного понижения ее несущей способности. Вместе с тем удастся добиться более эффективного использования работы стали в сооружениях, что дополнительно способствует повышению их надежности и долговечности.

Авторам, также, хотелось бы принести свои извинения тем внимательным и добросовестным читателям, которые отыщут в данной монографии закравшиеся ошибки и недоработки. Все они возникли не из желания запутать или скрыть суть дела, а по нерадивому недосмотру авторов, которые, стремясь улучшить представленную работу, вполне могли и перестараться.

## Список использованной литературы

1. Молодченко Г. А. Реконструкция хранилищ для сыпучих материалов / Г. А. Молодченко, В. Н. Попельчук, Ч. С. Довнар. – Харьков: ХИИГХ, 1989. – 66 с.
2. Банников Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Днепропетровск: Наука и образование, 2003. – 150 с.
3. Проектирование зданий и сооружений металлургических заводов / Под ред. А. И. Кикина. – М.: Стройиздат, 1963. – 322 с.
4. Вихрев И. Д. Строительство заводов черной металлургии / И. Д. Вихрев. – М.: Госстройиздат, 1968. – 228 с.
5. Хавин Я. М. Сооружения и здания на поверхности шахт / Я. М. Хавин. – М.: Углетехиздат, 1950. – 230 с.
6. Фролов А. Т. Горно-технические здания и сооружения угольных шахт / А. Т. Фролов. – М.: Углетехиздат, 1948. – 260 с.
7. Вайгель А. Рудничные подъемные устройства и шахтные бункера / А. Вайгель. – М.: ОНТИ, 1930. – 121 с.
8. Розенблит Г. Л. Стальные конструкции зданий и сооружений угольной промышленности / Г. Л. Розенблит. – М.: Углетехиздат, 1953. – 272 с.
9. Баклашев И. В. Проектирование зданий и сооружений горных предприятий / И. В. Баклашев, Г. П. Антонов, В. Н. Борисов. – М.: Недра, 1979. – 365 с.
10. Лурье З. С. Бункерные устройства углеобогатительных и брикетных фабрик / З. С. Лурье. – М.: Недра, 1972. – 208 с.
11. Матвеев С. Г. Рудничные сооружения / С. Г. Матвеев. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 580 с.
12. Справочник по проектированию цементных заводов / Под ред. С. И. Данюшевского. – Л.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
13. Пожитков В. И. Монтаж негабаритных аппаратов из двухслойной стали / В. И. Пожитков, А. К. Фельдман, И. Л. Перлис. – Л.: Изд-во лит-ры по стро-ву, 1967. – 152 с.

14. Лурье З. С. Комплексная механизация и автоматизация бункеров тепловых электростанций / З. С. Лурье. – Л.: Энергия, 1975. – 136 с.
15. Пунков С. П. Хранение зерна, элеваторно-складское хозяйство и зерносушение / С. П. Пунков, А. И. Стародубцева. – М.: Агропромиздат, 1990. – 367 с.
16. Малин Н. И. Технология хранения зерна / Н. И. Малинин. – М.: КолосС, 2005. – 280 с.
17. Попельнух В. Н. Температурные напряжения в стенах силосов: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.01 / Харьковская гос. академия городского хозяйства. – Х., 1999. – 159 с.
18. Солодарь М. Б. Металлические конструкции для строительства на севере / М. Б. Солодарь, Ю. С. Плишкин, М. В. Кузнецова. – Л.: Стройиздат, 1981. – 207 с.
19. Ваганов А. П. Деревянные подвесные хранилища для сыпучих материалов / А. П. Ваганов // Строительная промышленность. – 1950. – № 10. – С. 12 – 14.
20. Литвиненко В. И. Железобетонные бункера и силосы / В. И. Литвиненко. – М.: Госстройиздат, 1953. – 278 с.
21. Ждахин Л. П. Расчет железобетонных бункеров по предельным состояниям / Л. П. Ждахин. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1970. – 304 с.
22. Шебуев Б. А. Железобетонные резервуары, бункеры и силосы. Расчёт и конструирование / Б. А. Шебуев. – М.: ОНТИ, 1935. – 322 с.
23. Липницкий М. Е. Проектирование железобетонных бункеров и силосов / М. Е. Липницкий, Ж. Р. Абрамович. – Л.: Стройиздат, 1960. – 356 с.
24. Ягофаров Х. Гибкие бункера / Х. Ягофаров. – М.: Стройиздат, 1980. – 168 с.
25. Ваганов А. П. Сборные подвесные хранилища / А. П. Ваганов. – Л.-М.; Госстройиздат, 1955. – 79 с.
26. Кантарович З. Б. Расчёт подвесных железных бункеров / З. Б. Кантарович. М.-Л.: ОНТИ, 1932. – 42 с.
27. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81\*. – [Действующий от 1983-01-02]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
28. Конструкції будівель і споруд. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу: ДБН В.2.6-163:2010. – [Дей-

- ствуючий от 2011-01-12]. – К.: Міненергобуд України, 2011. – 202 с.
29. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. – [Действующий от 1998-01-07] – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с.
30. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна: СНиП 2.10.05-85. – [Действующий от 1986-01-01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 24 с.
31. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. – [Действующий от 1987-01.01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
32. Складские здания: СНиП 2.11.01-85\*. – [Действующий от 1986-01.01]. – М.: Госстрой СССР, 1991. – 40 с.
33. Справочник проектировщика. Металлические конструкции: в 3 т. / Под ред. В. В. Кузнецова. – М.: Изд-во АСВ, 1998. – Т. 2: Стальные конструкции зданий и сооружений. – 1998. – 526 с.
34. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
35. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
36. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величкина, В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
37. Мельников Н. П. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – М. Стройиздат, 1962. – 620 с.
38. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
39. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров / Центр. н.-и. и проек.-эксперим. ин-т пром. зданий и сооруж. – М.: Стройиздат, 1978. – 29 с.
40. ДСТУ-Н Б EN 1991-4:2014. Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 4. Бункери і резервуари (EN 1991-4:2006, IDT).
41. ДСТУ-Н Б EN 1993-4-1:2014. Єврокод 3. Проектування сталевих конструкцій. Частина 4-1. Силоси (EN 1991-4-1:2007, IDT).

42. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. – [4<sup>th</sup> ed]. – McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
43. ESDEP WG: Vol. 15: Structural Systems. Bins: Lecture 15C.2. – 31 p.
44. Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
45. Ягофаров Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
46. Вобликов Е. М. Технология элеваторной промышленности: Учебник для вузов / Е. М. Вобликов. – СПб., М.-К.: Издательство «Лань», 2010. – 384 с.
47. Лащенко М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М. Н. Лащенко. – Л.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969. – 184 с.
48. Сахновский М. М. Уроки аварий стальных конструкций / М. М. Сахновский, А. М. Титов. – К.: Будівельник, 1969. – 200 с.
49. Аугустин Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский.; пер. с польского. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с.
50. Беляев Б. И. Причины аварий стальных конструкций и способы их устранения / Б. И. Беляев, В. С. Корниенко. – М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1968. – 208 с.
51. Шкинев А. Н. Аварии в строительстве / А. Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 320 с.
52. Крылов И. И. Классификация причин отказов стальных конструкций производственных зданий и сооружений / И. И. Крылов, Ю. П. Шевцов // Известия вузов: сер. Строительство и архитектура. – 1983. – № 11. – С. 16 – 19.
53. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 312 с.
54. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.
55. Решетнев Е. К. Истечение сыпучих материалов из бункеров складочных комплексов / Е. К. Решетнев. – М.: Наука, 1987. – 119 с.
56. Бернаш П. Л. Течение сыпучих материалов по стенкам бункера. Конструирование и технология машиностроения / П. Л. Бернаш // Труды американского общества инженеров – механиков: серия В, 1969. – Т. 91. – № 2. – С. 211 – 223.

57. Суфиянов Р. Ш. Метод расчета бункеров с учетом уплотняемости сыпучей среды: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.09. / Р. Ш. Суфиянов. – М., 1994. – 16 с.
59. Багстер Д. Ф., Недеманн Р. М. К вопросу о применении метода Кулона для расчета напряжений, действующих на стенки бункеров / Пер. статьи D. F. Bagster, R. M. Nedderman из журн. Powder technology, 1985. – Vol. 42. - № 2. – P. 193 – 197.
60. Лончный В. Математические модели бункера для сыпучих материалов / Пер. с польск. статьи W. Loczny. Modele matematyczne zasabrika materlatow sypkich. Журн. IZM, 1978. – V. 30. – № 4. – P. 219 – 224.
61. Пешль А. С. Теория сводообразования в бункерах. Конструирование и технология машиностроения / А. С. Пешль // Труды американского общества инженеров – механиков: серия В, 1969. – Т. 91. – № 2. – С. 142 – 152.
62. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов / В. А. Богомягких. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1974. – 149 с.
63. Семенов В. Ф. Бункеры и хранилища зерна: [учеб. пособие для студ. вузов] / В. Ф. Семенов. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
64. Дослідження причин руйнації будівельного об'єкту – силосу для зберігання сухого зерна на 5500 тонн (інв. №9034, за технологічною схемою – ємність №14, СМВУ 220.14В12) пункту приймання та відвантаження зерна філії «Золотоніська» ТОВ СП „НІБУЛОН”, розташованої за адресою вул. Залізнична, 38 в с. Вознесенське Золотоніського р-ну Черкаської обл. – Звіт про НТР (заключний) / ВАТ Укрндіпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського; Керівник О.І. Голоднов – К., 2009. – 51 с.
65. Wichtowski B. Service life of steel coke bin – non-destructive testing (NDT) / B. Wichtowski, W. Nazarko // Proc. of 6<sup>th</sup> Int. Conf. “Modern Building Materials, Structures and Tchniques” – Vilnius. – 1999. – P. 155 – 159.
66. Криворожский государственный горно-металлургический комбинат «Криворожсталь». Доменная печь № 9. Бункерная эстакада. Обследование и оценка технического состояния металлоконструкций: Отчет о НИР, в 3 т. / ОАО «Проектный институт «Днепрпроектстальконструкция». – Днепропетровск, 1997. – 226 с.

67. Джур Ю. Ф. Коррозионный износ металлоконструкций и сборного железобетона объектов металлургических и горно-обогатительных комбинатов. Продление сроков эксплуатации / Ю. Ф. Джур, П. В. Павлык // Сб. трудов VIII Укр. науч.-технич. конф. "Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее". – К. – 2004. – С. 221 – 223.
68. Ожегов С. И. Словарь русского языка / Под ред. Н. Ю. Шведовой. – [22-е изд., стер.]. – М.: Русский язык, 1990. – 921 с.
68. Словарь русского языка: в 4 т. / АН СССР, Ин-т рус. яз. / Под ред. А. П. Евгеньевой. – [2-е изд., испр. и доп.]. – М.: Русский язык, 1981. – 698 с.
70. Великий тлумачний словник сучасної української мови [уклад. і голов. ред. Бусел В. Т.]. – К., Ірпінь: ВТФ «Перун», 2002. – 1440 с.
71. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – [9-е изд.]. – М.: Наука, 1981. – 448 с.
72. Пригоровский Н. И. Исследование напряжений и жесткости деталей машин на тензометрических моделях / Н. И. Пригоровский, А. К. Прейсс. – М.: Изд-во АН СССР, 1958. – 231 с.
73. Кочегаров А. В. Оптимизация конструкции и параметров бункера-дозатора решетной установки / А. В. Кочегаров. – Воронеж: Мысль, 2007. – 116 с.
74. Филлипов Г. С. Способы и средства интенсификации истечения сыпучих материалов из технологических емкостей / Г. С. Филлипов. – М.: Стройиздат, 1989. – 49 с.
75. Мерсиуз К., Дрител А. Использование гибких силосов для сыпучих продуктов / Пер. с нем. статьи Mersiows Ch., Drittell A. Журн. Lebensmittelindustrie, 1979. – Vol. 26. – № 8. – P. 349 – 351.
76. Хессе Т. Бункера для сыпучих материалов / Пер. с нем. статьи Hesse T. Журн. PLZ, 1977. – Vol. 28. – № 8. – P. 753 – 757.
77. Ращепкина С. А. Металлические спирально-навивные силосы / С. А. Ращепкина, С. В. Ращепкин. – Саратов, 2004. – 146 с.
78. Любаров Б. И. О расчете воронок стальных бункеров с учетом пластических деформаций / Б. И. Любаров // Проектирование металлических конструкций. – Л., 1972. – Серия VII, вып. 6 (38). – С. 29 – 34.
79. Плишкин Ю. С. О работе прямоугольных пластинок в упруго-пластической стадии при циклических загрузениях / Ю. С. Плишкин, Б. И. Любаров // Проектирование металлических конструкций. – Л., 1972. – Серия VII, вып. 7 (39). – С. 15 – 21.

80. Банніков Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. – 172 с.
81. Алферов К. В. Бункеры, затворы и питатели / К. В. Алферов. – Л.: Изд-во машиностр. лит-ры, 1946. – 178 с.
82. Алфёров К. В., Бункерные установки / К. В. Алферов, Р. Л. Зенков. – М.: Машгиз, 1955. – 308 с.
83. Стрелецкий Н. С. Проектирование и изготовление экономичных металлических конструкций / Н. С. Стрелецкий, Д. Н. Стрелецкий. – М.: Стройиздат, 1964. – 360 с.
84. Хуберян К. М. Рациональные формы трубопроводов, резервуаров и напорных перекрытий / К. М. Хуберян. – М.: Стройиздат, 1956 – 187 с.
85. А. с. 678174 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 04 Н 7/22. Днище для хранилища сыпучих материалов / М. Г. Мильнер (СССР). – № 2561173/29-33; заявл. 21.12.77; опубл. 05.08.79, Бюл. № 29.
86. А. с. 1065573 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 04 Н 7/22. Днище хранилища для сыпучих материалов / Г. П. Иванов, Ю. Д. Макаров (СССР). – № 3398274/29-33; заявл. 16.02.82; опубл. 07.01.82, Бюл. № 1.
87. А. с. 1222801 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 04 Н 7/22. Бункер для сыпучих материалов / Г. П. Иванов, А. Г. Трущев (СССР). – № 3787366/29-33; заявл. 13.07.84; опубл. 07.04.86, Бюл. № 13.
88. А. с. 881282 СССР, МКИ<sup>3</sup> Е 04 Н 7/22. Бункер / Г. П. Иванов (СССР). – № 2865668/29-33; заявл. 04.01.80; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42.
89. Ягофаров А. Х. Совершенствование конструкции, уточнение расчета и оптимальные параметры стального круглого бункера: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / А. Х. Ягофаров. – Екатеринбург, 2005. – 23 с.
90. Корн Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров. Определения, теоремы, формулы / Г. Корн, Т. Корн; пер. с англ. / Под общ. ред. И. Г. Абрамовича. – М.: Наука, 1970. – 720 с.
91. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Ю. Г. Евтушенко. – М.: Наука, 1982. – 432 с.
92. Брудка Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брудка, Р. Гарнцарек, К. Милачевски; пер. с польск. – К.: Будівельник, 1989. – 152 с.

93. Хорольський М. С. Використання еластомерних матеріалів для захисту конструкцій від корозійного та ерозійного зносу / М. С. Хорольський // Хімічна промисловість, 2001. – № 3. – С. 53 – 58.
94. Балашов А. П. Защитное резиновое покрытие мокрых золоуловителей / А. П. Балашов, А. М. Дьяченко, И. Ф. Резунов, Г. А. Блох. // Энергетик, 1983. – № 10. – С. 10.
95. Рабер Л. М. Соединения на высокопрочных болтах. Диагностика. Ремонт. Повышение надежности конструкций / Л. М. Рабер. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 124 с.
96. Декл. пат. 69817 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Металева ємність для сипучих матеріалів із окремих панелей / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 200331211224; заявл. 09.12.03; опубл. 15.09.04, Бюл. № 9.
97. Декл. пат. 70576 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Вузол з'єднання стінових панелей металевих ємностей для сипучих матеріалів / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211267; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
98. Декл. пат. 70577 А Україна, МПК<sup>7</sup> Е 04 Н 7/30. Вузол кріплення футерівки металевих ємностей для сипучих матеріалів / Банніков Д. О., Казакевич М. І.; заявитель и патентообладатель Дніпропетр. нац. унів-т залізнич. трансп ім. акад. В. Лазаряна. – № 20031211268; заявл. 09.12.03; опубл. 15.10.04, Бюл. № 10.
99. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
100. Розин Л. А. Основы метода конечных элементов в теории упругости / Л. А. Розин. – Л.: ЛПИ, 1972. – 77 с.
101. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 200 с.
102. Цанг К., Пури В. М., Ман бек Х. Б., Уонг М. К. Конечно-элементная модель для расчета температурных напряжений в стенках бункера / Пер. с англ. статьи Zhang Q. E. A., Purie V. M., Manback H. B., Uwoung M. Cs. Журн. American Society of Agricultural Engineering, 1987. – Vol. 30. – № 6. – P. 1797 – 1806.
103. Крюкова О. С. Створення розрахункової моделі елеваторного комплексу / О. С. Крюкова // Будівництво України, 2008. – № 6. – С. 42 – 45.

104. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунрв, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофимчук. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332 с.
105. Экспериментальное исследование стенок бункеров на моделях: Отчет о НИР по теме № 9 148-51-81 (заключит.) / Госуд. проектн. ин-т строит. металлокон-ий «Днепрпроектстальконструкция». – Днепропетровск, 1982. – 413 с.
106. Большаков В. И. Основы метода конечных элементов / В. И. Большаков, Е. А. Яценко, Г. Соссу, М. Лемэр, Ж. М. Рейнер, Ж. Кестенс, Г. Варзее, И. Кормо. – Днепропетровск: ПГАСА, 2000. – 255 с.
107. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимации / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. / Под ред. Н. С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
108. Папкович П. Ф. Труды по прочности корабля / П. Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1956. – 680 с.
109. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 344 с.
110. Бубнов И. Г. Избранные труды / И. Г. Бубнов – Л.: Судпромгиз, 1956. – 440 с.

Наукове видання

**Качуренко Валентина Володимирівна  
Банніков Дмитро Олегович**

**КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ  
СТАЛЬНЫХ ЕМКОСТЕЙ  
ДЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ**

монографія

Коректор Д. О. Банніков  
Комп'ютерна верстка Д. О. Банніков

Підписано до друку 19.04.16. Формат 60×84/16.  
Папір офсетний. Ум.-друк. арк. 10,1.  
Тираж 300 прим. Вид. № ..... Зам. № .....

Віддруковано у видавництві “Нова ідеологія”.  
49000, м. Дніпропетровськ, пр. Кірова, 103.  
Свідоцтво ДК № 191 від 20.09.2000 р.