

Банников Д. О.

**РУКОВОДСТВО  
по проектированию  
вертикальных стальных  
емкостных конструкций  
для сыпучих материалов**

Днепропетровск - 2009

УДК 624.954  
ББК 38.728  
**Б-23**

**Банников Д. О.**

Руководство по проектированию вертикальных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников. – Днепропетровск: Новая идеология, 2009. – 57 с.

**Разработано:**

к.т.н., доцентом, зав. кафедрой строительных конструкций  
Днепропетровского национального университета  
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна  
*Банниковым Дмитрием Олеговичем*

Настоящее Руководство является практическим воплощением основных теоретических и опытно-экспериментальных результатов, полученных автором в ходе его многолетних исследований стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Основной задачей настоящего издания автор считает обобщенное, методическое и практически приемлемое изложение тех научных основ, которые были сформулированы им в виде теории формообразования емкостных сооружений и отражают его практическое видение затронутой проблемы – проблемы проектирования надежных и долговечных стальных емкостных конструкций в сочетании с их улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

Руководство предназначено для инженерно-технических работников проектных и конструкторских организаций, занимающихся разработкой и созданием стальных конструкций. Может быть полезным для научно-технических работников, студентов и аспирантов вузов, а также всех, интересующихся вопросами проектирования тонкостенных пространственных конструкций.

**ББК 38.728**  
**УДК 624.954**  
**Б-23**

© Банников Д. О., 2009

# ПРЕДИСЛОВИЕ

Исследованием стальных емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов автор занимался на протяжении довольно значительного периода времени. Основные полученные при этом результаты легли в основу сначала его кандидатской диссертационной работы, а затем и докторской. Часть из них носят чисто теоретический характер, иные имеют большую прикладную направленность; одни результаты представляют собой аналитические заключения, другие потребовали фундаментальной опытно-экспериментальной проверки.

В целом, все полученные данные позволили не только пересмотреть традиционные представления о работе сооружений данного класса, но также позволили и по-иному подойти к процессу их проектирования. В связи с этим автором разработано настоящее Руководство, вобравшее в себя в концентрированном виде все те подходы и идеи, которые, по его мнению, могут представлять интерес при непосредственном расчете и конструировании стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Основной задачей настоящего издания автор считает обобщенное, методическое и практически приемлемое изложение тех научных основ, которые были сформулированы им в виде теории формообразования емкостных сооружений и отражают его практическое видение затронутой проблемы – проблемы проектирования надежных и долговечных стальных емкостных конструкций в сочетании с их улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками.

Настоящее Руководство построено по принципу последовательного и детального изложения всего процесса проектирования емкостных конструкций, начиная с перечисления исходных данных, необходимых для их проектирования, определения формы и размеров будущего сооружения и заканчивая устройством специальных защитных приспособлений, позволяющих повысить качество работы конструкции и уберечь ее от нежелательного преждевременного износа и выхода из строя.

Изложение представленного в работе материала базируется на двух основополагающих идеях, которые выкристаллизовались у автора в процессе его исследовательской деятельности. Во-первых, это единый подход к проектированию и анализу работы емкостных конструкций для сыпучих материалов независимо от их внешней формы и геометрических размеров. Традиционный подход предполагает раздельное рассмотрение невысоких бункерных емкостей и более высоких силосных. При этом принципиально различными оказываются решения как вопросов выбора их конструктивной схемы, так и дальнейшего расчета, включая и определение

действующих нагрузок от сыпучего материала. Автору представляется не совершенным такое, во многом, искусственное классификационное деление, поэтому приводимые рекомендации имеют достаточно обобщенный характер.

Вторая идея, проводимая автором в настоящем издании заключается в необходимости и целесообразности рассмотрения емкостной конструкции как единой пространственной системы, а не ансамбля несвязанных между собой конструктивов. Это, в свою очередь, позволяет использовать в процессе расчета современные программные комплексы и компьютерную технику, что не только повышает достоверность проектирования, но и придает ему необходимую точность. Безусловно, открытым и достаточно спорным является вопрос взаимосвязки такого подхода с рекомендациями действующих нормативных документов, в общем-то не ориентированных на него. Однако, и эта сторона нашла некоторое отображение в приводимых рекомендациях.

В целом, настоящее Руководство предназначено для инженерно-технических работников проектных и конструкторских организаций, занимающихся разработкой и созданием стальных конструкций. Однако оно может оказаться полезным для научно-технических работников, студентов и аспирантов вузов, а также всех, интересующихся вопросами проектирования тонкостенных пространственных конструкций.

Автор выражает свою бесконечную признательность и благодарность за помощь в подготовке материала для настоящего Руководства, а также многолетнее и плодотворное сотрудничество главному инженеру «Проектного института Днепрпроектстальконструкция» А. А. Тарнопольскому и главному специалисту отделения специальных конструкций «Проектного института Днепрпроектстальконструкция» В. Ф. Сафронкову.

# Раздел 1. Общие сведения

## 1.1. Область применения

1.1.1. Настоящее Руководство распространяется на проектирование одиночных вертикальных жестких стальных двухступенчатых саморазгружающихся емкостных конструкций с вертикальной верхней частью, предназначенных для временного или длительного хранения несвязных сыпучих материалов, кроме тех емкостей, которые находятся в условиях повышенных температур.

1.1.2. Ограничений по видам и фракционному составу хранимых сыпучих материалов рекомендации настоящего Руководства не предполагают.

1.1.3. Ограничений по форме боковой поверхности, размерам и объему проектируемых емкостных конструкций рекомендации настоящего Руководства не предполагают.

1.1.4. Основными рекомендуемыми видами проектируемых емкостных конструкций являются пирамидально-призматическая емкость и конусно-цилиндрическая емкость.

1.1.5. Основной рекомендуемой формой проектируемых емкостных конструкций является двоякосимметричная в плане форма.

1.1.6. Загрузка проектируемых емкостных конструкций предполагается через верхнее загрузочное (впускное) отверстие, а разгрузка – через нижнее разгрузочное (выпускное) отверстие.

1.1.7. Ограничений по виду, форме и скорости загрузки проектируемых емкостных конструкций рекомендации настоящего Руководства не предполагают.

1.1.8. Разгрузка проектируемых емкостных конструкций предполагается самотечной.

## 1.2. Нормативные ссылки

1.2.1. Рекомендации настоящего Руководства построены с учетом требований следующих нормативных документов, действующих в Украине на момент их подготовки:

- СНиП II-23-81\*. Стальные конструкции. Нормы проектирования [1];

- ДБН В.2.2-8-98. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна [2];
- СНиП 2.09.03-85. Сооружения промышленных предприятий [3].

1.2.2. Рекомендации настоящего руководства не предполагают ограничений относительно использованного при проектировании емкостной конструкции сортамента металлопроката. При этом допускается применение сортаментов зарубежных производителей.

### **1.3. Термины и определения**

1.3.1. Емкостная конструкция – строительная конструкция, образованная расположенными по ее периметру плоскими или выпуклыми листовыми элементами, формирующими замкнутое внутреннее пространство. В листовых элементах предусматривают верхнее загрузочное отверстие, расположенное в верхней части конструкции и предназначенное для загрузки через него хранимого сыпучего материала, а также нижнее разгрузочное отверстие, расположенное в нижней части конструкции и предназначенное для выгрузки через него хранимого сыпучего материала.

Не рекомендуется разделять емкостные конструкции на бункера и силосы. Все подобные разновидности следует рассматривать с единых позиций и подходить к их проектированию на основе единых рекомендаций.

1.3.2. Одиночная емкостная конструкция – емкостная конструкция, не имеющая каких-либо общих конструктивных элементов, кроме опорных, с иными строительными конструкциями.

1.3.3. Вертикальная емкостная конструкция – емкостная конструкция, имеющая вертикально расположенные оси загрузочного и разгрузочного отверстий, а также пространство для хранения сыпучего материала, вытянутое по вертикали.

1.3.4. Жесткая емкостная конструкция – емкостная конструкция, внешняя форма и геометрические размеры которой остаются практически неизменяемыми в процессе разгрузки, хранения и выгрузки из нее сыпучего материала.

1.3.5. Стальная емкостная конструкция – емкостная конструкция, все конструктивные элементы которой, за исключением элементов футеровки, выполнены из стального металлопроката.

1.3.6. Двухступенчатая емкостная конструкция – емкостная конструкция, состоящая из двух жестко связанных между собой частей: верхней, предназначенной, как правило, для формирования необходимого объема хранимого сыпучего материала, и нижней, предназначенной, как правило, для обеспечения выгрузки хранимого сыпучего материала из конструкции.

1.3.7. Саморазгружающаяся емкостная конструкция – емкостная конструкция, спроектированная таким образом, что при ее разгрузке не остается каких-либо мертвых зон неразгруженного сыпучего материала.

1.3.8. Емкостная конструкция с вертикальной верхней частью – емкостная конструкция, у которой боковая поверхность верхней части составляет прямой угол к горизонту.

1.3.9. Емкостная конструкция, находящаяся в условиях повышенных температур – емкостная конструкция, на которую возможно воздействие температур выше  $+50\text{ }^{\circ}\text{C}$  со стороны внешней среды или сыпучего материала.

1.3.10. Пирамидально-призматическая емкость – емкостная конструкция, имеющая нижнюю часть в виде усеченной пирамиды и верхнюю часть в виде прямой призмы.

1.3.11. Конусно-цилиндрическая емкость – емкостная конструкция, имеющая нижнюю часть в виде усеченного конуса и верхнюю часть в виде прямого цилиндра.

1.3.12. Двукосимметричная емкостная конструкция – емкостная конструкция, имеющая горизонтальное сечение в любом месте по высоте в виде правильного многоугольника или круга.

1.3.13. Внешний вид и основные составные элементы одиночной вертикальной жесткой двухступенчатой емкостной конструкции с вертикальной верхней частью для сыпучих материалов представлены на рис. 1.1.

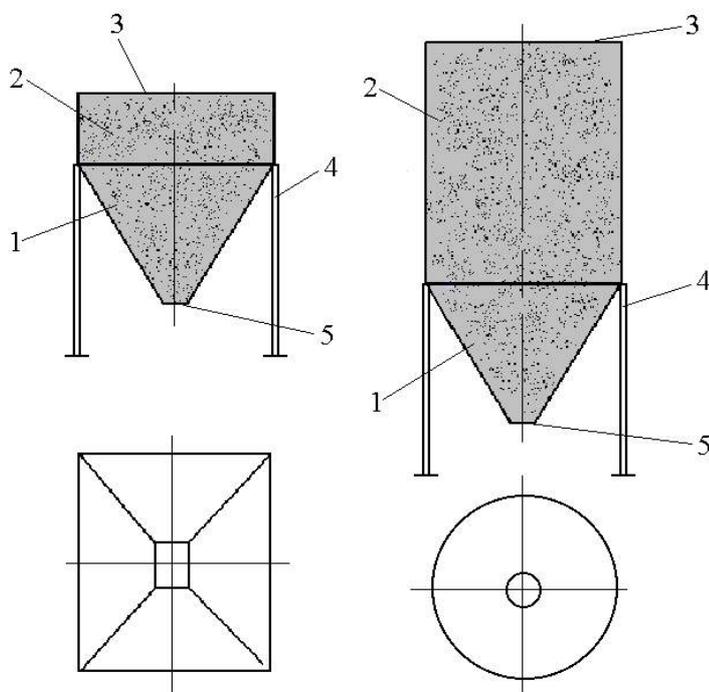


Рис. 1.1. Принципиальная схема емкостной конструкции для сыпучих материалов:

1 – нижняя часть, 2 – верхняя часть, 3 – загрузочное отверстие, 4 – опорный элемент, 5 – разгрузочное отверстие

1.3.13. Сыпучий материал – материал, имеющий выраженную зерновую структуру, с размером зерна обеспечивающим возможность его течения в замкнутом пространстве.

1.3.14. Несвязный сыпучий материал – сыпучий материал, между зернами которого практически полностью отсутствуют силы сцепления, препятствующие свободному взаимному перемещению этих зерен.

1.3.15. Загрузка емкостной конструкции – процесс перемещения сыпучего материала из внешней среды во внутреннее пространство емкостной конструкции.

1.3.16. Разгрузка емкостной конструкции – процесс перемещения сыпучего материала из внутреннего пространства емкостной конструкции во внешнюю среду.

1.3.17. Самоотечная разгрузка емкостной конструкции – разгрузка емкостной конструкции, происходящая только под действием веса хранимого сыпучего материала, без использования каких-либо дополнительных внешних побуждающих устройств.

## 1.4. Принятые обозначения

1.4.1. В настоящем Руководстве использованы следующие обозначения геометрических параметров емкостной конструкции (рис. 1.2 - 1.4):

$a_1$  – ширина разгрузочного отверстия;

$b_1$  – длина разгрузочного отверстия;

$a_2$  – ширина загрузочного отверстия;

$b_2$  – длина загрузочного отверстия;

$h_1$  – высота нижней части;

$h_2$  – высота верхней части;

$\alpha$  – угол наклона к горизонту образующей нижней части (для круглой и квадратной в плане формы);

$\alpha_1$  – угол наклона к горизонту образующей нижней части второй грани (для прямоугольной двоякосимметричной в плане формы);

$\beta$  – угол наклона к горизонту ребра нижней части (для прямоугольной в плане формы);

$V$  – полный объем.

1.4.2. Полный объем емкостной конструкции следует вычислять как объем фигуры, ограниченной внутренними поверхностями конструкции. Он равен сумме полного объема нижней части конструкции  $V_1$  и верхней части конструкции  $V_2$ , и может быть вычислен согласно выражению (1.1):

$$V = V_1 + V_2 = A \cdot h_1 \cdot \left( \frac{a_1^2}{4} + \frac{a_1 \cdot h_1}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + A \cdot h_2 \cdot \left( \frac{a_1}{2} + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2, \quad (1.1)$$

где коэффициент  $A$  определяется в зависимости от формы емкостной конструкции в плане: для круглой формы  $A = \pi$ , для многоугольной формы – согласно выражению (1.2), в зависимости от количества сторон многоугольника  $n$ :

$$A = n \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{n}. \quad (1.2)$$

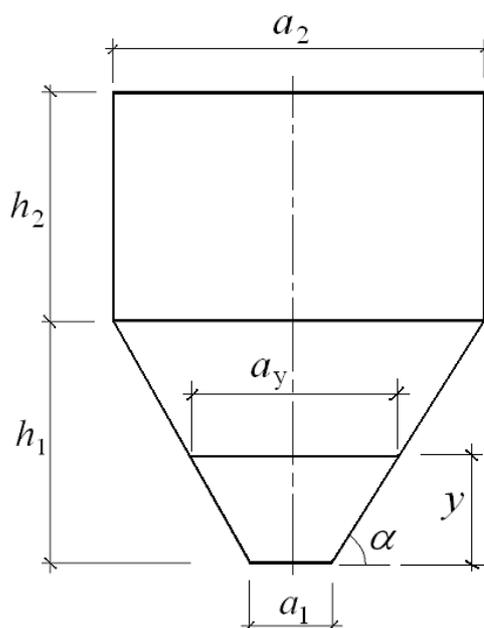


Рис. 1.2. Геометрические параметры емкостной конструкции в вертикальной плоскости

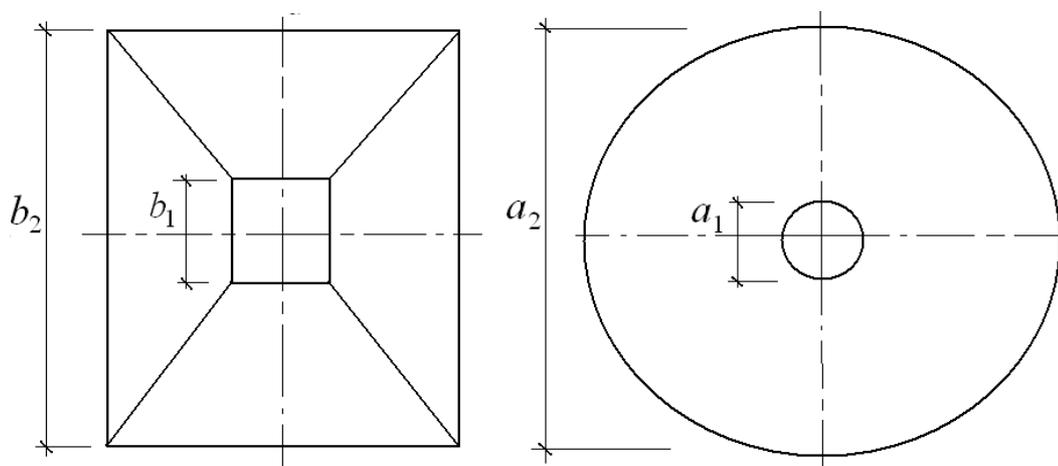


Рис. 1.3. Геометрические параметры емкостной конструкции в горизонтальной плоскости

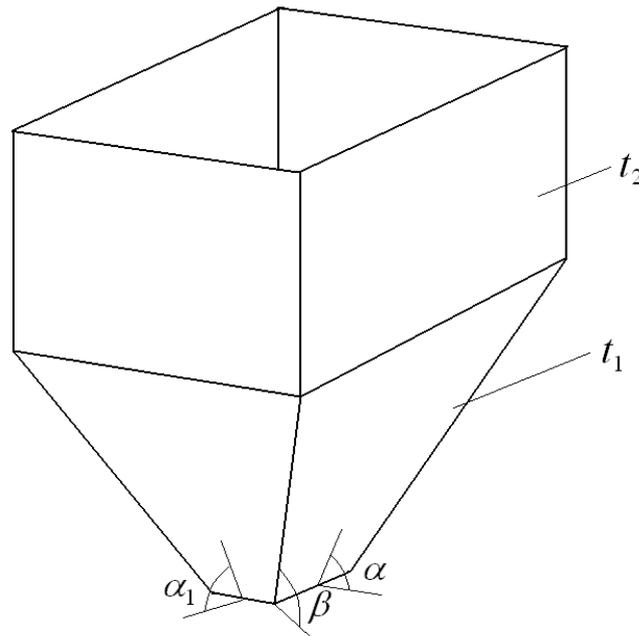


Рис. 1.4. Геометрические параметры емкостной конструкции в пространстве

1.4.3. Расчетный объем емкостной конструкции должен определяться как разность геометрического объема и незаполняемого объема ее верхней части при условии полного опорожнения конструкции. Незаполняемый объем рассчитывается с учетом угла естественного откоса, который должен быть задан технологической организацией при проектировании конструкции. Величина незаполняемого объема зависит от вида загрузки сыпучего материала.

1.4.4. Угол наклона ребра нижней части двоякосимметричной емкостной конструкции пирамидально-призматического типа следует вычислять согласно выражению (1.3):

$$\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{1}{\operatorname{tg}^2 \alpha_1}. \quad (1.3)$$

В случае квадратной в плане двоякосимметричной емкости данное выражение упрощается до вида выражения (1.4):

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha. \quad (1.4)$$

1.4.5. Ширину грани нижней части для пирамидально-призматической двоякосимметричной емкостной конструкции на отметке  $u$  следует определять согласно выражению (1.5):

$$a_y = \frac{2 \cdot y}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{a_1}{2}. \quad (1.5)$$

Соответственно, ширину верхней части емкостной конструкции следует рассчитывать согласно выражению (1.6):

$$a_2 = \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{a_1}{2}. \quad (1.6)$$

1.4.6. В настоящем Руководстве использованы следующие обозначения для физико-механических характеристик сыпучего материала:

$\gamma$  – плотность;

$d$  – размер зерна;

$\varphi$  – угол внешнего трения о материал стенок емкостной конструкции;

$\psi$  – угол внутреннего трения между зернами;

$\chi$  – угол естественного откоса;

$\xi$  – угол укладки зерен.

1.4.7. В настоящем Руководстве использованы следующие обозначения для конструктивных параметров емкостной конструкции:

$t_1$  – приведенная толщина верхней части;

$t_2$  – приведенная толщина нижней части.

## 1.5. Техничко-экономические параметры

1.5.1. К основным технико-экономическим параметрам, определяющим качество проектирования емкостной конструкции, следует относить параметры напряженно-деформированного состояния и конструктивные параметры.

1.5.2. Параметрами напряженно-деформированного состояния емкостной конструкции следует считать:

- уровень эквивалентных напряжений, вычисленных по соответствующей теории прочности (как правило, четвертой) в стенке и ребрах, дающие представление о напряженном состоянии конструкции. Для конструкции с плоскими стенками (многоугольной в плане) эти величины дополнительно указываются для угловой зоны – зоны сопряжения соседних стенок между собой;

- прогиб стенки, дающий представление о деформированном состоянии конструкции;

- коэффициент запаса устойчивости, дающий представление о возможности потери устойчивости элементами конструкции;

- первые три частоты собственных колебаний, дающие представление о динамических свойствах конструкции.

1.5.3. Конструктивными параметрами емкостной конструкции следует считать:

- полный объем;
- полную массу;
- протяженность сварных швов.

1.5.4. Сравнение различных конструктивных вариантов проектируемой емкостной конструкции, а также их сопоставление с существующими решениями, следует осуществлять согласно перечисленным в пп. 1.5.2 1.5.3 технико-экономическим параметрам.

## Раздел 2. Рекомендации по проектированию

### 2.1. Исходные данные для проектирования

2.1.1. Исходными данными для проектирования емкостных конструкций являются:

- тип сыпучего материала или сыпучих материалов, под которые предполагается использование конструкции;
- необходимый объем хранимого сыпучего материала;
- предполагаемая схема расположения конструкции и данные о необходимости увязки ее габаритных размеров и внешней формы с другими строительными конструкциями или технологическим оборудованием.

2.1.2. Указанные исходные данные выдаются заказчиком (как правило, технологической организацией).

2.1.3. Под типом сыпучего материала (сыпучих материалов) следует понимать следующий набор его (их) физико-механических характеристик и свойств:

- плотность, а также данные о ее изменении в процессе хранения (слеживаемости сыпучего материала);
- фракция или процентный состав различных фракций, загружаемых одновременно в конструкцию;
- угол укладки зерен;
- угол внешнего трения о материал стенок емкостной конструкции;
- угол внутреннего трения между зернами;
- угол естественного откоса;
- абразивность и данные о твердости;
- химическая агрессивность и данные о возможности нанесения коррозионных повреждений металлоконструкциям.

2.1.4. Под необходимым объемом хранимого сыпучего материала следует понимать необходимое количество сыпучего материала одновременно находящее в емкостной конструкции. При этом следует учитывать соотношение между объемами и периодичностью ее загрузки и выгрузки.

2.1.5. Под предполагаемой схемой расположения емкостной конструкции следует понимать ее пространственное положение по отношению к другим строительным конструкциям или технологическому оборудованию. При этом отдельному оговариванию подлежат диапазоны возможного изменения габаритных размеров конструкции в плане и по высоте, а также предпочтительность внешней формы.

2.1.6. При отсутствии или недостатке каких-либо исходных данных процесс проектирования емкостной конструкции согласно дальнейшим рекомендациям настоящего Руководства может оказаться затруднительным или полностью невозможным, а его результат – неэкономичная или сложная в эксплуатации и обслуживании емкостная строительная конструкция.

## **2.2. Назначение внешней формы и геометрических размеров**

2.2.1. Внешняя геометрическая форма емкостной конструкции и ее геометрические размеры определяются набором геометрических параметров, приведенных в п. 1.4.1 настоящего Руководства.

2.2.2. Установление указанных геометрических параметров выполняется с учетом:

- исключения пульсационных динамических эффектов при разгрузке емкостной конструкции с целью повышения ее долговечности;

- исключения сводообразований в нижней части емкостной конструкции с целью обеспечения ее самотечной выгрузки;

- обеспечения возможно более равномерного распределения давления от сыпучего материала на стенки емкостной конструкции с целью получения возможно более равномерной картины напряженно-деформированного состояния;

- исключения зависаний сыпучего материала в нижней части емкостной конструкции, а также появления неразгружаемых объемов сыпучего материала (мертвых зон) с целью обеспечения полного опорожнения емкостной конструкции, что повышает эффективность ее эксплуатации;

- обеспечения возможно меньшей боковой поверхности емкостной конструкции с целью снижения ее материалоемкости и степени подверженности коррозионному, абразивному и другим возможным видам износа.

2.2.3. Процесс установления необходимых геометрических параметров емкостной конструкции следует начинать с определения формы конструкции в плане – многоугольной или круглой.

Выбор формы, в значительной степени, диктуется исходными данными для проектирования (см. п. 2.1.1), в частности, предполагаемой схемой расположения конструкции и необходимостью увязки ее габаритных размеров и внешней формы с другими строительными конструкциями или технологическим оборудованием.

2.2.4. В случае, если подобные ограничения отсутствуют или не оказывают влияния на выбор внешней формы емкостной конструкции, то сле-

дует руководствоваться технологическими соображениями по изготовлению конструкции.

В частности, емкостные конструкции с плоскими стенками (многоугольной формы в плане) более просты в изготовлении, но имеют большую боковую поверхность и, следовательно, материалоемкость. Емкостные конструкции круглой формы в плане требуют при изготовлении получения скругленных листов, но имеют меньшую боковую поверхность и, следовательно, материалоемкость.

2.2.5. Материалоемкость поверхностей различной в плане формы может быть предварительно оценена согласно данным табл. 2.1. В ней представлено отношение периметра многоугольника в зависимости от количества его сторон к длине круга такой же площади.

Таблица 2.1

**Отношение периметра многоугольника  
к длине окружности**

Количество сторон многоугольника	Отношение
3	1,286
4	1,128
5	1,075
6	1,050
8	1,021
12	1,012
20	1,004

2.2.6. При выборе многоугольной в плане формы емкостной конструкции рекомендуется принимать форму правильного многоугольника (равностороннего треугольника, квадрата и т. п.), поскольку иная форма оказывается неэкономичной.

2.2.7. Рекомендуемой формой емкостной конструкции в плане является круг или прямоугольник (квадрат), поскольку иная форма оказывается неэкономичной.

2.2.8. Материалоемкость поверхностей прямоугольной в плане формы может быть предварительно оценена согласно данным табл. 2.2. В ней представлено отношение периметра прямоугольника в зависимости от соотношения длин его сторон к периметру квадрата.

2.2.9. Следующим этапом является определение размеров разгрузочного отверстия емкостной конструкции. При этом следует руководствоваться схемой динамических эффектов при истечении сыпучего материала из емкостной конструкции, приведенной на рис. 2.1.

**Отношение периметра прямоугольника  
к периметру квадрата**

Соотношение сторон прямоугольника	Отношение
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

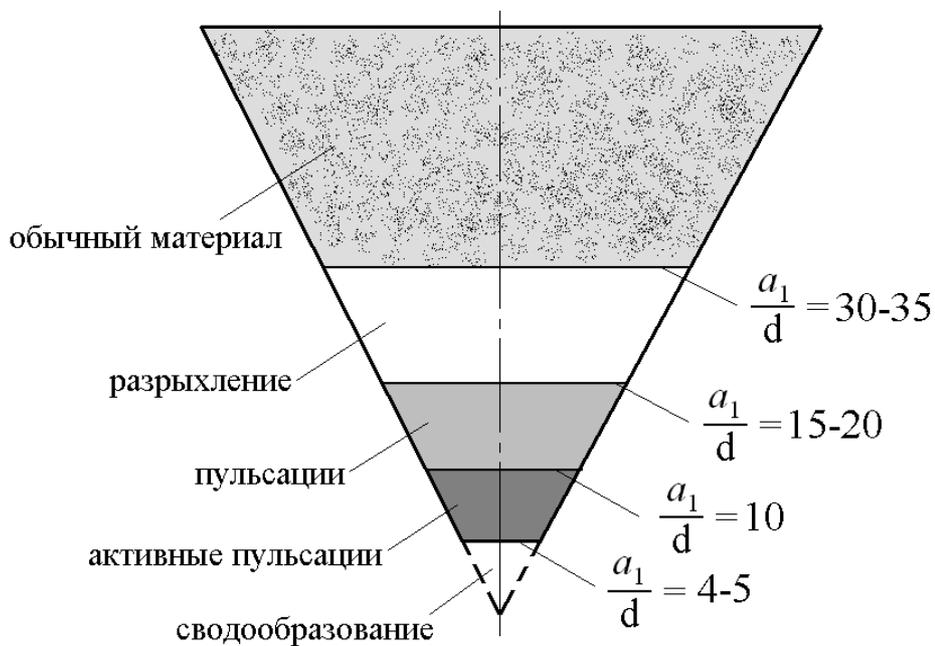


Рис. 2.1. Схема динамических эффектов  
при разгрузке емкостной конструкции

2.2.10. Ширину разгрузочного отверстия  $a_1$  следует принимать в зависимости только от размера зерна сыпучего материала  $d$  согласно выражению (2.1):

$$a_1 \geq (15 \div 20) \cdot d . \quad (2.1)$$

Верный выбор размеров разгрузочного отверстия позволяет исключить как нежелательные динамические пульсационные эффекты при разгрузке емкостной конструкции, так и эффект сводообразования.

При назначении ширины выпускного отверстия меньшего размера процесс разгрузки емкости будет сопровождаться указанными на схеме рис. 2.1 эффектами.

2.2.11. В случае, если согласно рекомендациям п. 2.2.10 получена недопустимо большая ширина разгрузочного отверстия (для крупных фракций сыпучего материала), то следует предусмотреть специальные технологические мероприятия, направленные на измельчение сыпучего материала (понижение фракции). Их целесообразность устанавливается технико-экономическим расчетом.

2.2.12. В случае невозможности или нецелесообразности применения подобных технологических мероприятий для уменьшения ширины разгрузочного отверстия рекомендуется дополнительно проанализировать возможность и опасность возникновения указанных на схеме рис. 2.1 эффектов.

2.2.13. Не допускается ширину разгрузочного отверстия принимать менее величины  $5 \cdot d$ . В противном случае емкостная конструкция будет изначально спроектирована не как саморазгружающаяся и для ее разгрузки потребуются применение специальных побудительных устройств.

2.2.14. В случае, если емкостная конструкция проектируется для нескольких типов сыпучих материалов, то размеры разгрузочного отверстия следует устанавливать отдельно для каждого из этих материалов согласно приведенным выше рекомендациям (пп. 2.2.9 – 2.2.13). Далее из всех полученных размеров выбирают наибольшие.

2.2.15. Рекомендуемой формой разгрузочного отверстия в плане является круг или прямоугольник (квадрат), поскольку иная форма оказывается неэкономичной.

При выборе прямоугольной формы разгрузочного отверстия в плане его длину  $b_1$  следует принимать более ширины  $a_1$ . В противном случае возможны как нежелательные динамические пульсационные эффекты при разгрузке емкостной конструкции, так и эффект сводообразования.

2.2.16. После установления размеров разгрузочного отверстия следует решить вопрос о его расположении в плане по отношению к осям симметрии емкостной конструкции.

Рекомендуемым расположением при этом следует считать двояко-симметричное расположение, когда геометрический центр разгрузочного отверстия совпадает с геометрическим центром проекции основания верхней части емкостной конструкции.

Любая форма несимметрии в расположении разгрузочного отверстия является неэкономичной и может допускаться только при соответствующем технико-экономическом обосновании.

2.2.17. После установления привязки разгрузочного отверстия емкостной конструкции к ее осям следует определить угол  $\alpha$  наклона образующей нижней части конструкции к горизонту.

Его величина  $\alpha_0$  в первом приближении принимается на  $10^\circ$  больше угла естественного откоса сыпучего материала  $\chi$ .

2.2.18. В случае, если емкостная конструкция проектируется для нескольких типов сыпучих материалов, то угол  $\alpha$  следует устанавливать отдельно для каждого из этих материалов согласно приведенным выше рекомендациям (п. 2.2.17). Далее из всех полученных углов выбирают наибольший.

2.2.19. Следующим этапом установления геометрических параметров емкостной конструкции является первоначальное определение ее высот нижней и верхней частей –  $h_{10}$  и  $h_{20}$ , соответственно, исходя из общего объема конструкции  $V$ .

Они рассчитываются согласно выражениям (2.2) и (2.3), приближенно (без учета размеров разгрузочного отверстия) устанавливающих оптимальное соотношение между верхней и нижней частью емкостной конструкции с точки зрения минимума ее боковой поверхности в целом:

$$h_{10} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{A \cdot (3 - 2 \cdot \sin \alpha_0)}}, \quad (2.2)$$

$$h_{20} = \frac{V - \frac{4 \cdot h_{10}^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_0}}{A \cdot \left(\frac{h_{10}}{\operatorname{tg} \alpha_0}\right)^2}. \quad (2.3)$$

В этих выражениях коэффициент  $A$  определяется в зависимости от формы емкостной конструкции в плане согласно рекомендациям п.1.4.2.

2.2.20. Далее следует приближенно (без учета размеров разгрузочного отверстия) рассчитать ширину загрузочного отверстия  $a_2$  согласно выражению (2.5):

$$a_{20} = \frac{2 \cdot h_{10}}{\operatorname{tg} \alpha_0}. \quad (2.5)$$

2.2.21. После установления предварительных параметров емкостной конструкции согласно рекомендациям пп. 2.2.9 – 2.2.20 следует перейти к их уточнению.

2.2.22. Прежде всего следует определить форму образующей боковой поверхности нижней части емкостной конструкции, обеспечивающей более равномерное распределения давления от сыпучего материала на ее стенки. Для этого следует использовать выражение (2.6):

$$R(y) = \frac{a_{20}}{\sqrt[4]{1+B \cdot y}}, \quad (2.6)$$

где коэффициент  $B$  находится согласно выражению (2.7):

$$B = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_{20} \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)}. \quad (2.7)$$

При этом будет получена функциональная зависимость изменения функции формы образующей от высоты  $y$ . Для наглядности рекомендуется представить ее в графическом виде, как например, на рис. 2.2<sup>1</sup> (по вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – ширина нижней части в м).

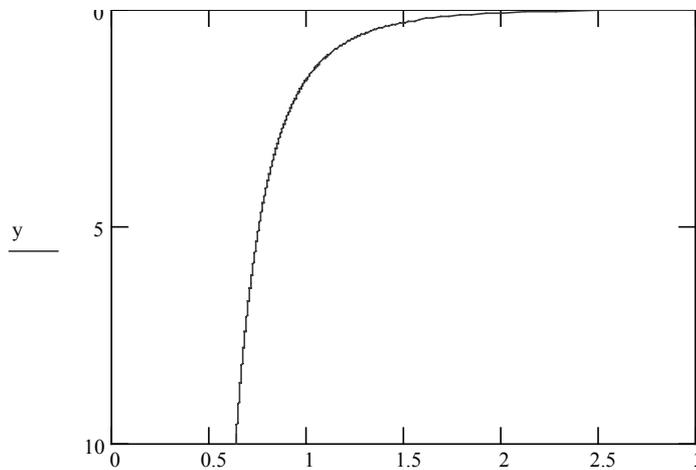


Рис. 2.2. Форма образующей нижней части емкостной конструкции из условия равномерности давления сыпучего материала

2.2.23. Угол наклона к горизонту  $\alpha$  образующей боковой поверхности нижней части емкостной конструкции может быть вычислен согласно выражению (2.8):

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left( \frac{a_{20} \cdot B}{4 \cdot \sqrt[4]{(1+B \cdot y)^5}} \right). \quad (2.8)$$

При этом будет получена функциональная зависимость изменения угла наклона к горизонту образующей от высоты  $y$ .

2.2.24. Далее следует откорректировать принятый ранее угол наклона образующей нижней части емкости  $\alpha_0$  с учетом выражения (2.8).

<sup>1</sup> График получен численно, оцифровка имеет условный характер.

При выборе угла наклона рекомендуется ориентироваться на его значение, полученное для глубины  $y = h_{10}/2$ .

При этом окончательное принятое значение рекомендуется устанавливать исходя из следующих условий:

- для круглой в плане емкостной конструкции – не менее ранее принятого угла наклона  $\alpha_0$ ;
- для прямоугольной (квадратной) в плане емкостной конструкции так, чтобы угол наклона ребер нижней части  $\beta$  (п. 1.4.4) при этом был не менее ранее принятого угла наклона  $\alpha_0$ .

Таким образом, будет исключено зависание сыпучего материала в нижней части емкостной конструкции, а также появления неразгружаемых объемов сыпучего материала (мертвых зон).

2.2.25. В случае, если окончательно принятый угол наклона  $\alpha$  будет установлен меньшим, чем рекомендуется согласно пп. 2.2.17 и 2.2.24, то емкостная конструкция будет изначально спроектирована не как полностью разгружающаяся и для ее полного опорожнения потребуются применение специальных побудительных устройств.

2.2.26. После окончательного установления угла наклона образующей нижней части следует откорректировать высоты нижней и верхней частей конструкции (с учетом принятых размеров разгрузочного отверстия) согласно выражениям (2.9) и (2.10):

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{A \cdot \frac{a_1^3}{8} \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{A \cdot (3 - 2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.9)$$

$$h_2 = \frac{V - A \cdot \left( \frac{a_1^2}{4} \cdot h_1 + \frac{a_1}{2} \cdot \frac{h_1^2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{h_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{A \cdot \left( \frac{a_1}{2} + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2}. \quad (2.10)$$

2.2.27. Выражение (2.9) приведено в предположении, что толщины обшивки нижней  $t_1$  и верхней  $t_2$  части емкостной конструкции равны между собой. В случае, если известно их соотношение  $\delta = t_1 / t_2$ , то выражение (2.9) примет вид выражения (2.11):

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{A \cdot \frac{a_1^3}{8} \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{A \cdot (3 \cdot \delta - 2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.11)$$

2.2.28. В заключении следует рассчитать откорректированную ширину загрузочного отверстия согласно выражению (1.6).

2.2.29. При соблюдении всех рекомендаций настоящего подраздела установленные геометрические параметры емкостной конструкции будут обеспечивать выполнение условий, оговоренных в п. 2.2.2.

В случае, если какие-либо из геометрических параметров будут приняты на основе иных соображений, то выполнение оговоренных условий окажется частично или полностью невозможным, что негативно отразится на уровне надежности, долговечности, а также ряде эксплуатационных качеств спроектированной емкостной конструкции.

### 2.3. Расчет давления сыпучего материала

2.3.1. Давление сыпучего материала, оказываемое им на стенки емкостной конструкции, определяется как для сыпучей среды, находящейся в замкнутом сосуде с жесткими стенками. При этом принимаются во внимание силы трения, возникающие между зернами сыпучего материала и материалом стенок конструкции.

2.3.2. Давление сыпучего материала принимается равномерно распределенным по периметру стенок емкостной конструкции и, вследствие этого, независимым от формы конструкции в плане.

2.3.3. Давление сыпучего материала принимается зависящим от физико-механических характеристик сыпучего материала, согласно п. 1.4.6, размеров емкостной конструкции, согласно п. 1.4.1, а также от толщины (глубины) слоя сыпучего материала.

2.3.4. Давление сыпучего материала следует определять для двух режимов работы емкостной конструкции: режима статического хранения сыпучего материала (первый режим) и момента начала его выгрузки (второй режим).

В приведенных ниже выражениях первому режиму соответствует знак «-», второму режиму знак «+». Расчет следует производить отдельно для каждого случая, а затем из полученных значений выбирается наибольшее. Как правило, им оказывается значение, соответствующее второму режиму работы емкостной конструкции.

2.3.5. Вертикальное давление сыпучего материала на глубине  $y$  от его поверхности для нижней части емкостной конструкции  $P_{e1}$  определяется согласно выражению (2.12), а для верхней части  $P_{e2}$  – согласно выражению (2.13).

Входящие в эти выражения вспомогательные коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$  не имеют самостоятельного физического смысла и служат только для уп-

рощения записи выражений. Эти коэффициенты следует предварительно определить согласно выражениям (2.14) и (2.15):

$$P_{e1}(y) = \gamma \cdot \frac{\frac{a_2}{2} \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha}}{k_1 \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} + \frac{\gamma \cdot \frac{a_2}{2} \frac{(1 - e^{-k_2 \cdot h_2})}{k_2}}{k_1 \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} \cdot \left( \frac{a_2}{2} \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right)^{k_1 - 2}, \quad (2.12)$$

$$P_{e2}(y) = \frac{\gamma}{k_2} \cdot (1 - e^{-k_2 \cdot y}), \quad (2.13)$$

$$k_1 = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\xi \cdot \operatorname{tg}(\xi \mp \psi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\xi \mp \psi)}, \quad (2.14)$$

$$k_2 = k_{n2} \cdot \operatorname{tg}\varphi. \quad (2.15)$$

При этом будет получена функциональная зависимость изменения давления сыпучего материала от глубины  $y$  (для верхней и нижней частей емкостной конструкции начало отсчета оказывается различным и совпадает с верхней горизонталью соответствующей части).

Для наглядности рекомендуется представить ее в графическом виде, как например, на рис. 2.3 и 2.4<sup>1</sup> (по вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – давление в кПа).

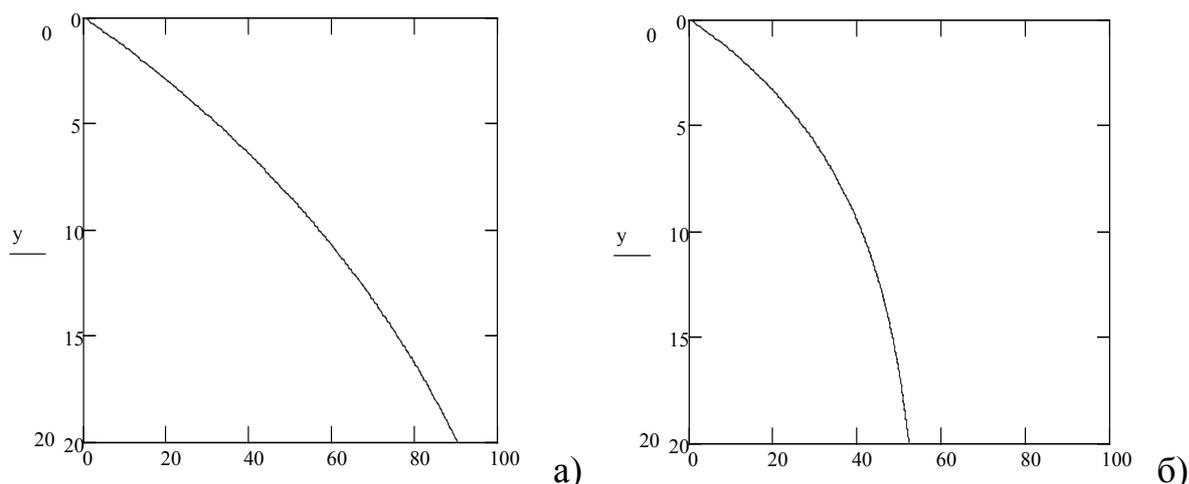


Рис. 2.3. Вертикальное давление сыпучего материала для верхней части:

а) для первого режима; б) для второго режима

<sup>1</sup> Графики получены численно, оцифровка имеет условный характер.

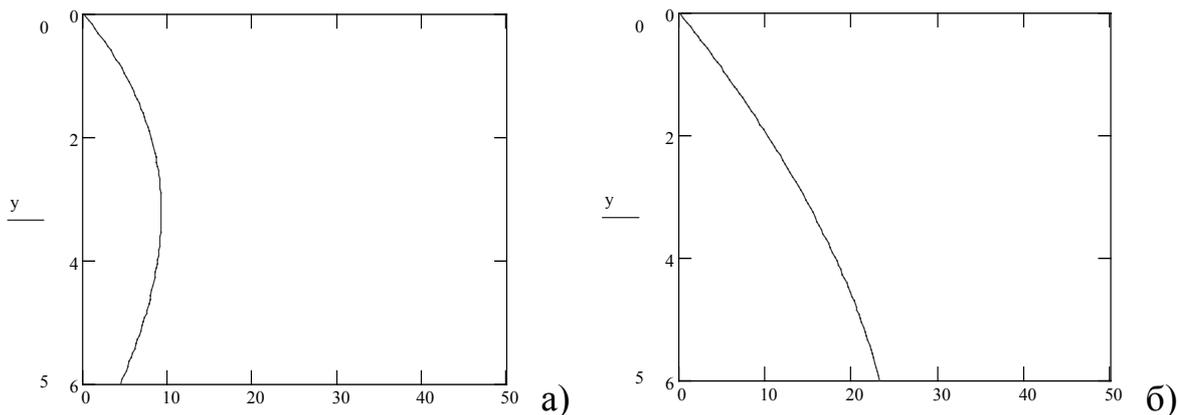


Рис. 2.4. Вертикальное давление сыпучего материала для нижней части:  
 а) для первого режима; б) для второго режима

2.3.6. Следует отметить, что полученные согласно выражению (2.12) зависимости могут в зависимости от сочетания физико-механических характеристик сыпучего материала и геометрических параметров нижней части емкостной конструкции иметь вид, представленный на рис. 2.5<sup>1</sup> (по вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – давление в кПа).

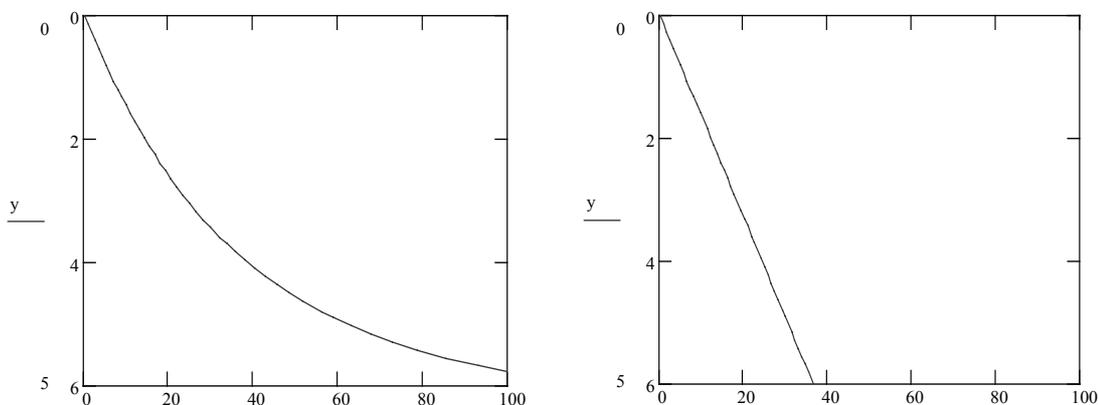


Рис. 2.5. Возможные варианты зависимости вертикального давления сыпучего материала для нижней части

2.3.7. Для определения нормального давления сыпучего материала следует предварительно рассчитать коэффициент нормального давления для нижней части емкостной конструкции  $k_{n1}$  согласно выражению (2.16) и для верхней части  $k_{n2}$  – согласно выражению (2.17):

<sup>1</sup> Графики получены численно, оцифровка имеет условный характер.

$$k_{n1}(y) = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \xi \cdot \operatorname{tg}(\xi \mp \psi)}{\left(\frac{a_1}{2} + y\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\xi \mp \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (2.16)$$

$$k_{n2} = \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \xi \cdot \operatorname{tg}(\xi \mp \psi)}{a_1 \cdot (2 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\xi \mp \psi))}. \quad (2.17)$$

Для верхней части коэффициент  $k_{n2}$  получается в виде постоянного значения, для нижней части – в виде функциональной зависимости  $k_{n1}(y)$ .

2.3.8. Нормальное давление сыпучего материала на глубине  $y$  от его поверхности для нижней части емкостной конструкции  $P_{n1}$  определяется согласно выражению (2.18), а для верхней части  $P_{n2}$  – согласно выражению (2.19):

$$P_{n1}(y) = k_{n1} \cdot P_{\sigma 1}(y), \quad (2.18)$$

$$P_{n2}(y) = k_{n2} \cdot P_{\sigma 2}(y). \quad (2.19)$$

Обе зависимости имеют вид функциональных зависимостей от глубины  $y$ .

Для наглядности рекомендуется представить обе зависимости в графическом виде, как например, на рис. 2.6<sup>1</sup> (по вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – давление в кПа).

2.3.9. Для определения тангенциального давления сыпучего материала следует предварительно рассчитать коэффициент тангенциального давления для нижней части емкостной конструкции  $k_{\tau 1}$  согласно выражению (2.20) и для верхней части  $k_{\tau 2}$  – согласно выражению (2.21):

$$k_{\tau 1} = k_{n1} \cdot \operatorname{tg} \varphi, \quad (2.20)$$

$$k_{\tau 2} = k_{n2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.21)$$

2.3.10. Тангенциальное давление сыпучего материала на глубине  $y$  от его поверхности для нижней части емкостной конструкции  $P_{\tau 1}$  определяется согласно выражению (2.22), а для верхней части  $P_{\tau 2}$  – согласно выражению (2.23):

<sup>1</sup> Графики получены численно, оцифровка имеет условный характер.

$$P_{\tau 1}(y) = k_{\tau 1} \cdot P_{e 1}(y), \quad (2.22)$$

$$P_{\tau 2}(y) = k_{\tau 2} \cdot P_{e 2}(y). \quad (2.23)$$

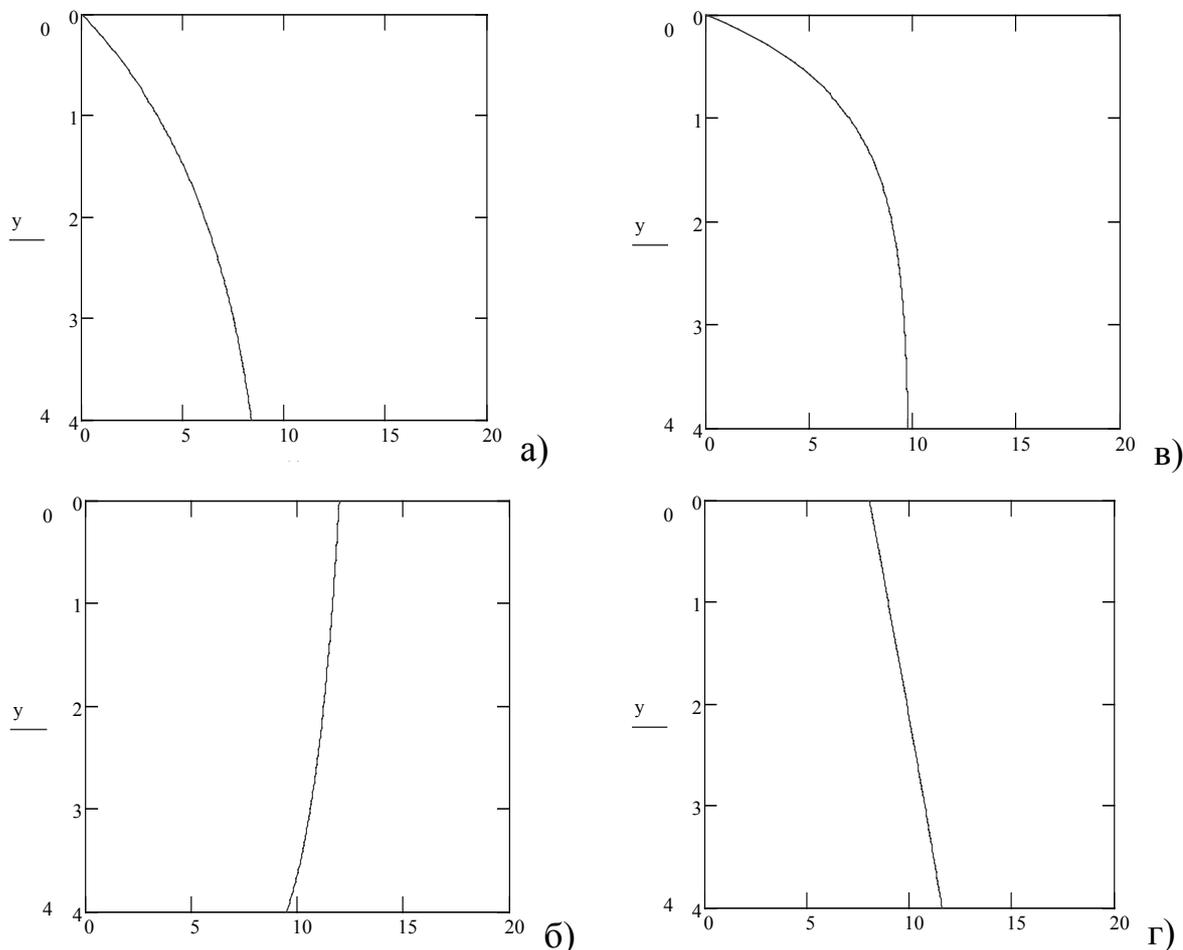


Рис. 2.6. Нормальное давление сыпучего материала:

- а) для верхней части для первого режима;
- б) для нижней части для первого режима;
- в) для верхней части для второго режима;
- г) для нижней части для второго режима

2.3.11. Рассчитанные величины давлений сыпучего материала на стенки емкостной конструкции являются согласно терминологии ДБН В.1.2-2:2006 [4] характеристическими значениями.

Для вычисления предельных расчетных значений полученные величины давлений следует умножить на коэффициент надежности по предельному расчетному значению, который может быть принят равным  $\gamma_{fm} = 1,3$  согласно рекомендаций ДБН В.2.2-8-98 [2].

Для вычисления предельных эксплуатационных значений полученные величины давлений следует умножить на коэффициент надежности по

предельному эксплуатационному значению, который может быть принят равным  $\gamma_{\text{е}} = 1,0$ .

2.3.12. В случае, если возможной является загрузка емкостной конструкции выше уровня ее верхней части, то величины давлений сыпучего материала следует определять для глубины  $y + \Delta h$ , где величина  $\Delta h$  определяется согласно углу естественного откоса сыпучего материала  $\chi$  для случая симметричного его расположения (рис. 2.7).

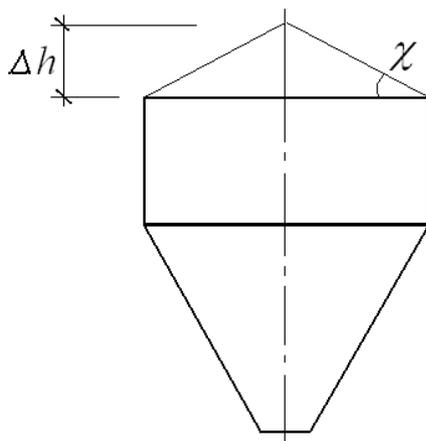


Рис. 2.7. Загрузка емкостной конструкции выше верхней части

2.3.13. В случае, если емкостная конструкция проектируется для нескольких типов сыпучих материалов, то необходимо выполнить расчет величин давлений для каждого из этих материалов согласно приведенным выше рекомендациям (пп. 2.3.5 – 2.3.10). При этом не рекомендуется выбирать значения «наибольших» физико-механических характеристик из имеющихся для различных материалов, поскольку функциональная зависимость от них давлений является нелинейной.

Дальнейшее проектирование емкостной конструкции следует выполнять с учетом полученных зависимостей давлений для каждого из сыпучих материалов в отдельности, как для проектирования нескольких емкостных конструкций.

2.3.14. Поскольку все приведенные в пп. 2.3.5 – 2.3.10 зависимости для давления сыпучего материала являются достаточно сложными для непосредственного аналитического расчета, то рекомендуется получать их в графическом виде с использованием специальных пакетов компьютерных прикладных программ. Это позволит избежать ошибок при их аналитическом определении и ускорит сам процесс расчета.

2.3.15. Рекомендуется, также, выполнить оценку распределения давления сыпучего материала согласно рекомендациям традиционных подходов, изложенных в нормативном документе ДБН В.2.2-8-98 [2], а также в ряде специализированных и справочных изданий [5 – 9].

## **2.4. Выбор материала**

2.4.1. Емкостные конструкции следует проектировать полностью из стали. Наличие конструктивных элементов (кроме футеровочных) из других материалов (железобетона, дерева, пластмасс и т.п.) не допускается.

2.4.2. Класс прочности стали следует принимать не ниже С245. Не рекомендуется, также, принимать стали высоких классов прочности, в частности, выше С285.

2.4.3. Сталь для конструктивных элементов следует принимать спокойных или полуспокойных марок. Рекомендуемыми марками стали являются ВСтЗпс6, ВСтЗпс6-1, ВСтЗсп5, ВСтЗсп5-1.

При соответствующем технико-экономическом обосновании возможно применение низколегированных марок стали.

2.4.4. Категорически не рекомендуется применение кипящих марок стали, способствующих повышенной аварийности емкостных конструкций.

## **2.5. Выбор конструктивного решения**

2.5.1. Конструктивное решение, принимаемое для емкостных конструкций, может представлять собой решение, выполненное по традиционной схеме с применением горизонтальных усиливающих ребер жесткости или по новой панельной схеме с применением панелей на основе гофрированных листов.

Возможным, также, является комбинированное конструктивное решение.

2.5.2. Традиционное конструктивное решение предполагает постановку по периметру емкостной конструкции стальных листов (плоских и скругленных, в зависимости от формы конструкции в плане), подкрепленных ребрами жесткости (рис. 2.8).

2.5.3. Детальное описание традиционного конструктивного решения приведено в специализированных и справочных изданиях [5 – 9]. Далее приведены основные рекомендации, касающиеся конструирования емкостных конструкций согласно традиционной конструктивной схеме.

2.5.4. При выполнении емкостной конструкции согласно традиционному конструктивному решению рекомендуется:

- все конструктивные элементы соединять только на сварке. При этом сварные швы должны быть равнопрочными с металлом элементов;
- минимальную толщину стенок принимать 6 мм;

- стенку следует укреплять ребрами жесткости, располагаемыми горизонтально, а для размеров конструкции в плане более 6 м, дополнительно и вертикально;

- ребра жесткости располагать непрерывно по периметру стенки, без устройства разрывов;

- ребра жесткости принимать V-образного профиля, снижающие концентрации напряжений в месте их соединения со стенкой и повышающие общую жесткость конструкции. При этом применение традиционных типов профилей (уголки, тавры, двутавры, швеллера) не рекомендуется;

- располагать ребра жесткости горизонтально по отношению к стенке конструкции. Постановка ребер перпендикулярно допускается только в случае, если возможно их жесткое соединение в углах конструкции (для многоугольной в плане формы).

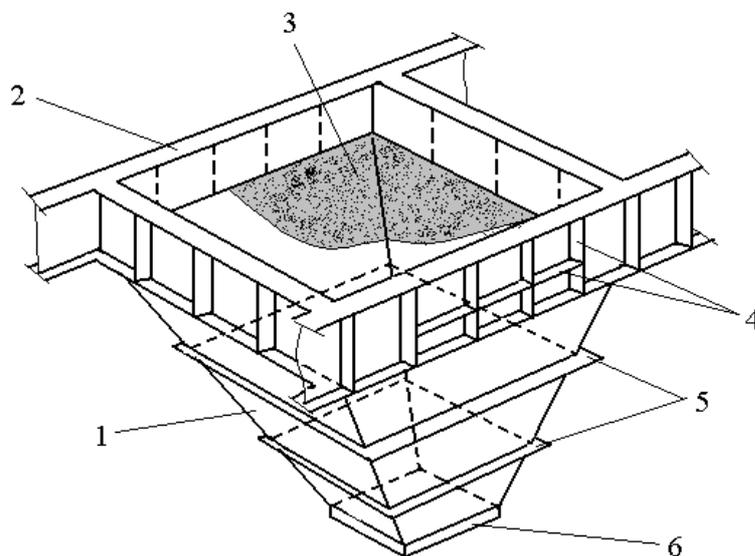


Рис. 2.8. Традиционная конструктивная схема емкостной конструкции (прямоугольной формы в плане)

- 1 – стенка, 2 – верхняя часть (бункерная балка),  
3 – внутренняя футеровка стенок, 4 – вертикальные ребра жесткости,  
5 – горизонтальные ребра жесткости, 6 – разгрузочное отверстие

2.5.5. Новое панельное конструктивное решение предполагает разбивку емкостной конструкции на отдельные конструктивные элементы – панели. В качестве панели (рис. 2.9) может приниматься полностью вся стенка конструкции или ее фрагмент.

2.5.6. Панель выполняется многослойной, состоящей из следующих конструктивных элементов (рис. 2.10):

- внутреннего плоского листа, толщиной от 4 мм;
- внешнего гофрированного листа, толщиной от 3 мм;

- расположенных по периметру панели плоских обвязочных элементов, толщиной от 6 мм;
- внутренних футеровочных элементов.

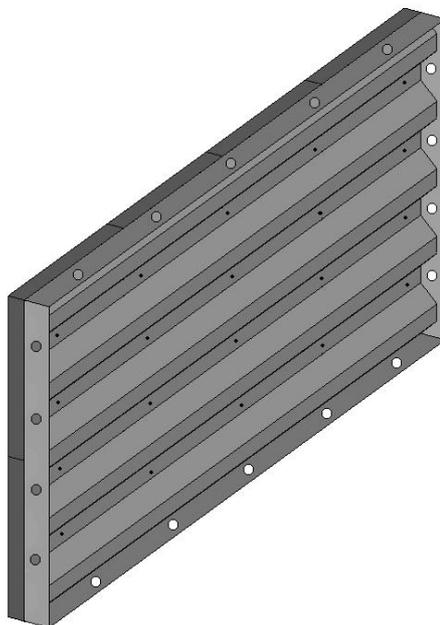


Рис. 2.9. Панель для емкостной конструкции

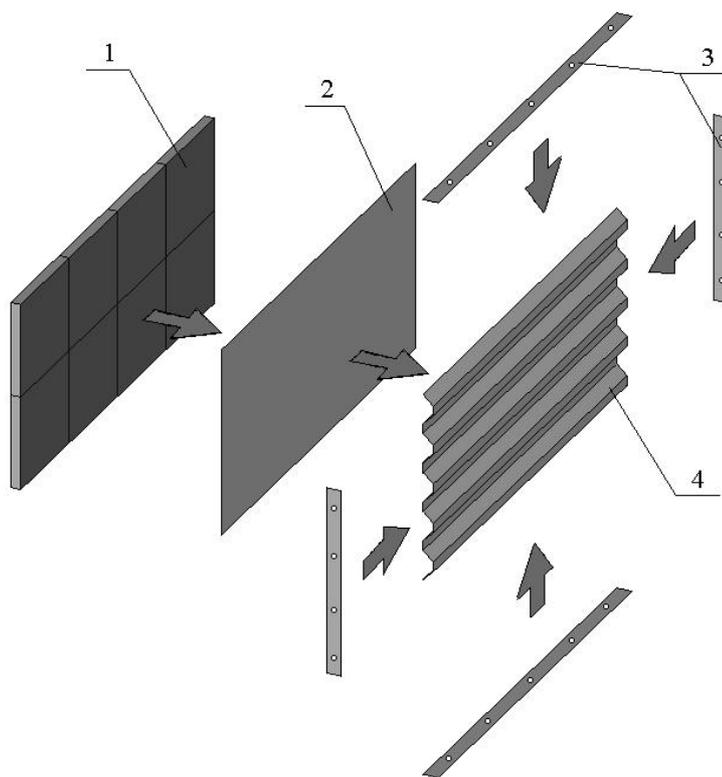


Рис. 2.10. Конструктивное устройство панели:  
1 – внутренняя футеровка стенок, 2 – внутренний плоский лист,  
3 – обвязочные элементы, 4 – внешний гофрированный лист

2.5.7. Каждый из указанных в п. 2.5.6 конструктивных элементов панели выполняет определенную специальную функцию:

- внутренний лист выполняет основную несущую функцию и служит выравнивающим элементом для крепления футеровочных элементов, как правило, плоских;

- внешний гофрированный лист выполняет усиливающую несущую функцию (аналогично ребрам жесткости в традиционном конструктивном решении), одновременно способствуя более равномерному распределению жесткости;

- обвязочные элементы необходимы для восприятия сдвигающих усилий, возникающих по контуру панели, позволяют жестко соединить между собой внутренний и внешний листы, а также позволяют осуществить соединение панелей между собой.

2.5.8. Внутренний и внешний слои панели между собой рекомендуется дополнительно соединять на специальных крепежных болтах.

2.5.9. Обвязочные элементы следует прикреплять к элементам панели на сварке. При этом сварные швы должны быть равнопрочными с металлом элементов.

2.5.10. В качестве футеровочных элементов рекомендуется применение резиновых футеровочных плит (рис. 2.11). При этом их конструкция должна предусматривать возможность запрессовки головок крепежных болтов, что позволяет избежать наличия выступающих элементов на внутренней поверхности, непосредственно контактирующей с сыпучим материалом.

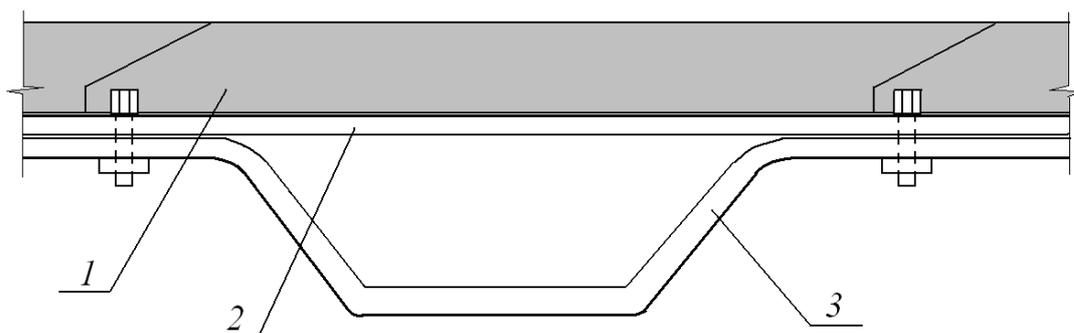


Рис. 2.11. Схема прикрепления резиновых футеровочных плит:  
1 – резиновая футеровочная плита, 2 – внутренний плоский лист,  
3 – внешний гофрированный лист

2.5.11. Соединение панелей между собой следует выполнять на высокопрочных болтах, для чего в обвязочных элементах предусматриваются специальные отверстия.

2.5.12. Во избежание попадания в стык между панелями зерен сыпучего материала или иных посторонних предметов следует предусматривать

специальный защитный вкладыш, который рекомендуется выполнять навесным (рис. 2.12).

2.5.13. Комбинированное конструктивное решение предполагает замену в панельном конструктивном решении внешнего гофрированного листа на плоский лист, подкрепленный горизонтально и, при необходимости, вертикально расположенными ребрами жесткости (рис. 2.13).

При этом ребра жесткости следует проектировать с учетом рекомендаций п. 2.5.4.

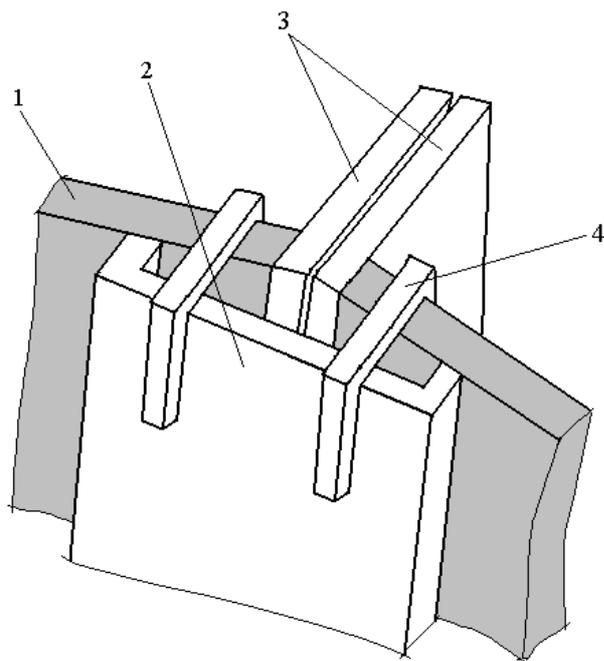


Рис. 2.12. Схема защиты стыка панелей:  
1 – панель, 2 – защитный вкладыш,  
3 – обвязочный элемент панели, 4 – навесные крепления вкладыша

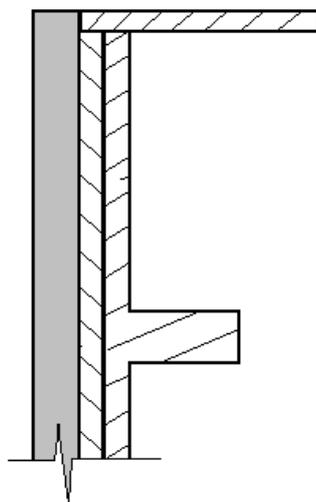


Рис. 2.13. Комбинированное конструктивное решение

2.5.14. Размеры сечений всех конструктивных элементов емкостной конструкции следует устанавливать расчетом.

Количество и размеры крепежных элементов емкостной конструкции следует устанавливать расчетом.

## 2.6. Расчет конструкции

2.6.1. Расчет емкостной конструкции независимо от выбранного конструктивного решения следует выполнять с учетом следующих рекомендаций:

- конструкцию желательно рассчитывать как единую пространственную систему, без разделения ее на отдельные конструктивные элементы;
- в качестве обязательно учитываемых нагрузок следует принимать собственный вес конструкции и статическое давление сыпучего материала;
- расчет на действующие нагрузки следует выполнять по геометрически нелинейной схеме. При этом первоначально выполняется расчет на собственный вес конструкции, а затем к полученным результатам добавляется расчет на статическое давление сыпучего материала;
- предусматривать работу конструкции и, соответственно, выполнять расчет на ее работу за пределом упругости материала категорически не рекомендуется.

2.6.2. В качестве основных расчетных критериев рекомендуется принимать следующие:

- достижение в любой зоне или элементе конструкции эквивалентного напряжения (вычисленного, как правило, по четвертой теории прочности) превышающего расчетное сопротивление материала. Коэффициент условий работы при этом рекомендуется принимать равным  $\gamma_c = 1,0$ ;
- достижение в любой зоне или элементе конструкции коэффициента запаса устойчивости менее 1,0;
- достижение прогиба обшивки конструкции в любой зоне конструкции, превышающего значение  $1/200$  горизонтального периметра обшивки в этой зоне или  $1/50$  пролета обшивки в этой зоне;
- достижение прогиба ребра жесткости в любой зоне конструкции, превышающего значение  $1/250$  его длины.

2.6.3. Расчет элементов емкостной конструкции, спроектированной согласно традиционному конструктивному решению, может быть выполнен по имеющимся аналитическим выражениям, согласно методике, изложенной в специализированных и справочных изданиях [5 – 9].

2.6.4. Расчет элементов емкостной конструкции, спроектированной согласно панельному или комбинированному конструктивному решению рекомендуется выполнять с применением специализированных компью-

терных комплексов, практически реализующих численный метод строительной механики – метод конечных элементов (МКЭ).

Рекомендуется, также, расчет элементов емкостной конструкции, спроектированной согласно традиционному конструктивному решению выполнять согласно МКЭ. При этом полезным является дублирование с помощью МКЭ аналитической методики расчета.

2.6.5. Методика расчета емкостных конструкций с помощью МКЭ изложена в работе [10].

2.6.6. Основными рекомендациями относительно применения МКЭ следует считать:

- моделирование конструктивных элементов следует выполнять максимально подробно и полно;

- все конструктивные элементы, за исключением болтов крепления, следует моделировать пластинчатыми конечными элементами (КЭ). Болты крепления допускается моделировать стержневыми КЭ. Категорически не рекомендуется выполнять моделирование ребер жесткости и прочих аналогичных конструктивных элементов стержневыми КЭ;

- в качестве пластинчатого КЭ рекомендуется использовать 4-узловой изопараметрический оболочечный моментный КЭ с шестью степенями свободы в каждом узле. В качестве стержневого КЭ рекомендуется использовать так называемый «универсальный стержень»;

- разбивку элементов конструкции на КЭ следует выполнять с учетом предполагаемого градиента изменения деформаций (в первом приближении возможно ориентироваться на напряжения): чем он выше, тем более густой должна быть КЭ-сетка;

- минимальный размер КЭ ограничивается только возможностями имеющегося программного обеспечения и компьютерной техники. Максимальный размер КЭ не следует принимать превышающим  $1/8 - 1/10$  пролета обшивки;

- при решении задач устойчивости и динамических задач достаточным может считаться принять размер конечного элемента из такого расчета, чтобы в полуволну формы изгиба при потере устойчивости или формы колебания попадало не менее 3 – 4 КЭ;

- переход от одной густоты сетки к другой должен осуществляться плавно. При этом рекомендуется переходную зону поделить на так называемые «фронты сгущения», располагаемым не чаще, чем через 2 – 3 ряда КЭ. На одном таком «фронте» шаг сетки следует уменьшать не более, чем в два раза (рис. 2.14);

- форма пластинчатых КЭ должна максимально быть приближенной к правильной (квадрат, куб, тетраэдр). В отдельных КЭ соотношение сторон может варьироваться примерно до 1:4 – 1:5 без потери точности решения;

- следует максимально избегать, так называемой, «игольчатой» формы КЭ, представляющей собой четырехугольник с большим соотношением сторон (порядка 1:10);

- следует обдуманно относиться к применению в расчетной модели треугольных КЭ. Их математическая модель построена таким образом, что по всему элементу получаются постоянные значения напряжений (наблюдается, так называемое, кусочно-постоянное поле напряжений), искажающее получаемые результаты расчета;

- в случае двояксимметричной формы конструкции в плане рекомендуется проводить расчет только на четверти модели с заданием соответствующих условий симметрии деформаций по граням, что позволяет в значительной степени сэкономить время анализа и ресурсы компьютера.

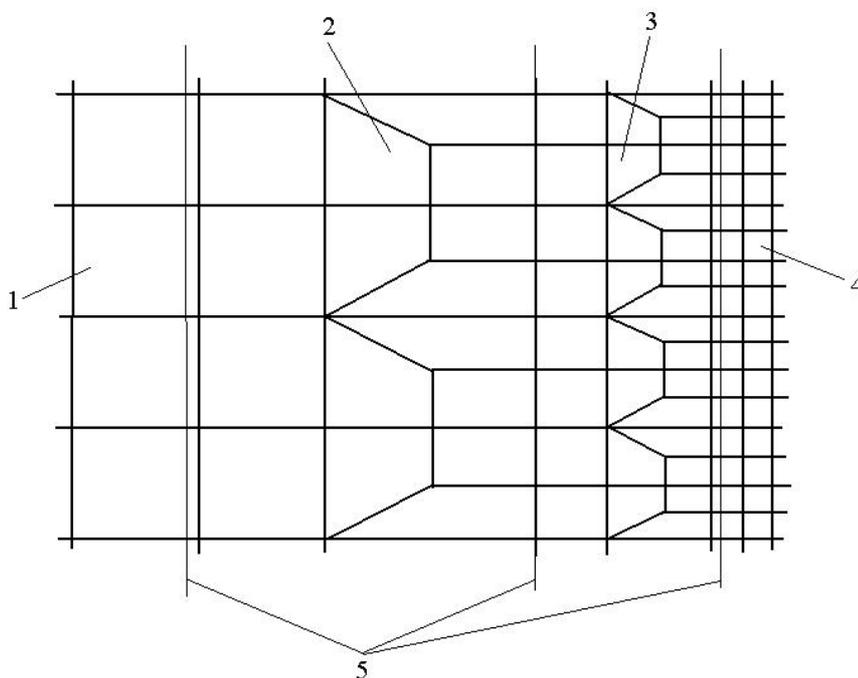


Рис. 2.14. Схема сгущения сетки КЭ:

1 – сетка исходной густоты, 2 – I «фронт сгущения», 3 – II «фронт сгущения»,  
4 – сетка требуемой густоты (в 4 раза мельче), 5 – границы «фронтов сгущения»

2.6.7. Рекомендуются два основных варианта создания сетки КЭ:

- с перестыковкой сетки КЭ (рис.2.15, а), применяемой для емкостных конструкций с размерами в плане более 6 – 6,5 м;

- без перестыковки сетки КЭ (рис.2.15, б), применяемой для емкостных конструкций с размерами в плане менее 6 – 6,5 м.

2.6.8. Анализ полученных результатов расчета с применением МКЭ рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- после получения результатов расчетов на отлаженной расчетной модели необходимо оценить уровень эквивалентных и главных напряжений в конструкции в соответствии с критерием п. 2.6.2. В случае несоот-

ветствия указанному критерию выполняется соответствующая корректировка размеров конструктивных элементов и их жесткостных характеристик и производится перерасчет;

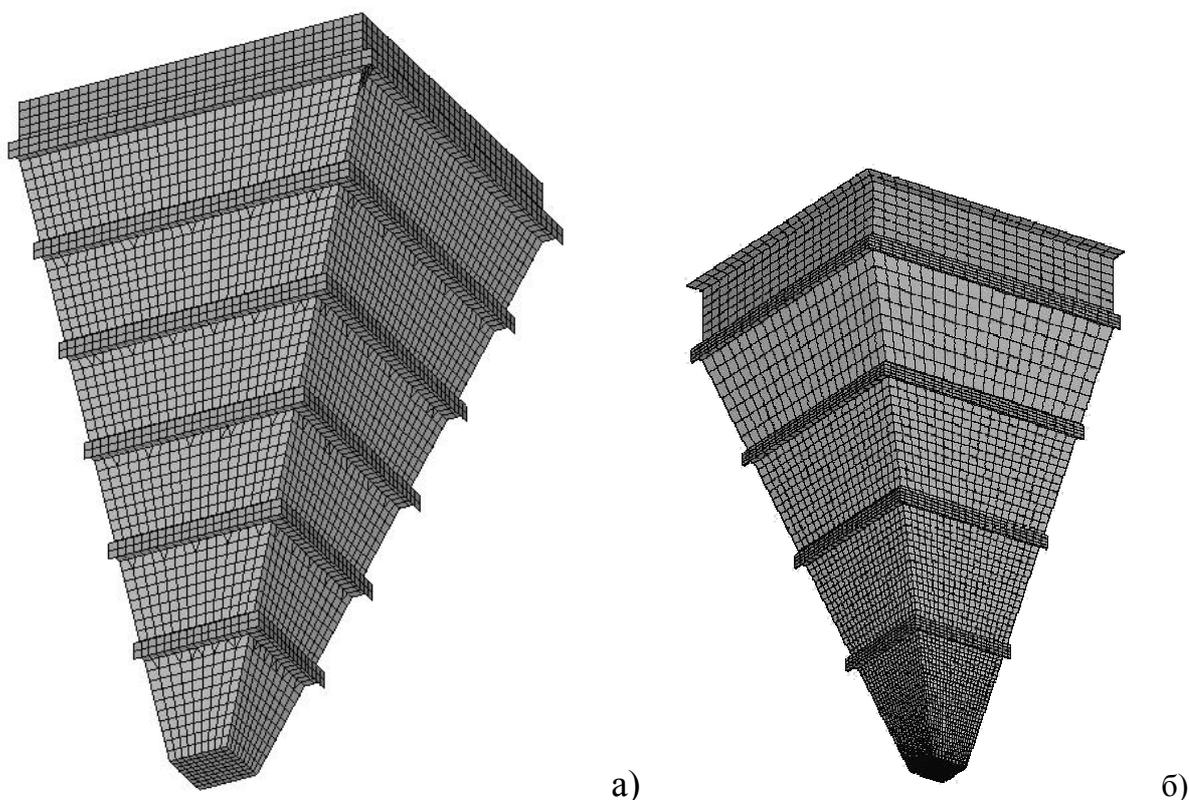


Рис. 2.15. Основные варианты дискретизации КЭ-модели:  
а) с перестыковкой КЭ; б) без перестыковки КЭ.

- контролируются деформации элементов конструкции в соответствии с критерием п. 2.6.2. В случае несоответствия указанному критерию следует выполнить перерасчет на действие эксплуатационных, а не расчетных нагрузок. Если и после этого критерий не будет удовлетворяться, то следует провести соответствующую корректировку размеров конструктивных элементов и их жесткостных характеристик и повторно выполнить перерасчет;

- только после выполнения указанных выше этапов следует перейти к анализу коэффициента запаса устойчивости. В случае его несоответствия указанному в п. 2.6.2 значению следует, как и в предыдущих случаях, выполнить соответствующую корректировку размеров конструктивных элементов и их жесткостных характеристик и повторно выполнить перерасчет.

Подобный итерационный процесс на каждом из этапов следует продолжать до выполнения указанных в п. 2.6.2 критериев. Полученные при этом размеры и сечения конструктивных элементов следует считать окончательными.

## 2.7. Устройство защитных приспособлений

2.7.1. Основной целью устройства защитных приспособлений для емкостных конструкций является необходимость минимизации или полного исключения негативного влияния сыпучего материала на ее конструктивные элементы.

2.7.2. К числу подобных негативных воздействий следует относить:

- ударное воздействие от падения глыбовых масс сыпучего материала;

- истираемость внутренних поверхностей при движении сыпучего материала внутри конструкции.

2.7.3. Ударное воздействие следует снижать контролем загрузки в емкостную конструкцию только тех фракций сыпучего материала, под которые она спроектирована.

Технологически это следует осуществлять просевом сыпучего материала и при необходимости его предварительным измельчением.

2.7.4. Дополнительной мерой, позволяющей снизить ударное воздействие, является устройство специальных защитных решеток над загрузочным отверстием емкостной конструкции (рис. 2.16).

При этом размер ячеек решетки следует подбирать исходя из фракции сыпучего материала, под которую спроектирована конструкция. В случае возможности загрузки нескольких видов сыпучего материала размер ячейки следует устанавливать по наибольшей фракции.



Рис. 2.16. Защитная решетка над загрузочным отверстием

2.7.5. Основной мерой исключения негативного влияния ударного воздействия следует считать устройство специальной противоударной футеровки.

Основные конструктивные решения достаточно подробно описаны в специализированных и справочных изданиях [5 – 9].

2.7.6. Истираемость внутренних поверхностей емкостной конструкции следует предотвращать устройством специальной износостойкой футеровки.

Ее тип и конструктивное решение зависит от множества факторов и рекомендации по ее выбору достаточно детально приводятся в специализированных и справочных изданиях [5 – 9].

2.7.7. В случае использования панельного конструктивного решения емкостной конструкции рекомендуется устанавливать футеровку из резиновых футеровочных плит, согласно рекомендациям п. 2.5.10. Такая футеровка является наиболее простой и экономичной.

2.7.8. Дополнительной мерой защиты емкостной конструкции следует считать ее обязательную окраску внешней поверхности специальными антикоррозионными составами.

## Раздел 3. Справочные сведения

### 3.1. Определение свойств сыпучего материала

3.1.1. Свойства сыпучего материала, учитываемые при проектировании емкостных конструкций, задаются набором его физико-механических характеристик. Необходимые при этом физико-механические характеристики перечислены в п. 1.4.2.

3.1.2. В случае, если в исходных данных для проектирования частично или полностью отсутствуют указанные характеристики либо они вызывают определенные сомнения и требуют уточнения, следует выполнить их определение согласно нижеприводимым рекомендациям.

3.1.3. В качестве плотности сыпучего материала следует принимать его плотность (удельный вес), определенную при максимальных нагрузках, соответствующих предполагаемым в проектируемой емкостной конструкции.

Не допускается принимать в качестве плотности сыпучего материала его насыпную плотность для только что отсыпанного материала.

3.1.4. Определение плотности сыпучего материала сводится к его засыпке в сосуд подходящего размера (не менее 15 – 20 размеров наибольшей фракции сыпучего материала) и фиксированного объема, приложении на его поверхности требуемой нагрузки в виде равномерно распределенного давления с последующей досыпкой необходимого объема материала в случае необходимости.

Далее заполненный таким образом сосуд с сыпучим материалом взвешивается и вычисляется плотность материала согласно выражению (3.1):

$$\gamma = \frac{M_n}{V_0}, \quad (3.1)$$

где  $M_n$  – масса помещенного в сосуд сыпучего материала нетто (за вычетом массы сосуда);

$V_0$  – объем сосуда.

3.1.5. Углы внешнего  $\varphi$  и внутреннего  $\psi$  трения сыпучего материала следует определять с помощью сдвигового прибора согласно рекомендациям, приведенным в работе [11]. При этом испытания следует проводить, как и в случае определения плотности материала, при максимальных нагрузках, соответствующих предполагаемым в проектируемой емкостной конструкции.

3.1.6. Размер зерна сыпучего материала  $d$  следует определять как условный диаметр его зерен согласно выражению (3.2):

$$d = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}, \quad (3.2)$$

где  $d_1, d_2, d_3$  – размер диаметра зерна сыпучего материала в трех взаимно перпендикулярных направлениях, соответственно.

В случае, если предполагается хранение сыпучего материала нескольких фракций, то предварительно следует определить процентное содержание (по массе) каждой из фракций с помощью отсеивания его на ситах с различной крупностью ячеек. Далее размер зерна сыпучего материала может быть вычислен согласно выражению (3.3):

$$d = \frac{\sum d_i \cdot M_i}{\sum M_i}, \quad (3.3)$$

где  $d_i$  – размер зерна  $i$ -ой фракции сыпучего материала, определенный согласно выражению (3.2);

$M_i$  – процентное содержание  $i$ -ой фракции сыпучего материала (по массе).

3.1.7. Угол естественного откоса  $\chi$  сыпучего материала следует определять путем измерения угла откоса образовавшегося конуса для только что отсыпанного материала. При этом следует проводить измерения для средней трети конуса материала.

3.1.8. При затрудненности или невозможности определения указанных выше физико-механических характеристик сыпучего материала ориентировочные значения основных из них могут быть приняты согласно данным приложения А настоящего Руководства, а также согласно данным, приводимым в специализированных и справочных изданиях [5 – 9].

3.1.9. Угол укладки зерен  $\xi$  сыпучего материала следует определять согласно специальной разработанной автором методике, изложенной в подразделе 3.2 настоящего Руководства.

3.1.10. Во всех проводимых испытаниях количество измерений должно быть достаточным для получения окончательного результата с доверительной вероятностью не ниже 0,95. При этом требуется, как правило, не менее 10 измерений.

В случае получения устойчивых результатов на меньшем количестве измерений дальнейшие испытания могут быть ограничены.

## 3.2. Методика определения угла укладки зерен сыпучего материала

3.2.1. Угол укладки зерен  $\xi$  сыпучего материала является среднестатистической величиной и может быть определен только с помощью вычислений после предварительного определения указанных в подразделе 3.1 настоящего Руководства всех иных физико-механических характеристик сыпучего материала.

3.2.2. Для нахождения угла укладки зерен сыпучий материал помещают в сосуд в форме прямого цилиндра диаметром  $D$  не менее 15 – 20 размеров наибольшей фракции сыпучего материала и высотой  $H$  не менее 1,5 – 2,0 диаметра с подвижным дном.

3.2.3. Нагружают верхнюю горизонтальную поверхность сыпучего материала величиной внешнего давления  $P_0$ , соответствующего максимальному предполагаемому в проектируемой емкостной конструкции с последующей досыпкой сыпучего материала, при необходимости.

3.2.4. Измеряют вертикальное давление  $P_1$  сыпучего материала, оказываемое им в состоянии статического покоя на подвижное дно, и вычисляют давление только от сыпучего материала  $P$  согласно выражению (3.4):

$$P = P_1 - P_0. \quad (3.4)$$

3.2.5. Далее угол укладки зерен может быть вычислен из решения трансцендентного уравнения (3.5), в котором вспомогательный коэффициент определяется согласно выражению (3.6):

$$e^{-k \cdot H} = 1 - k \cdot \frac{4 \cdot P}{\gamma \cdot \pi \cdot D^2}, \quad (3.5)$$

$$k = \frac{4 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \xi \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)}{D \cdot (2 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi))}. \quad (3.6)$$

3.2.6. Решение уравнения (3.4) рекомендуется выполнять с помощью специализированного пакета прикладных математических программ.

### 3.3. Пример проектирования емкостной конструкции с плоскими стенками

3.3.1. Требуется спроектировать одиночную вертикальную жесткую стальную двухступенчатую саморазгружающуюся емкостную конструкцию с вертикальной верхней частью, предназначенную для хранения несвязного сыпучего материала.

3.3.2. Исходными данными для проектирования являются следующие данные.

3.3.2.1. Несвязный сыпучий материал – уголь со следующими физико-механическими характеристиками:  $\gamma = 1000 \text{ кг/м}^3$ ,  $d = 40 \text{ мм}$ ,  $\varphi = 21^\circ$ ,  $\psi = 20^\circ$ ,  $\chi = 35^\circ$ ,  $\xi = 65^\circ$ .

3.3.2.2. Необходимый объем хранимого сыпучего материала –  $130 \text{ м}^3$ .

3.3.2.3. Ограничений по габаритным размерам конструкции не предусмотрено. Имеется ограничение по форме конструкции – стенки конструкции должны быть плоскими.

3.3.3. Процесс проектирования начинается с назначения внешней формы и геометрических размеров конструкции.

3.3.3.1. Форма конструкции принимается квадратной в плане, как наименее материалоемкая с учетом наложенного в исходных данных ограничения и наиболее технологичная с учетом возможности ее последующего изготовления.

3.3.3.2. Ширина разгрузочного отверстия принимается равной  $a_1 = 15 \cdot d = 15 \cdot 40 = 600 \text{ мм}$ .

3.3.3.3. Форма разгрузочного отверстия принимается квадратной с длиной  $b_1 = a_1 = 600 \text{ мм}$ .

3.3.3.4. Расположение в плане разгрузочного отверстия принимается двоякосимметричное по осям симметрии конструкции.

3.3.3.5. Угол наклона образующей нижней части конструкции принимается равным  $\alpha_0 = 10 + \chi = 10 + 35 = 45^\circ$ .

3.3.3.6. Высоты нижней и верхней частей конструкции принимаются равными

$$A = n \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{n} = 4 \cdot \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} = 4,$$
$$h_{10} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_0 \cdot \sin \alpha_0}{A \cdot (3 - 2 \cdot \sin \alpha_0)}} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot 130 \cdot \operatorname{tg}^2 45 \cdot \sin 45}{4 \cdot (3 - 2 \cdot \sin 45)}} = 3,46 \text{ м},$$
$$h_{20} = \frac{V - \frac{4 \cdot h_{10}^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha_0}}{A \cdot \left(\frac{h_{10}}{\operatorname{tg} \alpha_0}\right)^2} = \frac{130 - \frac{4 \cdot 3,46^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 45}}{4 \cdot \left(\frac{3,46}{\operatorname{tg} 45}\right)^2} = 1,56 \text{ м}.$$

3.3.3.7. Ширина загрузочного отверстия принимается равной

$$a_{20} = \frac{2 \cdot h_{10}}{\operatorname{tg} \alpha_0} = \frac{2 \cdot 3,46}{\operatorname{tg} 45} = 6,92 \text{ м.}$$

3.3.3.8. Вспомогательный коэффициент  $B$  определится выражением

$$B = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_{20} \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)} = 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos 21}{6,92 \cdot \operatorname{tg}(65 - 20)} = 2,66 \text{ м}^{-1}.$$

Форма нижней части конструкции определится функциональной зависимостью, график которой приведен на рис. 3.1.

$$R(y) = \frac{a_{20}}{\sqrt[4]{1 + B \cdot y}} = \frac{6,92}{\sqrt[4]{1 + 2,66 \cdot y}}.$$

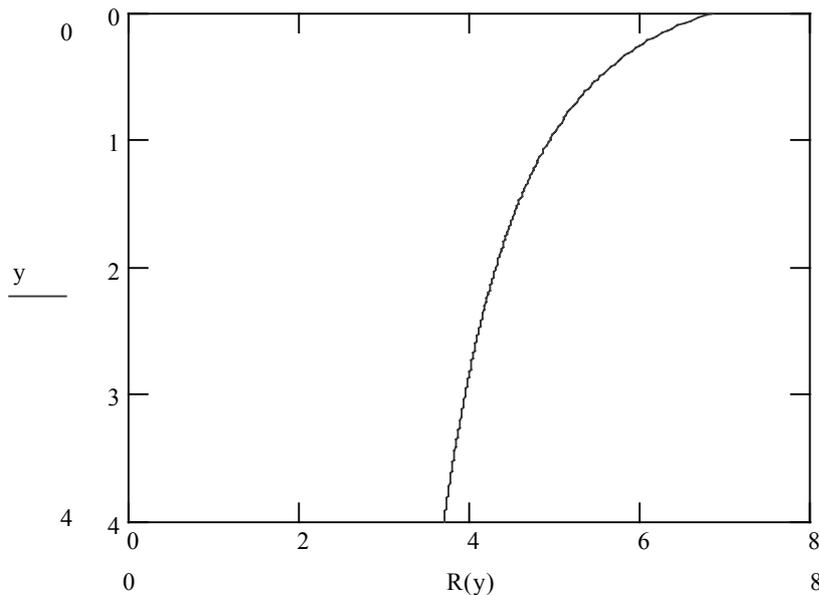


Рис. 3.1. Форма образующей нижней части емкостной конструкции

Угол наклона образующей к горизонту  $\alpha$  определится функциональной зависимостью

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left( \frac{a_{20} \cdot B}{4 \cdot \sqrt[4]{(1 + B \cdot y)^5}} \right) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left( \frac{6,92 \cdot 2,66}{4 \cdot \sqrt[4]{(1 + 2,66 \cdot y)^5}} \right).$$

Для глубины  $y = h_{10}/2 = 3,46/2 = 1,73$  м значение угла равно  $\alpha(1,73) = 61,9^\circ$ .

3.3.3.9. Откорректируем значение угла наклона образующей нижней части конструкции. Ранее принятое значение равно  $\alpha_0 = 45^\circ$ , вновь полученное –  $\alpha = 61,9^\circ$ .

Принимаем значение  $\alpha = 62^\circ$  и проверяем угол наклона ребер

$$\beta = \arctg\left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha\right) = \arctg\left(\frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \operatorname{tg}^2 62\right) = 53^\circ.$$

Условие  $\alpha_0 = 45^\circ < \alpha = 62^\circ$  выполняется.

3.3.3.10. Откорректируем высоты нижней и верхней частей конструкции

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{A \cdot \frac{a_1^3}{8} \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{A \cdot (3 - 2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a_1 \cdot \operatorname{tg} \alpha =$$

$$= \sqrt[3]{\frac{4 \cdot \frac{0,6^3}{8} \cdot \operatorname{tg}^3 62 \cdot \sin 62 + 3 \cdot 130 \cdot \operatorname{tg}^2 62 \cdot \sin 62}{4 \cdot (3 - 2 \cdot \sin 62)}} - 0,5 \cdot 0,6 \cdot \operatorname{tg} 62 = 5,71 \text{ м}$$

$$h_2 = \frac{V - A \cdot \left( \frac{a_1^2}{4} \cdot h_1 + \frac{a_1}{2} \cdot \frac{h_1^2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{h_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{A \cdot \left( \frac{a_1}{2} + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2} =$$

$$= \frac{130 - 4 \cdot \left( \frac{0,6^2}{4} \cdot 5,71 + \frac{0,6}{2} \cdot \frac{5,71^2}{\operatorname{tg} 62} + \frac{5,71^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 62} \right)}{4 \cdot \left( \frac{0,6}{2} + \frac{5,71}{\operatorname{tg} 62} \right)^2} = 0,83 \text{ м}$$

Окончательно примем  $h_1 = 5700$  мм,  $h_2 = 850$  мм.

3.3.3.11. Откорректированная ширина загрузочного отверстия равна

$$a_2 = \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{a_1}{2} = \frac{2 \cdot 5,7}{\operatorname{tg} 62} + \frac{0,6}{2} = 6,36 \text{ м}.$$

3.3.3.12. Объем конструкции с окончательно принятыми размерами будет равен

$$V = V_1 + V_2 = A \cdot h_1 \cdot \left( \frac{a_1^2}{4} + \frac{a_1 \cdot h_1}{2 \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + A \cdot h_2 \cdot \left( \frac{a_1}{2} + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 =$$

$$= 4 \cdot 5,7 \cdot \left( \frac{0,6^2}{4} + \frac{0,6 \cdot 5,7}{2 \cdot \operatorname{tg} 62} + \frac{5,7^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 62} \right) + 4 \cdot 0,85 \cdot \left( \frac{0,6}{2} + \frac{5,7}{\operatorname{tg} 62} \right)^2 = 136,5 \text{ м}^3$$

3.3.4. Вычислим давления от сыпучего материала на стенки конструкции.

3.3.4.1. Для верхней части конструкции нормальное давление, вычисленное согласно выражению (2.13), графически будет иметь вид изображенный на рис. 3.2. По вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – нормальное давление в кПа.

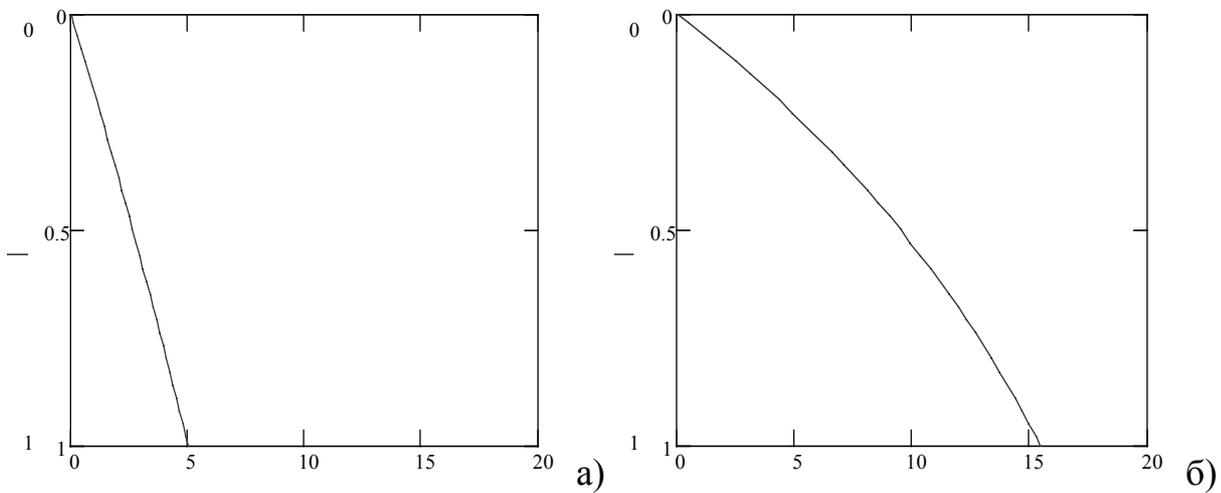


Рис. 3.2. Нормальное давление для верхней части:  
а) для первого режима, б) для второго режима

На глубине  $y = 0,85$  м, соответствующей зоне соединения верхней и нижней частей конструкции, давление равно 4,31 кПа для первого режима и повышается до 13,93 кПа во втором режиме.

3.3.4.2. Тангенциальное давление изменяется аналогично и имеет аналогичные значения.

3.3.4.3. Для нижней части конструкции нормальное давление, вычисленное согласно выражению (2.12), графически будет иметь вид изображенный на рис. 3.3. По вертикали отложена глубина в м, по горизонтали – нормальное давление в кПа.

Местное повышение нормального давления наблюдается в зоне соединения верхней и нижней частей конструкции. При этом его значение равно (для  $y = 0$ ) для первого режима 33,43 кПа и повышается до 55,82 кПа во втором режиме.

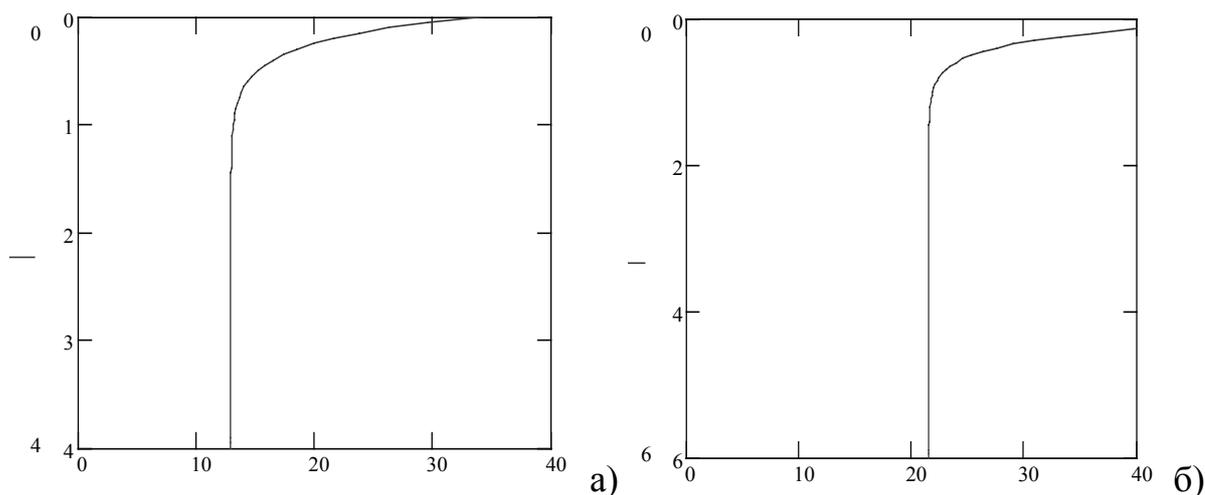


Рис. 3.3. Нормальное давление для нижней части:  
а) для первого режима, б) для второго режима

Для остальных участков нижней части конструкции нормальное давление остается практически постоянным по всей глубине и равно для глубины  $y = 5,7$  м для первого режима 12,86 кПа и повышается до 21,48 кПа во втором режиме.

3.3.4.4. Тангенциальное давление изменяется аналогично и имеет аналогичные значения.

3.3.4.5. Таким образом, второй режим является более неблагоприятным для проектируемой конструкции и именно на него следует проводить дальнейший расчет.

3.3.4.6. Полученные выше значения давлений сыпучего материала следует умножить на коэффициенты надежности по предельному расчетному значению и эксплуатационному расчетному значению (п. 2.3.11).

3.3.5. Выбирается сталь для проектируемой емкостной конструкции – сталь ВСтЗпс6 с расчетным сопротивлением  $R_y = 240$  МПа.

3.3.6. Конструктивное решение проектируемой емкостной конструкции принимается в виде панельной схемы. При этом верхняя часть ввиду незначительной высоты проектируется в виде бункерной балки (см. рис. 2.8), а нижняя часть из панелей размером на боковую стенку.

3.3.7. Расчет проектируемой емкостной конструкции выполняется с помощью МКЭ. Для этого строится КЭ-модель (рис. 3.4).

3.3.8. Тип дискретизации модели принимается без перестыковки КЭ-сетки, т.к. размер конструкции в плане не превышает 6,5 м. Размер КЭ изменялся с 15 см для верха модели до 1,5 см для низа модели. Соответственно, в нижней части модели выполнялось дополнительное сгущение сетки по высоте конструкции. Форма КЭ принималась близкой к квадратной.

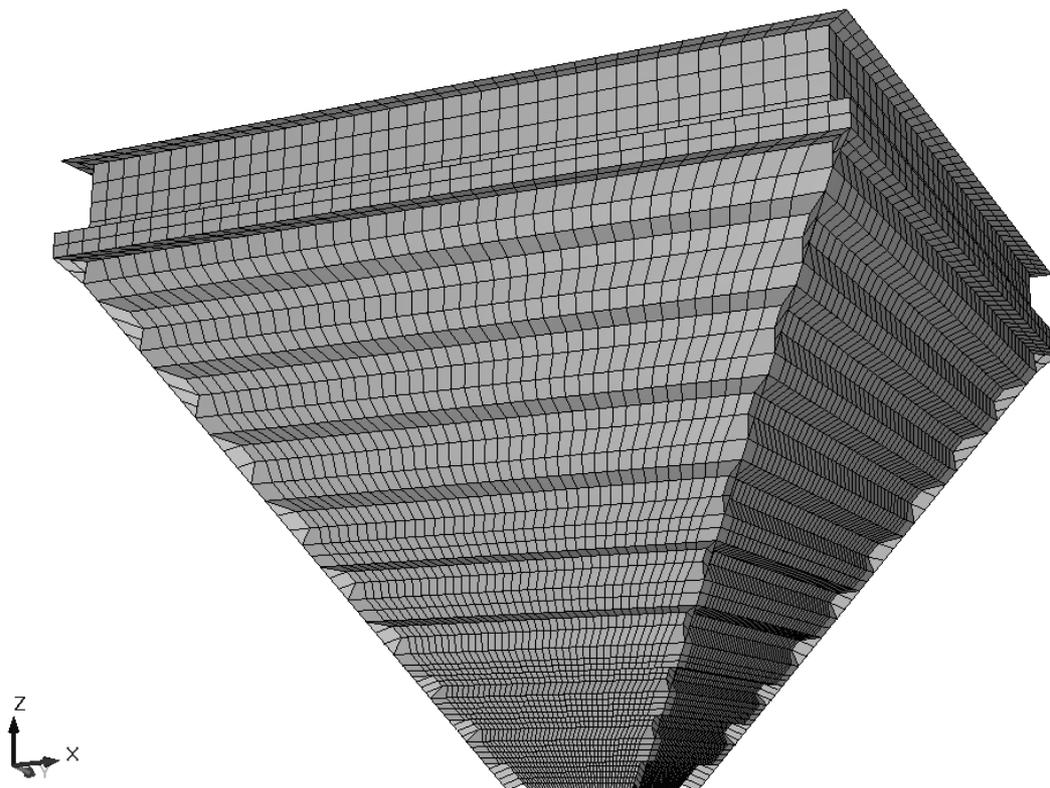


Рис. 3.4. КЭ-модель проектируемой емкостной конструкции

3.3.9. После проведение проектировочных расчетов по итерационной методике, описанной в подразделе 2.6 настоящего Руководства, были окончательно приняты следующие размеры конструктивных элементов емкостной конструкции:

- верхняя часть из листа толщиной 8 мм;
- нижняя часть из панели, состоящей из внутреннего листа толщиной 4 мм и внешнего гофрированного листа 700×140×3 мм;
- обвязочные элементы панели из листа толщиной 8 мм;
- дополнительный усиливающий пояс жесткости в месте соединения верхней и нижней части таврового сечения 30ШТ1 по ТУ 14-2-685-86.

3.3.10. Картины распределения эквивалентных напряжений (в МПа) в проектируемой емкостной конструкции, вычисленных по четвертой теории прочности, приведены на рис. 3.5. Более темным участкам соответствует больший уровень напряжений.

Картина деформированного состояния в проектируемой емкостной конструкции, приведена на рис. 3.6.

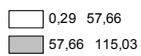
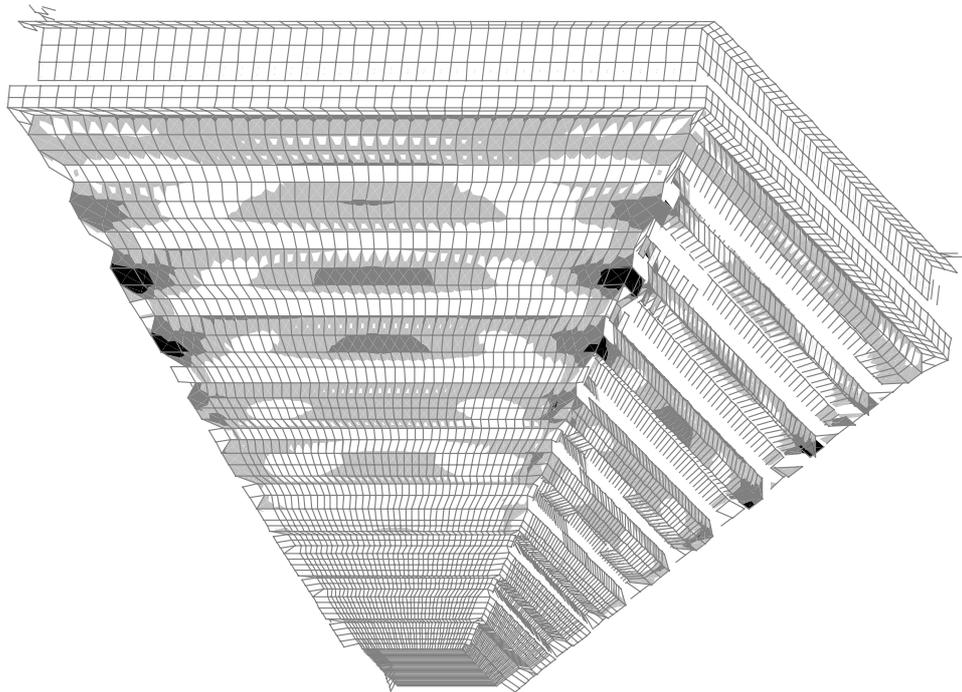


Рис. 3.5. Распределение эквивалентных напряжений

Внешний слой NE4 Н/мм2 Комбинация 1 ((L1)\*1.5)

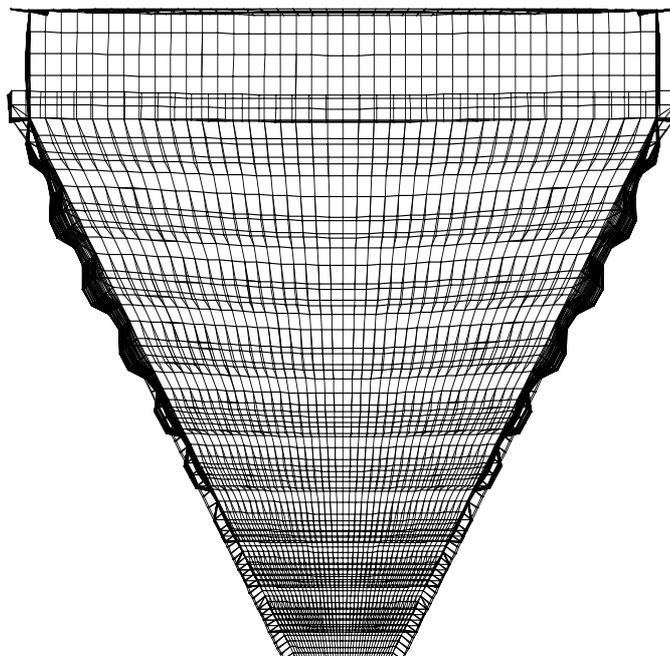


Рис. 3.6. Деформированное состояние

3.3.11. Основные полученные технико-экономические параметры для спроектированной емкостной конструкции представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

**Технико-экономические показатели конструкции**

№ п/п	Показатель, единицы измерения	Величина
1.	Екв. напряжения в пролете, МПа	153
2.	Екв. напряжения в угловой зоне, МПа	230
3.	Прогиб стенки, мм	12,3
4.	Первая собственная частота колебаний, Гц	18,32
5.	Вторая собственная частота колебаний, Гц	22,06
6.	Третья собственная частота колебаний, Гц	26,60
7.	Коэффициент запаса устойчивости	2,51
8.	Длина сварных швов, м	58,7
9.	Масса, кг	9130
10.	Объем, м <sup>3</sup>	136,5

Из табл. 3.1 видно, что указанные в п. 2.6.2 критерии выполняются.

# Приложение А.

## Физико-механические характеристики сыпучих материалов

Таблица А.1

Плотность, т/м<sup>3</sup>

№ п/п	Материал	[9]	[5], ([8])
1	2	3	4
<b><u>I. Строительный</u></b>			
1.	Гипс кусковой	1,60	1,60
2.	Глина влажная и мокрая	2,00	-
3.	Глина сухая	1,60	1,60
4.	Глинозем	1,25	1,00-1,20
5.	Гравий сухой и мокрый	2,00	2,00
6.	Гранит	-	- (2,20)
7.	Доломит	-	1,60-2,00
8.	Древесные опилки воздушно-сухие	0,25	0,25
9.	Известняк	1,60	1,60-2,00
10.	Известь: - гашенная в порошке	0,70	0,70
11.	- обожженная крупная	1,20	-
12.	- обожженная мелкая	0,90	-
13.	Камень	2,00	1,30-2,00
14.	Клинкер цементный	1,60	- (1,60)
15.	Мел дробленый	1,40	-
16.	Мергель	1,25	-
17.	Песок, насыщенный водой	2,00	-
18.	Песок сухой	1,60	1,60
19.	Песчаник	-	-
20.	Цемент	1,60	1,60
21.	Шлак	1,20	-
22.	Щебень	2,00	2,00
<b><u>II. Химический</u></b>			
1.	Алюминий фтористый	1,00	0,90-0,95
2.	Аммоний фтористый	0,90	-
3.	Апатитовый концентрат	2,00	2,00
4.	Карбид	0,90	-
5.	Карналлит	1,00	-
6.	Криолит	1,00	1,20-1,35
7.	Магнетитовый порошок	1,80	-

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
8.	Нефелиновый концентрат	1,50	1,50
9.	Селитра	1,20	1,20
10.	Сода кальцинированная	0,60	0,60
11.	Сульфат аммония	0,90	0,90
12.	Фосфористая мука	1,60	-
	<b><u>III. Угли и руды</u></b>		
1.	Агломерат железной руды	2,00	1,60-2,50
2.	Железняк бурый	2,00	-
3.	Железняк красный	2,60	-
4.	Железняк магнитный	3,40	-
5.	Кокс	0,60	0,50-0,60
6.	Концентрат шихтового отделения аг- лофабрики	-	-
7.	Руда	-	1,80-3,50
8.	Руда железная	-	2,00-2,60
9.	Руда магнетитовая	-	-
10.	Руда марганцевая	2,00	-
11.	Сланец	1,00	1,10
12.	Торф	0,60	-
13.	Уголь-антрацит	1,00	1,00-1,40
14.	Уголь бурый	0,80	-
15.	Уголь каменный	1,00	1,00-1,50
16.	Угольная пыль нормальной влажности	0,80	0,70
17.	Штейн свинцовый	4,00	-
18.	Штыб угольный	-	-
	<b><u>IV. Пищевые продукты</u></b>		
1.	Зерно	0,80	-
2.	Картофель	0,75	-
3.	Комбикорм гранулированный	0,80	-
4.	Комбикорма всех видов (кроме гранулированных)	0,55	-
5.	Крупа	0,80	-
6.	Кукуруза в початках	0,45	-
7.	Мука всех видов	0,60	-
8.	Отруби всех видов	0,40	-
9.	Подсолнух	0,55	-
10.	Сахар-песок	1,00	-
11.	Семена бобовые	0,80	-

Таблица А.2

Угол естественного откоса, °

№ п/п	Материал	[9]	[5], ([8])
1	2	3	4
	<b><u>І. Строительный</u></b>		
1.	Гипс кусковой	35	30-39
2.	Глина влажная и мокрая	20	-
3.	Глина сухая	30	40-45
4.	Глинозем	30	28-29
5.	Гравий сухой и мокрый	30	26-45
6.	Гранит	-	-
7.	Доломит	-	-
8.	Древесные опилки воздушно-сухие	35	31-56
9.	Известняк	35	29-51
10.	Известь: - гашенная в порошке	35	-
11.	- обожженная крупная	35	-
12.	- обожженная мелкая	35	-
13.	Камень	30	20
14.	Клинкер цементный	30	29-33
15.	Мел дробленный	40	-
16.	Мергель	30	-
17.	Песок, насыщенный водой	20	-
18.	Песок сухой	30	30-40
19.	Песчаник	-	-
20.	Цемент	30	27-40
21.	Шлак	30	-
22.	Щебень	30	40-45
	<b><u>ІІ. Химический</u></b>		
1.	Алюминий фтористый	35	27-36
2.	Аммоний фтористый	30	-
3.	Апатитовый концентрат	40	31-33
4.	Карбид	30	-
5.	Карналлит	35	-
6.	Криолит	35	28-48
7.	Магнезитовый порошок	35	-

Продолжение таблицы А.2

1	2	3	4
8.	Нефелиновый концентрат	35	31-40
9.	Селитра	40	38-40
10.	Сода кальцинированная	40	35-45
11.	Сульфат аммония	40	40
12.	Фосфористая мука	40	-
	<b><u>III. Угли и руды</u></b>		
1.	Агломерат железной руды	40	45
2.	Железняк бурый	40	-
3.	Железняк красный	40	-
4.	Железняк магнитный	40	-
5.	Кокс	40	28-51
6.	Концентрат шихтового отделения аглофабрики	-	-
7.	Руда	-	30-41
8.	Руда железная	-	35-37
9.	Руда магнетитовая	-	-
10.	Руда марганцевая	40	-
11.	Сланец	35	-
12.	Торф	35	-
13.	Уголь-антрацит	35	35
14.	Уголь бурый	35	-
15.	Уголь каменный	35	27-45
16.	Угольная пыль нормальной влажности	25	-
17.	Штейн свинцовый	40	-
18.	Штыб угольный	-	34-44
	<b><u>IV. Пищевые продукты</u></b>		
1.	Зерно	25	-
2.	Картофель	30	-
3.	Комбикорм гранулированный	25	-
4.	Комбикорма всех видов (кроме гранулированных)	30	-
5.	Крупа	25	-
6.	Кукуруза в початках	30	-
7.	Мука всех видов	40	-
8.	Отруби всех видов	40	-
9.	Подсолнух	30	-
10.	Сахар-песок	35	-
11.	Семена бобовые	25	-

Таблица А.3

Коэффициент трения по стали (ctg  $\varphi$ )

№ п/п	Материал	[9]	[5], ([8])
1	2	3	4
<b><u>I. Строительный</u></b>			
1.	Гипс кусковой	0,30	0,61-0,78
2.	Глина влажная и мокрая	0,20	-
3.	Глина сухая	0,30	-
4.	Глинозем	0,30	0,42-0,54
5.	Гравий сухой и мокрый	0,50	0,58-1,00
6.	Гранит	-	0,40-0,42
7.	Доломит	-	0,46-0,51
8.	Древесные опилки воздушно-сухие	0,30	0,39-0,83
9.	Известняк	0,30	0,30-1,00
10.	Известь: - гашенная в порошке	0,30	0,35
11.	- обожженная крупная	0,30	-
12.	- обожженная мелкая	0,30	-
13.	Камень	0,50	0,58-0,84
14.	Клинкер цементный	0,30	-
15.	Мел дробленый	0,30	-
16.	Мергель	0,30	-
17.	Песок, насыщенный водой	0,20	-
18.	Песок сухой	0,30	0,32-0,80
19.	Песчаник	-	0,30-0,59
20.	Цемент	0,30	0,60-0,65
21.	Шлак	0,30	-
22.	Щебень	0,50	0,47-0,63
<b><u>II. Химический</u></b>			
1.	Алюминий фтористый	0,30	0,58-0,60
2.	Аммоний фтористый	0,30	-
3.	Апатитовый концентрат	0,30	0,60
4.	Карбид	0,30	-
5.	Карналлит	0,30	-
6.	Криолит	0,30	0,55-0,95
7.	Магнетитовый порошок	0,30	-

Продолжение таблицы А.3

1	2	3	4
8.	Нефелиновый концентрат	0,30	0,30-0,68
9.	Селитра	0,30	-
10.	Сода кальцинированная	0,30	0,30-0,70
11.	Сульфат аммония	0,30	-
12.	Фосфористая мука	0,30	-
	<b><u>III. Угли и руды</u></b>		
1.	Агломерат железной руды	-	0,45
2.	Железняк бурый	-	-
3.	Железняк красный	-	-
4.	Железняк магнитный	-	-
5.	Кокс	0,50	0,47-0,53
6.	Концентрат шихтового отделения аглофабрики	-	0,89
7.	Руда	-	0,57-0,84
8.	Руда железная	-	0,50-1,00
9.	Руда магнетитовая	-	0,46
10.	Руда марганцевая	-	-
11.	Сланец	0,30	0,35-0,58
12.	Торф	0,50	-
13.	Уголь-антрацит	0,30	0,40-0,80
14.	Уголь бурый	0,30	-
15.	Уголь каменный	0,30	0,30-0,80
16.	Угольная пыль нормальной влажности	-	0,32-0,77
17.	Штейн свинцовый	-	-
18.	Штыб угольный	-	0,30 (-)
	<b><u>IV. Пищевые продукты</u></b>		
1.	Зерно	0,40	-
2.	Картофель	-	-
3.	Комбикорм гранулированный	0,40	-
4.	Комбикорма всех видов (кроме гранулированных)	0,40	-
5.	Крупа	0,40	-
6.	Кукуруза в початках	0,40	-
7.	Мука всех видов	0,30	-
8.	Отруби всех видов	0,30	-
9.	Подсолнух	0,40	-
10.	Сахар-песок	0,40	-
11.	Семена бобовые	-	-

## Список литературы

1. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81\*. – [Действующий от 1983-01-02]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
2. Підприємства, будівлі та споруди по зберіганню та переробці зерна: ДБН В.2.2-8-98. – [Чинний від 1998-01-07] – К.: Держбуд України, 1988. – 41 с.
3. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. – [Действующий от 1987-01.01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
4. Система надійності і безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Норми проектування: ДБН В.1.2-2:2006. – [Чинний від 2007-01-01] – К.: Держбуд України, 2006. – 70 с.
5. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
6. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величина, В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
7. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
8. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
9. 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.
10. Банников Д. О. Расчет пирамидально-призматических бункеров методом конечных элементов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич. – Днепропетровск: Наука и образование, 2003. – 150 с.
11. 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.

# Содержание

Предисловие .....	3
<b>Раздел 1. Общие сведения</b> .....	5
1.1. Область применения .....	5
1.2. Нормативные ссылки .....	5
1.3. Термины и определения .....	6
1.4. Принятые обозначения .....	8
1.5. Техничко-экономические параметры .....	11
<b>Раздел 2. Рекомендации по проектированию</b> .....	13
2.1. Исходные данные для проектирования .....	13
2.2. Назначение внешней формы и геометрических размеров ..	14
2.3. Расчет давления сыпучего материала .....	21
2.4. Выбор материала .....	27
2.5. Выбор конструктивного решения .....	27
2.6. Расчет конструкции .....	32
2.7. Устройство защитных приспособлений .....	36
<b>Раздел 3. Справочные сведения</b> .....	38
3.1. Определение свойств сыпучего материала .....	38
3.2. Методика определения угла укладки зерен сыпучего ма- териала .....	40
3.3. Пример проектирования емкостной конструкции с пло- скими стенками .....	41
<b>Приложение А. Физико-механические характеристики сыпучих материалов</b> .....	49
Список литературы .....	55

Науково-практичне видання

**Банніков Дмитро Олегович**

**Керівництво з проектування  
вертикальних сталевих ємнісних конструкцій  
для сипучих матеріалів**

Технічний редактор Г. М. Хомич

Підписано до друку 10.09.09. Формат 60×84/16.  
Папір офсетний. Ум.-друк. арк. 3,26. Обл.-вид. арк. 3,06.  
Тираж 300 прим. Зам. № 200.

Видавництво “Нова ідеологія”.  
40044, м. Дніпропетровськ, вул. Гоголя, 15а.  
Свідоцтво ДК № 191 від 20.09.2000 р.