

Д. О. БАННИКОВ

**ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ЖЕСТКИЕ
СТАЛЬНЫЕ ЕМКОСТИ:
СОВРЕМЕННЫЕ КОНЦЕПЦИИ
ФОРМООБРАЗОВАНИЯ**

Днепропетровск 2009

УДК 624.954
ББК 38.728
Б-23

*Рекомендовано к печати решением Ученого совета
Днепропетровского национального университета
железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна
(протокол № 4 от 24.11. 2008 г.).*

Рецензенты:

Петренко В. Д., доктор технических наук, профессор
(Днепропетровский национальный университет железнодорожного
транспорта имени академика В. Лазаряна)

Кулябко В. В., доктор технических наук, профессор
(Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры)

В монографии обобщен и систематизирован накопленный к настоящему времени опыт проектирования вертикальных жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, в том числе приводятся сведения об их отказах и авариях. В основной части работы изложены авторские концепции и представления о формообразовании таких сооружений с учетом особенностей их работы, методов расчета и конструирования.

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 978-966-2252-06-4

© Д. О. Банников, 2009

Содержание

Предисловие	7
Введение	11
Раздел 1. Вертикальные стальные емкости для сыпучих материалов	15
1.1. Современные емкостные конструкции	17
1.1.1. Сферы применения	17
1.1.2. Основные разновидности	18
1.2. Традиционные подходы к созданию емкостных конструкций	28
1.2.1. Нормативно-справочная база	28
1.2.2. Существующая концепция проектирования	30
1.2.3. Замечания о классификации	33
1.3. Отказы и аварии емкостных конструкций	40
1.3.1. Ошибки, связанные с проектированием	42
1.3.2. Ошибки, связанные с изготовлением и монтажом	50
1.3.3. Ошибки, связанные с эксплуатацией	51
1.4. Авторская концепция формообразования емкостных конструкций	52
Раздел 2. Выбор формы и назначение габаритных размеров емкостной конструкции	57
2.1. Существующие рекомендации	59
2.2. Экономичность внешней формы	61
2.2.1. Эффективность круглой в плане формы	61
2.2.2. Эффективность низкой по высоте формы	65
2.3. Модель оптимизации геометрических размеров	70
2.3.1. Геометрическая модель	70
2.3.2. Математическая модель	72
2.4. Частные случаи применения полученного решения	79
2.4.1. Случай двухступенчатой емкости	79
2.4.2. Случай трехступенчатой емкости	90
2.4.3. Случай парной многоступенчатой емкости	92
2.5. Сферы применимости полученных решений	93

Раздел 3. Выбор конструктивного решения емкостной конструкции	95
3.1. Особенности существующего конструктивного решения	97
3.2. Предлагаемые конструктивные решения	105
3.3. Авторская панельная конструктивная схема	106
Раздел 4. Теоретические исследования работы емкостной конструкции	115
4.1. Существующие аналитические подходы	117
4.2. Численные исследования	119
4.2.1. Работа отдельной панели	119
4.2.2. Работа емкостной конструкции	125
4.3. Замечания о работе узловых соединений	132
4.4. Частные теоретические задачи	133
4.4.1. Определение степени совместимости работы обшивки с ребром жесткости	133
4.4.2. Оптимизация формы ребра жесткости	139
4.4.3. Определение наиболее напряженной зоны конструкции	143
4.4.4. Определение динамических характеристик	147
Раздел 5. Практическое применение теории формообразования емкостной конструкции	151
5.1. Сущность теории формообразования	153
5.2. Сущность инженерной методики формообразования	154
Заключение	159
Список использованной литературы	160

Contents

Preface	7
Introduction	11
Section 1. Vertical steel capacities for granular materials	15
1.1. Modern capacity structures	17
1.1.1. Spheres of usage	17
1.1.2. Main types	18
1.2. Traditional ways for creation of capacity structures	28
1.2.1. Norm and handbook base	28
1.2.2. Existing designing conception	30
1.2.3. Remarks as for classification	33
1.3. Refusals and crashes of capacity structures	40
1.3.1. Mistakes connected with designing	42
1.3.2. Mistakes connected with manufacturing and assembling	50
1.3.3. Mistakes connected with exploitation	51
1.4. Author's conception of form-making for capacity structures	52
Section 2. Choosing of form and setting of inner sizes of capacity structure	57
2.1. Existing recommendations	59
2.2. Economicing of inner form	61
2.2.1. Efficacy of round shape in plan	61
2.2.2. Efficacy of low shape in height	65
2.3. Optimization model of geometrical sizes	70
2.3.1. Geometrical model	70
2.3.2. Mathematical model	72
2.4. Special cases of usage for obtained solution	79
2.4.1. Case of capacity structure with two parts.....	79
2.4.2. Case of capacity structure with three parts.....	90
2.4.3. Case of capacity structure with many parts in pairs	92
2.5. Spheres of usage of obtained solutions	93

Section 3. Choosing of constructive solution of capacity structure	95
3.1. Peculiarities of existing constructive solution	97
3.2. Suggested constructive solutions	105
3.3. Author's panel constructive scheme	106
Section 4. Theoretical researches of working of capacity structure	115
4.1. Existing analytical ways	117
4.2. Numerical researches	119
4.2.1. Working of single panel	119
4.2.2. Working of capacity structure	125
4.3. Remarks as for working of knot connections	132
4.4. Special theoretical tasks	133
4.4.1. Determination of degree of joint work for wall with rigid rib	133
4.4.2. Optimization of shape of rigid rib	139
4.4.3. Determination of the most stressed zone of construction	143
4.4.4. Determination of dynamic characteristics	147
Section 5. Practical usage of shape-making theory of capacity structure	151
5.1. Essence of shape-making theory	153
5.2. Essence of engineer method of shape-making	154
Conclusion	159
List of used literature	160

Предисловие

Вертикальные стальные емкостные конструкции для сыпучих материалов стали объектом научных исследований для автора настоящей монографии еще в его студенческие годы. Волею судьбы выбор пал именно на этот класс строительных конструкций во время сбора и наработки материала для будущей дипломной работы автора.

Специалисты одной из ведущих проектных организаций «Днепрпроектстальконструкция» обратились с предложением проанализировать работу крупнейшей по тем, да и по нынешним временам, бункерной емкости завода «Криворожсталь». Ее габаритные размеры в плане превышали 15 м, а общая высота составляла около 10 м, при этом толщина стенки конструкции была принята всего лишь 12 мм! Общий объем хранимого единоразового запаса сыпучего материала в сооружении превышал 2 500 т.

В то время лишь только набирало обороты использование компьютерной техники в проектной сфере и делались первоначальные шаги по применению одного из популярнейших в настоящее время численных методов строительной механики – метода конечных элементов. Программные комплексы были маломощны, несовершенны, а компьютеры часто давали сбои. Тем не менее, их применение позволяло проводить анализ конструкций целиком, а не как было принято ранее, по частям.

Именно тогда, сравнивая результаты «ручного» расчета, выполненного согласно изложенной в нормативных документах методике, с результатами «машинного» расчета по одной из компьютерных программ, автор с недоумением и удивлением для себя обнаруживал одно за другим различные несоответствия и нестыковки, подчас довольно значительные. Не коррелировали между собой уровни напряжений в элементах сооружения, величины прогибов и деформаций, а обычно считавшиеся растянутыми элементы «вдруг» теряли устойчивость на мониторе от сжимающих усилий.

Изучение огромного количества специальной и нормативной литературы, знакомство с аналогичными зарубежными источниками, постоянные консультации с инженерами-проектировщиками строительных конструкций и разработчиками специализированных программных комплексов, изучение накопленного опыта обслуживания и эксплуатации емкостных конструкций для сыпучих материалов, а также данных проводившихся натурных и модельных экспериментальных исследований – все это позволило автору во время его учебы в аспирантуре разобраться в паутине накопившихся у него сомнений и противоречий. Результатом такой работы стала подготовка ряда публикаций, монографии и успешная защита кандидатской диссертационной работы.

Однако, как подчас бывает в науке, накопленная информация позволила открыть новые горизонты для исследований, сформулировать и поставить новые проблемы и задачи. Возникающие вопросы имели уже качественно иной уровень. И среди них главенствующая роль принадлежала вопросу не **почему?**, а **как?** - как снизить влияние негативных внешних факторов эксплуатации?, как уменьшить количество аварий и отказов?, как продлить срок эксплуатации конструкции?, как сделать ее более ремонтпригодной?...

Именно разработке такого типа вопросов и была посвящена дальнейшая научная деятельность автора во время его жизни в качестве докторанта. Результатом работы явился целый комплекс предложений, подходов и идей, которые в совокупности составили основу разработанной теории формообразования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Многие аспекты этой теории нашли отражение в многочисленных публикациях автора, его докладах на конференциях и семинарах, полученных патентах на изобретения. Они приведены в конце списка использованной литературы. Наиболее важные моменты как, например, моделирование поведения сыпучей среды в замкнутом сосуде, представили определенную самостоятельную ценность и были опубликованы в виде самостоятельной монографии. В виде отдельного издания были подготовлены и специально разработанные практические рекомендации, позволяющие использовать авторские разработки в инженерной практике.

Основная часть предложенных автором теоретических аспектов формообразования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов нашла отражение в данной монографии.

В первом разделе работы приводится оценка современного состояния развития стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, как самостоятельного класса строительных конструкций, а также выполнен анализ и обобщение накопленного опыта по созданию и эксплуатации таких сооружений. Отдельно уделяется внимание имеющейся статистике аварий и отказов.

Второй раздел работы посвящен вопросам геометрического формообразования емкостных конструкций. В нем рассматриваются вопросы назначения внешних геометрических размеров таких сооружений.

Третий раздел работы посвящен вопросам конструктивного формообразования емкостных конструкций. В нем уделяется внимание вопросам совершенствования существующего конструктивного решения, рассматриваются и анализируются различные его разновидности.

В четвертом разделе приведено решение ряда частных теоретических задач, имеющих отношение к емкостным конструкциям. Ряд из них имеет самостоятельное прикладное значение.

Пятый раздел иллюстрирует возможность и последовательность практического применения основных теоретических результатов предыдущих разделов.

Заканчивая данную часть изложения, автор считает необходимым выразить свою бесконечную благодарность и глубочайшую признательность своему научному руководителю и консультанту, доктору технических наук, профессору, Заслуженному деятелю науки и техники Украины – **Казакевичу Михаилу Исааковичу**. Именно он сопровождал автора на всем его научном и творческом пути и именно под влиянием его мировоззрения выкристаллизовывались и приобретали жизнеспособный вид ряд представленных в данной работе идей и концепций.

*Наука начинается там,
где начинается математика*

Галилео Галилей

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 достаточно подробно исследовалась довольно 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 хотя бы приближенной, но стройной и законченной теории проектирования.

Вернее сказать, рекомендации по расчету и конструированию емкостей для сыпучих материалов, конечно, имеются и приводятся в изобилии в специальной и справочной литературе. Однако, это именно рекомендации, но никак не единый целостный подход, основанный на концептуальных научных исследованиях. Так из первого раздела 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 автором приводится в монографии выполненный им обзор и анализ возникающих в практике аварийных ситуаций, из которых vyplывает довольно неоптимистическое заключение – создаваемые емкостные конструкции не отличаются ни особой надежностью и долговечностью, ни экономичностью.

Разбираясь в причинах такой ситуации, автор пришел к заключению о необходимости модернизировать, а то и просто заново разработать ряд аспектов теории проектирования вертикальных жестких стальных емкостных конструкций. И выполнено это должно быть на сугубо научной основе, с использованием современных методов и средств их использования. Именно поэтому в качестве эпиграфа к настоящей монографии автором были выбраны слова известного итальянского мыслителя эпохи Возрождения в Европе Галилео Галилея, который одним из первых начал систематически применять научный эксперимент в виде математического, и в особенности, геометрического моделирования явлений приро-

ды. По мнению автора, приведенные в эпиграфе высказывание великого мыслителя наилучшим образом отражают основную идею, которой подчинена вся сущность представленной работы – идею о том, что решение проблемы проектирования стальных емкостных конструкций может быть найдено только лишь на сугубо научной основе, детальном и всестороннем изучении всех специфических особенностей сооружений этого типа, а не на слепом копировании и заимствовании методов проектирования из соседних областей теории строительных конструкций.

Придерживаясь такой точки изложения, автор рассмотрел в монографии довольно широкий круг явлений, сопровождающих процесс проектирования 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.

Поскольку сама затронутая в монографии тематика исключительна многолика и разнообразна, то в силу этого в некоторых местах работы автор касается лишь поверхности явлений, описывая их суть и не вдаваясь в детали. Это делалось сознательно, поскольку в рамках настоящей работы не оставалось ничего иного, как скользить по поверхности, ведь если нырнуть глубже, то можно было и не выплыть. В связи с этим автор заранее приносит свои извинения за некоторую неполноту и отрывистость изложения и полностью сознает, что представленная монография не свободна от недостатков.

Автор, также, отчетливо понимает, что в целом монография представляет, в сущности, точку зрения автора и авторское видение затрагиваемых вопросов, носящих, по всей видимости, дискуссионный характер. Поэтому, если где-либо в тексте прозвучали догматически императивные ноты, то это произошло вопреки намерению автора и должно трактоваться как недоработка.

Тем не менее, изложенный в настоящей монографии материал является в некоторой степени уникальным, поскольку впервые сделана попытка в отечественной науке более-менее полностью и обобщенно затронуть все основные аспекты вопроса проектирования рассматриваемого класса строительных конструкций – вертикальных жестких стальных емкостей для сыпучих материалов.

Часть из представленных в работе результатов, в сущности, являются самостоятельными разработками и могут быть использованы независимо в иных сферах или при проектировании других типов строительных конструкций.

Раздел 1

Вертикальные стальные емкости для сыпучих материалов

Изложению современных концепций, связанных с проектированием и созданием вертикальных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, предшествуют приведенные в настоящей главе сведения общего характера. Они касаются вопросов классификации сооружений рассматриваемого типа, существующих нормативно-правовых документов, регламентирующих процесс их создания, а также обзор и систематизацию имеющейся информации об авариях и отказах емкостных конструкций.

На основе анализа приведенных таким образом сведений очерчивается круг проблем, решение которых позволило бы повысить надежность и долговечность стальных емкостных конструкций, а также улучшить их эксплуатационные характеристики.

Section 1

Vertical steel capacities for granular materials

In this section information of general character about vertical steel capacities for granular materials are given. It precedes to the row of modern conceptions connected with designing and creating of that constructions. The questions of classification of that type structures, the questions of existing norm documents regulated these processes and the review with the systematization of existing data about crashes and refusals of capacity structures are presented here.

On the base of analysis of the given aspects the row of problems are pointed. Their solving would be able to increase of reliability and durability of the steel capacity structures, and also to improve their exploitation characteristics.

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 накрома 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 самотечную выгрузку хранящихся 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 разномом 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 – 12], заводы строительной индустрии [13] и химические предприятия [14, 15], энергетическая отрасль [16] и сельское

хозяйство [17, 18]. Количество используемых сыпучих материалов при этом достигает нескольких сот.

Несомненно, что транспортировка с одного региона в другой таких объемов сыпучих грузов привело к необходимости разработки и использования специальных передвижных емкостей. Чаще их располагают на железнодорожных платформах, получая при этом вагоны специального назначения, такие как вагоны-бункера, хоперы и думпкары [19 - 22]. Однако нередко для этого используют и морской транспорт [23, 24].

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 [25] или низких температурах [26].

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 [27].

Железобетонные емкости активно создавались и исследовались в середине прошлого столетия [28 - 30], когда очень остро стоял вопрос относительно снижения расхода стали, ведь они требуют в 2 - 4 раза ее меньшее количество [31, 32].

Стальные емкости приобрели приблизительно такое же распространение, как и железобетонные и в настоящее время благодаря своей простоте изготовления и монтажа, даже, превышают последние по объемам использования [33].

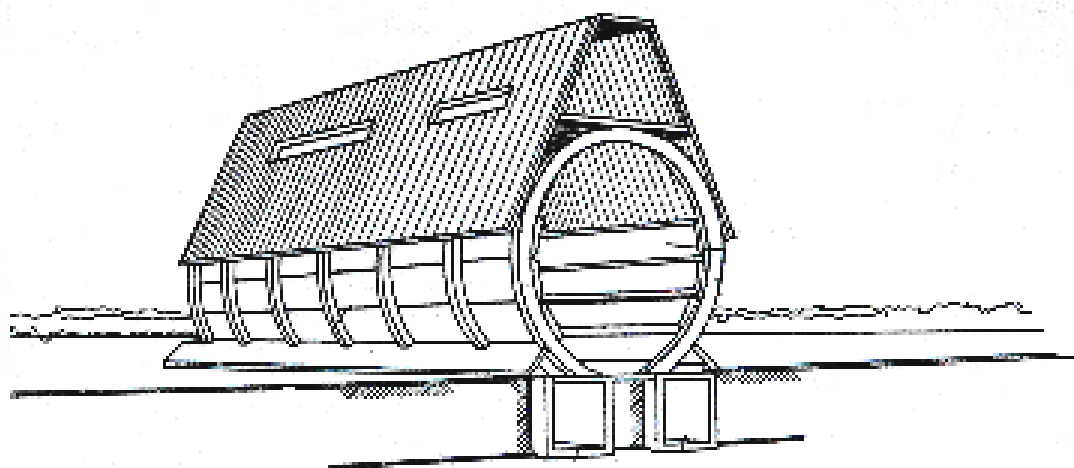
В целом все емкостные строительные конструкции для сыпучих материалов по своему пространственному положению могут быть разделены на два вида – горизонтальные и вертикальные. В первом случае конструкции имеют внешнюю форму, вытянутую по горизонтали, во втором случае – по вертикали.

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.

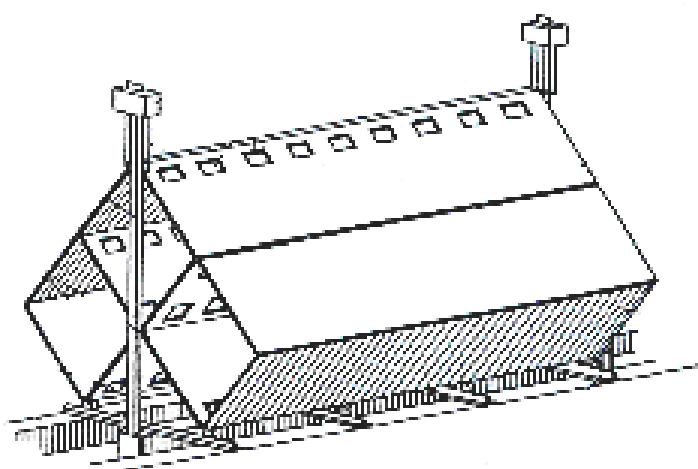
Внешний вид современных жестких горизонтальных емкостных конструкций для сыпучих материалов приведен на рис. 1.1. Они представляют собой загрузочно-разгрузочную галерею в виде открытой по бокам оболочки. Галерея может выполняться сквозного поперечного сечения (рис. 1.2, а) или иметь дополнительные продольные перегородки, разделяющие ее на отдельные сообщающиеся камеры (рис. 1.2, 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.



а)



б)

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

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.

Такие емкости получили гораздо большее распространение 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.

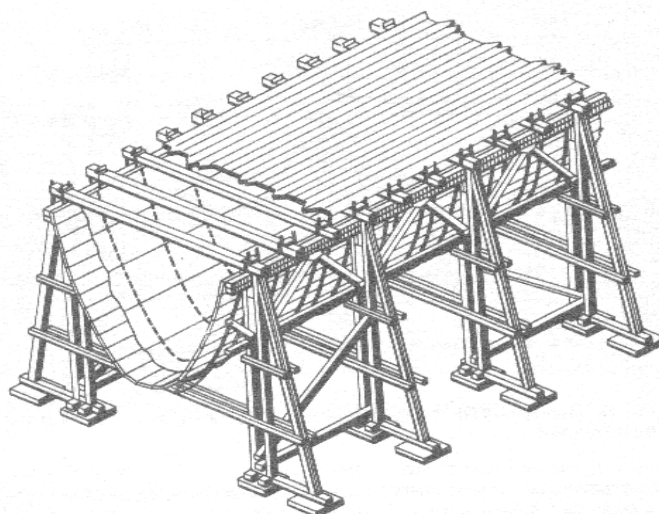
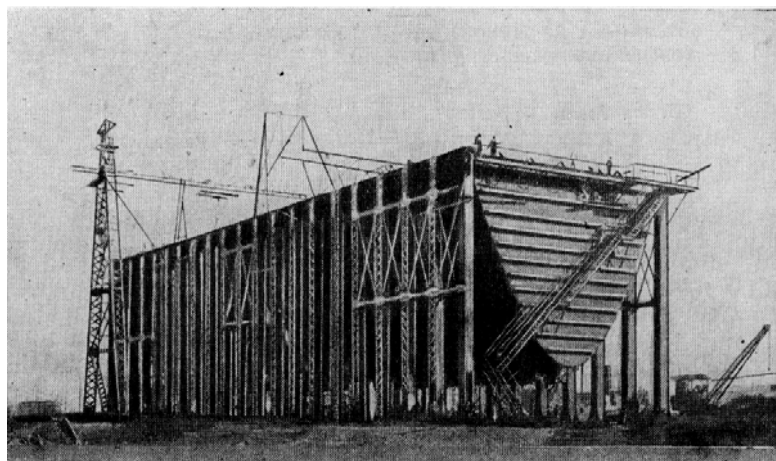


Рис. 1.2. Гибкие горизонтальные емкостные конструкции для сыпучих материалов

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^3) они оказываются достаточно эффективными.

Теоретическому исследованию работы гибких стальных емкостных конструкций, которые являются более распространенными в практике эксплуатации, посвящены ряд работ известных ученых [34 – 36]. К сожалению, какие-либо теоретические работы, посвященные жестким стальным емкостным конструкциям для сыпучих материалов автору настоящей монографии не известны.

При необходимости в хранении сравнительно небольших объемов сыпучих материалов (примерно до 1000 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.

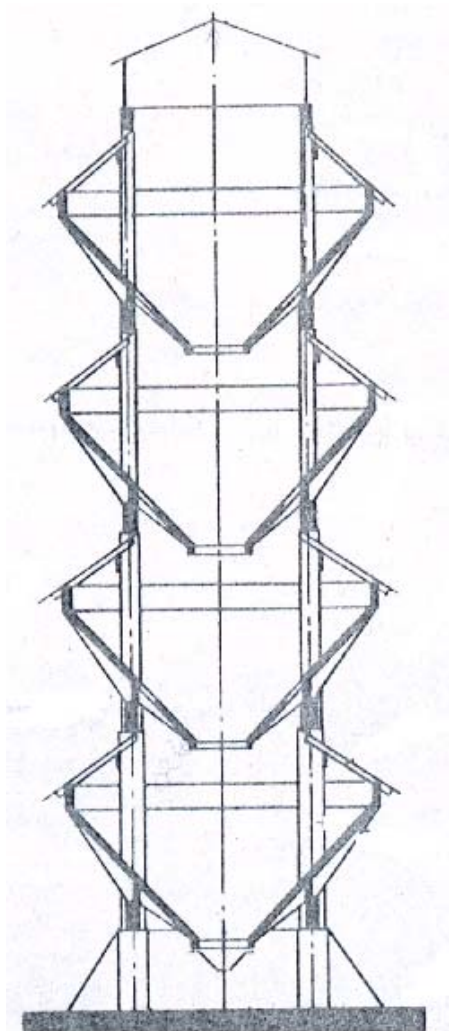


Рис. 1.3. Вертикальная многоступенчатая емкостная конструкция для сыпучих материалов

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.

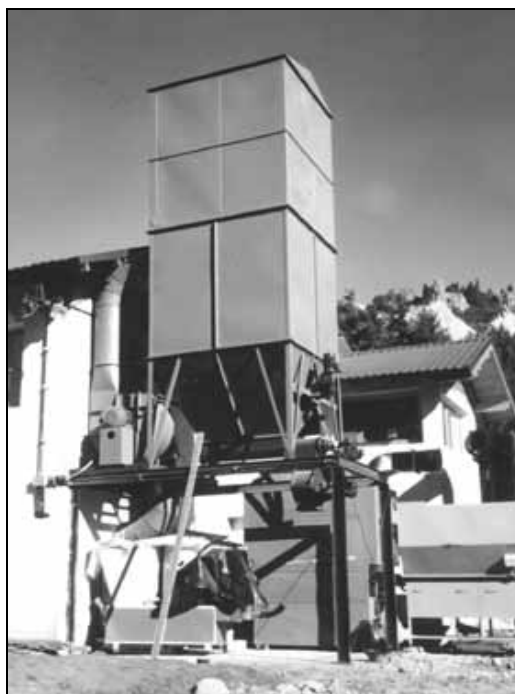
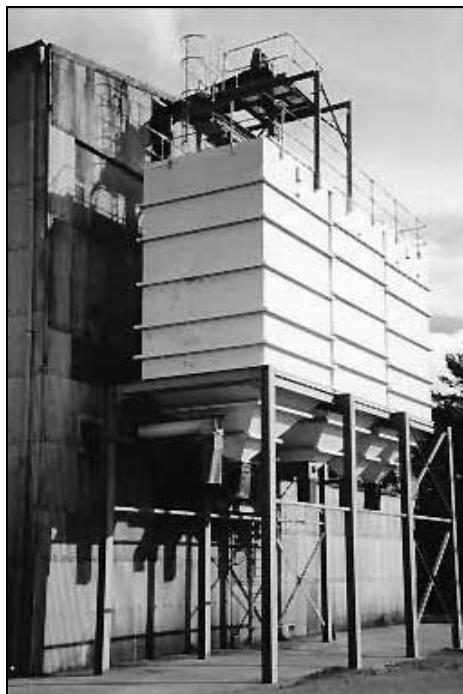
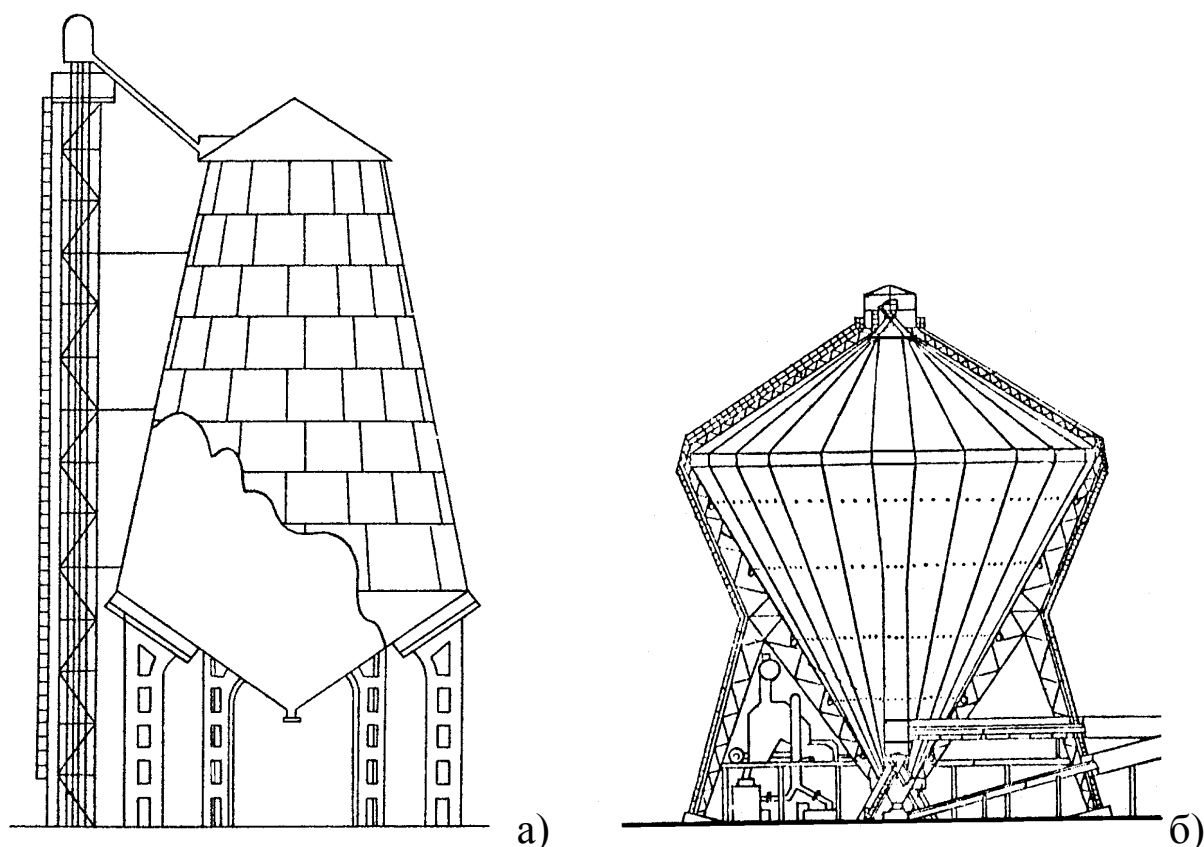


Рис. 1.5. Пирамидально-призматические вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов

Не часто, но 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. 1.6. Вертикальные
емкостные конструкции для сыпучих материалов:**
а) «конусно-конусного» типа,
б) «пирамидально-пирамидального» типа

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 и 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.

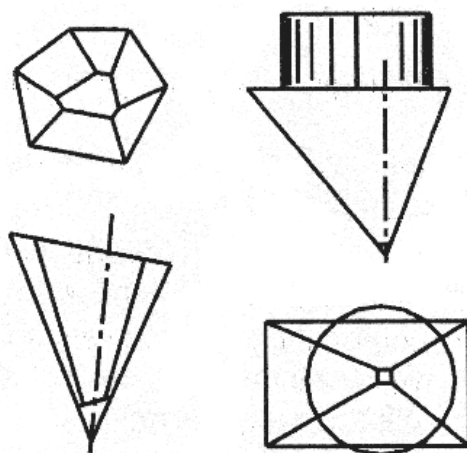


Рис. 1.7. Несимметричные вертикальные емкостные конструкции для сыпучих материалов

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

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 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 м³.

Таким образом, из приведенных данных становится понятным, что современные емкостные конструкции для сыпучих материалов отличаются чрезвычайно высокому разнообразию как во внешних формах, так и в геометрических размерах. Тем не менее, их принципиальное конструктивное 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 геометри-

ческой формы они ни были, предназначены, собственно, для формирования того емкостного запаса сыпучего материала, который хранится в сооружении.

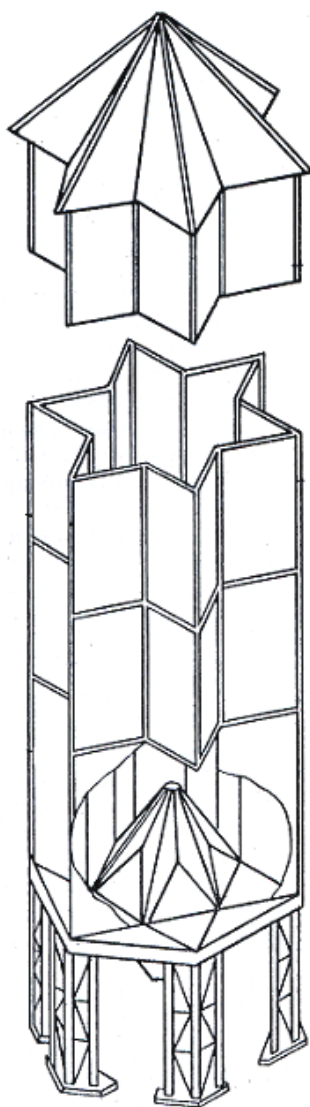


Рис. 1.8. «Звездчатая» вертикальная емкостная конструкция для сыпучих материалов

Заканчивая обзор современных разновидностей строительных емкостных конструкций для сыпучих материалов, автору хотелось бы отметить, что подобные сооружения, располагаемые на подвижных машинах, позволяют получить машиностроительные емкостные конструкции. Так, например, на железнодорожном транспорте для перевозки различных сыпучих грузов широко применяются специализированные вагоны (рис. 1.9).



**Рис. 1.9. Железнодорожные вагоны
для сыпучих материалов**

В отличие от строительных конструкций они не отличаются таким разнообразием во внешней геометрической форме и размерах, поскольку жестко ограничены существующими нормативными габаритами подвижного состава.

1.2. Традиционные подходы к созданию емкостных конструкций

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

Основным действующим в Украине на теперешний момент нормативным документом, который регламентирует в том числе и вопросы проектирования стальных емкостных строительных конструкций является СНиП II-23-81* [37]. Раздел 8 “Расчет листовых конструкций” этого документа содержит общие рекомендации касательно оценки прочности и устойчивости оболочек вращения, являющихся фрагментами различных видов листовых конструк-

ций. Однако, приводятся лишь критериальные условия относительно уровня допустимых напряжений в таких оболочках, а вопросы их определения остаются вне поля зрения. Имеющиеся рекомендации относительно конструирования стальных емкостных конструкций приведены в разделе 13 “Дополнительные требования по проектированию производственных зданий и сооружений” и в целом, также, носят общий характер.

Указанные два раздела без принципиальных изменений вошли в состав проекта новых государственных норм Украины по проектированию стальных строительных конструкций - ДБН В.2.6-...:200... [38], 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 [17], который заменил в Украине прежние нормы - СНиП 2.10.05-85 [39]. 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 [40] 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* [41], посвященный преимущественно проектированию зданий, а не сооружений для хранения сыпучих материалов. 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 закрепленным 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, автор считает необходимым отметить следующие источники.

Методика и особенности проектирования стальных емкостных конструкций достаточно детально и подробно изложена в довольно распространенных конструкторских справочниках [42 - 46]. Для бункерных емкостей в концентрированном виде она приведена в рекомендациях [47, 48]. Они не имеют статуса нормативных документов, однако являются достаточно удобными в применении и используются инженерами-проектировщиками. На основе этих материалов разработаны разнообразные внутриотраслевые стандарты, как например, [49], и соответствующие разделы учебной литературы для вузов [50 - 52].

1.2.2. Существующая концепция проектирования

В целом отечественная концепция проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов в своем окончательном виде сформировалась примерно к 60-70-м годам прошлого столетия. Идеологически она сориентирована на 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 ма-

30

териала). 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, учитывают приложением специальных дополнительных локального и полосового давлений. Интересно, что место их приложения нормативными 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 емкостных конструкций для сыпучих материалов при всем разнообразии их внешних форм и геометрических размеров, приведенном в подразделе 1.1 настоящей монографии, является достаточно типичным. Каждая из 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, швелерного, двутаврового сечений), а при значительных размерах – из сварных профилей того же типа. Ребра располагают горизонтально или вертикально, нормально к поверх-

ности обшивки или под углом к ней. Как правило, это зависит от традиций и опыта той или другой школы проектирования. Все сооружение опирается на колонны, расположенные по ее периметру, или подвешивается с помощью специальных балок к элементам, формирующим перекрытие над емкостью.

Расчет сооружения, как уже отмечалось, выполняется поэлементно. В качестве таких самостоятельных конструктивных элементов принимают ребро жесткости и междуреберный участок обшивки. Ребро рассчитывают как балку, шарнирно опертую по концам, включая в состав ее сечения некоторую часть обшивки, которую рекомендуется принимать равной тридцати ее толщинам. Обшивку рассчитывают как шарнирно опертую по краям пластину с учетом геометрической нелинейности ее работы.

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 [47]. 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 имеющейся справочной литературе.

Примеры практического выполнения расчета и конструирования емкостных сооружений можно найти во многих изданиях, как например, [47, 53, 54].

Отметим, также, что по не совсем понятным для автора настоящей монографии причинам в ряде изданий учебного характера отсутствуют специализированные разделы, посвященные проектированию стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. К их числу принадлежат учебники [55 – 57], а, например, в 3-м издании учебника [58] раздел «Бункеры и силосы», имеющийся в предыдущих изданиях, был исключен. Возможно, что такая ситуация была связана с высокой степенью повторяемости излагаемого материала в различных изданиях и отсутствием принципиально новых разработок и рекомендаций.

1.2.3. Замечания о классификации

Емкостные конструкции являются одним из видов строительных конструкций и, соответственно, могут быть классифицированы как составная часть этой огромной совокупности объектов жизнедеятельности человека. К сожалению, в настоящее время не существует единого систематического подхода к описанию свойств современных строительных конструкций. Видимо, сказывается, чрезвычайно большое количество значимых и важных для человека аспектов, присущих строительным конструкциям. К ним относятся и качества безопасности, функциональности, особенностей внутреннего конструктивного решения и внешнего вида конструкций, а также качества экономичности их создания и последующей эксплуатации. Причем каждое из них может оказаться определяющим и, в свою очередь, повлиять на наличие и проявление иных качеств у строительной конструкции. Поэтому выбрать единственный определяющий классификационный признак оказывается достаточно сложно.

Тем не менее, по отношению к ряду типов строительных конструкций создаются и с успехом применяются различные частные классификации, помогающие в той или иной степени разобраться в их разновидностях. Что же касается единой глобальной классификации всех существующих строительных конструкций, то автор данной монографии таковой не встречал ни в нормативных документах, ни в справочной и специальной литературе. Видимо, разработка ее еще ждет своего создателя.

В отношении емкостных строительных конструкций одной из наиболее привлекательных, по мнению автора настоящей монографии, является классификация, приведенная в работе [59]. 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 автора 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 [28 - 32]. Причем достаточно сложно утверждать, чтобы какой-либо из этих материалов существенно доминировал [47]. 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 [39] 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 [39] 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 изме-

ряется 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 [47] эта ошибка, по всей видимости, исправлена и количественная граница между бункером и силосом установлена равной $1,5 \cdot \sqrt{A}$.

Ситуация становится еще более непрозрачной при обращении к уже упоминавшейся ранее работе [59]. На с. 191 указано: «К бункерам относятся емкости, наименьший размер которых в плане превосходит высоту h_1 ; при этом плоскость обрушения, проведенная через пересечение вертикальной стенки и воронки, пересекается с поверхностью сыпучего материала при предельном наполнении внутри сосуда (рис. 7.1)¹». Далее приводится иллюстрирующий рисунок 7.1, суть которого приводится ниже на рис. 1.10.

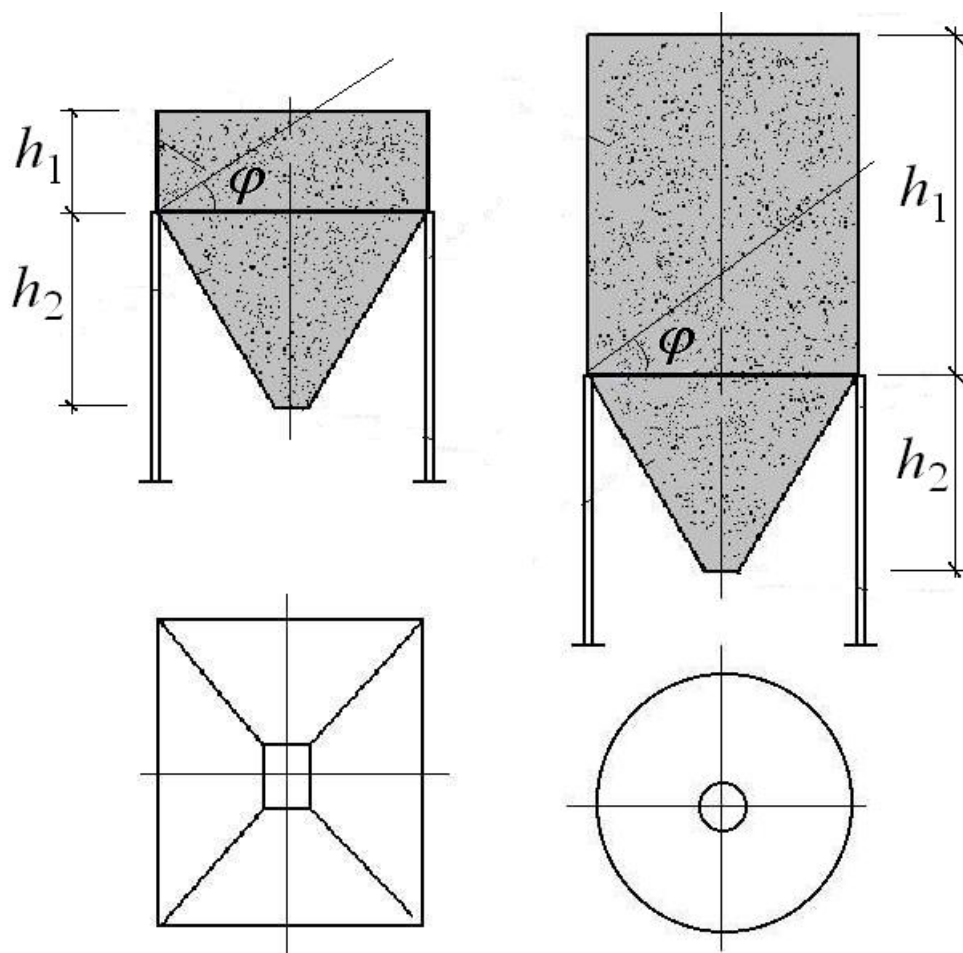


Рис. 1.10. Различие между бункером и силосом

¹ В данной фразе, по мнению автора, имеется опечатка. Видимо следует читать не «... в плане превосходит...», а «...в плане не превосходит...». В противном случае последующий контекст входит в полное противоречие с приводимым утверждением.

Ниже, на с. 192 этой же работы конкретизируется величина высоты h_l : «Силосы – это относительно высокие и узкие сосуды, у которых высота h_l превосходит в 1,5 раза и более наименьший размер в плане. Плоскость обрушения, проведенная через пересечение вертикальной стенки и воронки силоса, пересекается с предельным верхним горизонтом засыпки вне пределов сосуда (рис. 7.1)». При этом взаимосвязь между этими двумя указаниями остается совершенно непонятной, поскольку из первого математически никак не следует второе. А следующая фраза вносит окончательную путаницу: «Для силосов диаметром 18 м и более отношение высоты к наименьшему размеру в плане может быть и меньше 1,5».

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.

Ряд справочных изданий, в т.ч. и современных, как например указанные в предыдущем пункте работы [42, 43] никакой количественной границы между бункером и силосом вообще не приводит. Так же отсутствует подобная количественная характеристика и в широко популярной до сих пор учебной литературе (см., например, [50, 51]).

При этом все источники оказываются единодушны в том, что бункера и силосы рассчитываются 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 - проф. Х. Ягофаров в своей монографии [60]. Однако, никаких практических выводов и рекомендаций, к сожалению, предложено не было.

С целью отыскания хоть какого-либо прояснения ситуации автор настоящей монографии обратился к словарям. Согласно ставшему уже классическим словарю С. И. Ожегова [61] 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 [62] 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 [63] приводит следующие определения:

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

«Силос. 1. Соковитий корм для худоби, що його отримують заквашуванням 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.

Довольно интересная мысль приводится в работе [64]. 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 1,5 (но не 2!), приводимому, как указывалось выше, во всей 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 проектирования. Сама же задача ее совершенствования является достаточно актуальной, поскольку в принципиальном отношении описанная выше ситуация сохраняется уже практически свыше 100 лет.

Проблемой изучения емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов автор настоящей монографии занимается уже более 10 лет. За это время им были рассмотрены и проанализированы самые различные аспекты, имеющие отношение к проектированию, созданию и эксплуатации таких сооружений. Среди них и вопросы теоретического описания их работы, и особенностей компьютерного моделирования, и вопросы взаимодействия сыпучей среды с элементами конструкции, и экспериментальные исследования.

По мере накопления опытных данных и результатов различных видов исследований, у автора начала постепенно выкристаллизовываться идея, которая легла в основу ряда его 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 автора 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, автору 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 кон-

струкций. 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. 1.11.

ЕМКОСТНЫЕ КОНСТРУКЦИИ



Рис. 1.11. Общая авторская классификационная схема емкостных конструкций

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 автора 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.

Автор полностью осознает неоднозначность и сложность затронутого вопроса. Вполне возможно его неприятие в среде инженеров-проектировщиков, к которым автор относится с глубочайшим уважением и почтением. Однако, вместе с тем автор – человек, привыкший опираться на факты и делать научные логические заключения. И поэтому считает, что предлагаемый подход все-таки имеет право на существование и может оказаться полезен во многих практических ситуациях.

Именно с единых позиций, отраженных в предлагаемой классификационной схеме, автором выполнены все исследования, приведенные в дальнейших разделах настоящей монографии.

1.3. Отказы и аварии емкостных конструкций

Прежде, чем начать освещение вопроса, посвященного аварийности стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, автор хотел 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 размеров¹ 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 технологиче-

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

ского 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 автору стоило немалых трудов собрать необходимые сведения, позволившие обобщить и проанализировать современное положение вещей в данной сфере. В своей работе он старался 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 [65 – 72]. 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 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,¹ что вносит определенную долю условности во всякую классификацию.

С точки зрения исследователей, к которым автор настоящей монографии осмеливается 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.

Автору известны более двух десятков различных теоретических моделей, описывающих взаимодействие сыпучего материала с элементами емкостной конструкции [64, 73 – 85]. При этом результаты, полученные по ним, отличаются как качественно различным распределением давлений, так и количественными значениями их максимальных значений, 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 различных источников для одних и тех же материалов они

¹ Так, широко известен случай крушения в 1905г. Египетского моста в Петербурге, когда по нему строем проходили войска. Непосредственной причиной аварии (или поводом) в этом случае явился резонанс, возникший от того, что войска шли несбитым шагом. Основной же причиной аварии являются просчеты, допущенные при проектировании моста.

также различны (отличие в удельном весе, например, может доходить 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 [69] 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 железнодорожный вагон (рис. 1.12).

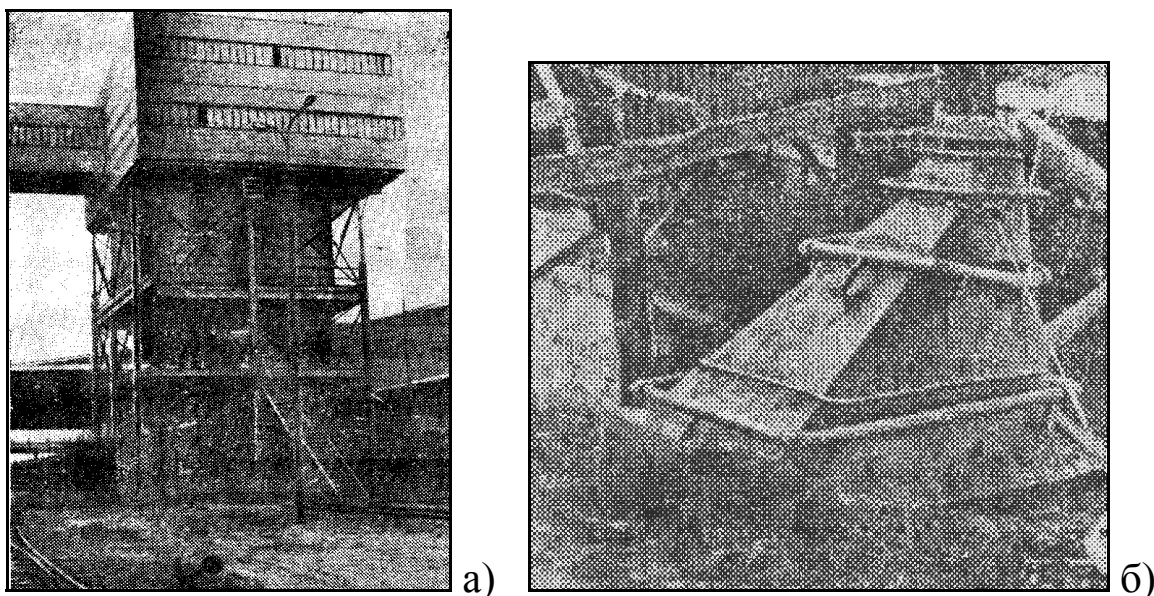


Рис. 1.12. Вид бункера для хранения цемента до обрушения (а) и после обрушения (б)

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 аэрации¹, а в качестве непосредственной причины аварии указывается на внезапное обрушение зависшей массы цемента внутри бункера.

¹ Цемент при хранении обладает свойством слеживаться, что серьезно затрудняет его выгрузку. Поэтому, применяют один из вариантов системы Проха, заключающейся в организации в нижней части сосуда системы мелких отверстий, через которые под давлением нагнетается воздух, разрыхляющий массу цемента.

Точно такие же причины привели в 1951 г. к аварии сварного цементного силоса на Магнитогорском цементном заводе, описанной в работе [70]. 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 м³ 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. [71]. 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 [86 – 89]:

- воздействие технологических температурных нагрузок от загрузения 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 одного-единственного 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 друг с другом, быстро приходящая в негодность и потому требующая замены (см., также, рис. 1.17, в).

Как обращалось внимание ранее, 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 качестве оправдания автору настоящей монографии доводилось слышать примерно следующее, дескать, зачем уточнять методику, если сперва следует уточнять нагрузки; ну а раз с нагрузками неопределенность, то пусть методика ее и перекроет. А если не перекроет?! Ведь, Природа не всегда прощает подобную трактовку ситуации, результатом чего и являются констатируемые случаи аварий.

В подтверждение этих слов автору совсем недавно представился в распоряжение просто уникальный случай. В одной из организаций, связанных с транспортировкой зерна, были закуплены за рубежом силосные емкости диаметром около 30 м и высотой до 40 м, выполненные по стандартному проекту (рис. 1.13). 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 невооруженным глазом (рис. 1.14).

Было решено выполнить усиление воронок путем приварки системы удерживающих стальных тяжей из прокатных профилей, которые также были рассчитаны в соответствии с принятыми в настоящее время представлениями о работе бункерных разгрузочных устройств под нагрузкой. Однако и они через некоторое время оказались погнутыми и требовали дополнительного ремонта и усиления (рис. 1.15).

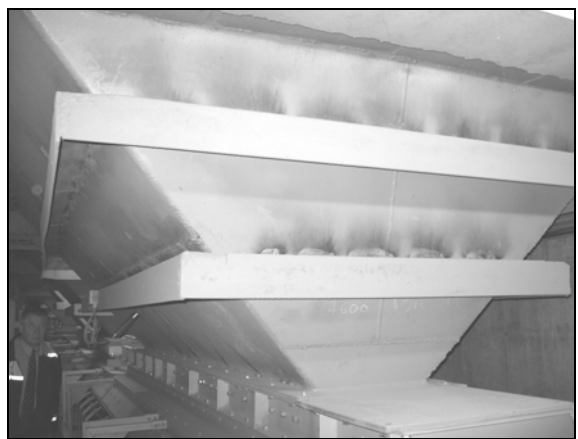
Интересно отметить, также, что в процессе проектирования нагрузки от сыпучего материала определялись как для бункерной емкости, принимая во внимания упоминавшийся выше критерий $1,5 \cdot \sqrt{A}$, но по документации конструкция называлась силосом.



Рис. 1.13. Внешний вид вертикальной части силосов

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 [71] в октябре 1973 г. в одном из совхозов произошло обрушение стального бункера-накопителя, входящего в состав зерноочистительного комбината и эксплуатировавшегося до этого всего 12 дней (рис. 1.16). Размер

бункера $8 \times 12 \times 7$ 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.



а)



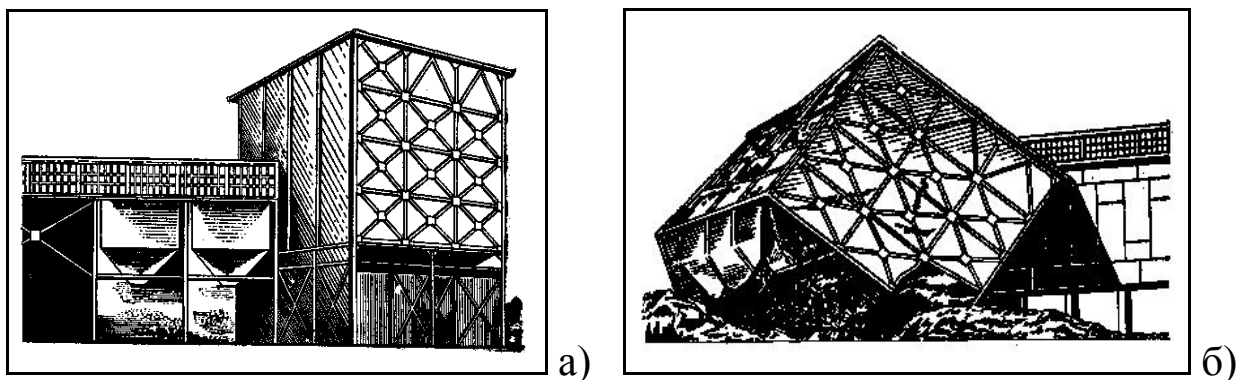
б)

Рис. 1.14. Погнутости несущих элементов разгрузочной воронки емкостной конструкции:

а) выгибы ребер жесткости, б) выгиб стенки



Рис. 1.15. Погнутости усиливающих стальных тяжей разгрузочной воронки емкостной конструкции



**Рис. 1.16. Бункер-накопитель
до обрушения (а) и после обрушения (б)**

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 допущенного просчета.

Другим интересным примером на данную тему является бункерная эстакада доменного цеха одного из металлургических комбинатов. 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: $15 \times 18 \times 9$ м, масса около 100т, объем свыше 1000 м^3 . В числе отмеченных дефектов, на которых мы подробнее остановимся ниже, фигурировали и разрывы узлов стыковки элементов сед-

ловидной рамы друг с другом и с элементами эстакады, в результате чего рама полностью выключилась из работы в качестве несущего элемента. 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, выявленных 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 депланации полок, вырезы и отверстия в полках и стенках; выполнение ряда узлов не по проекту (рис. 1.17).

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 [70]).

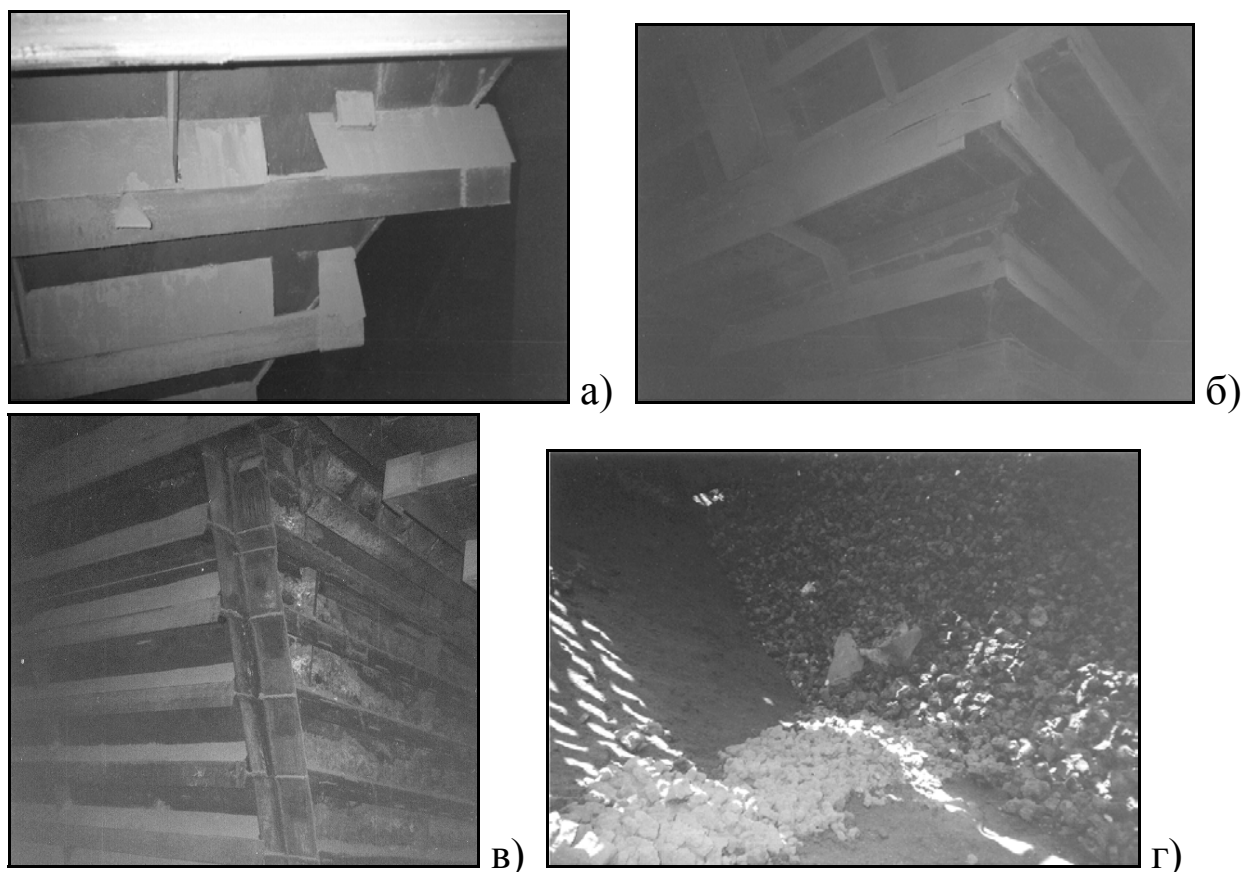


Рис. 1.17. Дефекты конструкции бункеров:

- 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

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 сразу же начинается интенсивная коррозия стальных листов стенок бункеров, отрицательно сказывающаяся на прочностных свойствах конструкции. Так, по данным работы [90] коррозионный износ достигает величины 17,3 % толщины стенки конструкции за 50 лет эксплуатации в условиях промышленного предприятия Польши. Согласно другим источникам [91 – 93] коррозионный износ может доходить до 25 – 30 %, что, безусловно, крайне негативно сказывается на работе конструкций.

1.5. Авторская концепция формообразования емкостных конструкций

Анализ далеко неполной доступной статистики отказов и аварий стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, приведенный в предыдущем подразделе данной монографии, к огромному сожалению, приводит к необходимости признать несовершенство существующих подходов к проектированию и созданию сооружений такого класса. Подобную точку зрения разделяют и многие инженеры-проектировщики, имеющие немалый опыт создания и обслуживания емкостных конструкций, а также ряд исследователей. Именно поэтому продолжают изучаться теоретические вопросы, связанные с выяснением особенностей действительной работы емкостей для сыпучих материалов, проводятся численные и натурные экспериментальные исследования, разрабатываются более совершенные конструктивные схемы.

Автору настоящей монографии представляется необходимым подойти к решению данной проблемы – проблемы создания надежных и долговечных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов – с системных позиций. При этом следует пытаться решить не отдельные самостоятельные задачи, связанные с локальным улучшением каких-либо параметров или режимов работы емкостей, а разработать единый целостный фундаментальный подход к их проектированию. Такой подход должен основываться на сугубо научной основе и иметь под собой твердое теоретическое обоснование. Именно это, по мнению автора, сможет разрешить не только ряд существующих проблемных задач, но и предупредить возникновение новых возможных сложностей в дальнейшем.

Такой подход автору представляется возможным назвать **теорией формообразования** стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. Именно теорией, поскольку речь пойдет о теоретическом его обосновании, и именно формообразования, поскольку все предлагаемые усовершенствования и улучшения так или иначе должны найти отражение в самой емкостной конструкции то ли в виде ее геометрии, то ли в виде конструктивного решения, то ли в виде назначаемых сечений ее составных элементов.

Анализируя современное состояние и уровень разработки вопроса проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов автору представляется возможным выделить пять основных теоретических направлений, работа в которых позволит сформировать основные теоретические принципы формообразования таких сооружений.

Как и при проектировании любой строительной конструкции, проектирование жестких стальных емкостей для сыпучих материалов начинается с выбора ее формы и назначения основных геометрических размеров. Именно с этим связано **первое направление**.

Как было показано в подразделе 1.1 настоящей монографии современные емкостные конструкции отличаются чрезвычайным разнообразием как своей внешней формы, так 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, автору не известны.

Кроме этого, отдельного обсуждения требует вопрос о том, что считать рациональной формой конструкции, т. е. о выборе критерия для ее отыскания. И тут во внимание могут приниматься самые разнообразные соображения, начиная с оценки экономичности использования занимаемой сооружением площади (или высоты) и заканчивая оценкой технологической сложности его изготовления.

Следующим этапом при проектировании строительных конструкций является сбор нагрузок. При расчете многих типов конструкций он не представляет серьезных затруднений, поскольку достаточно подробно и полно исследован специалистами и зафиксирован в соответствующих нормативных документах. Однако по отношению к емкостным конструкциям для сыпучих материалов, основной технологической нагрузкой для которых является вес загруженного сыпучего материала, определение величины и характера нагрузок является **вторым проблемным направлением**.

Его разрешение упирается в известную неопределенность задачи нахождения распределения давления сыпучего материала на стенку в замкнутом сосуде переменного объема. Свою долю неоп-

ределенности 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.

Третье направление разработки современной концепции проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов связано с необходимостью совершенствования 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.

Так например, все элементы конструкции стальных емкостей соединяются между собой сваркой, что приводит к исключительно большой общей протяженности сварных швов. Кроме этого, ребра жесткости создают дополнительные поверхности, способствующие развитию очагов интенсивной коррозии в условиях действующего промышленного предприятия, особенно при работе с сыпучими материалами, способными выделять сернистые соединения. Еще одним недостатком существующего конструктивного решения такого типа емкостей является их невысокая ремонтпригодность, связанная с необходимостью в случае проведения обследований либо ремонтных работ проводить работы и по откреплению и обратному прикреплению элементов футеровки. Исключительно неудобной является также при значительных габаритах конструкции необходимость выполнения довольно точной состыковки ее отдельных частей и элементов друг с другом.

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, необходимые 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 отдельном разделе одного из вышеперечисленных проблемных направлений с описанием и анализом существующих и разрабатываемых подходов к его решению. Приводятся, также, ожидаемые результаты, позволяющие выполнить некоторый сопоставительный анализ эффективности каждого из подходов.

Отметим, что в процессе исследований второе выделенное направление, посвященное изучению особенностей поведения сыпучей среды в замкнутом сосуде, оказалось настолько обширным и обстоятельным, что фактически составило отдельное самостоятельное научное направление. Его разработка потребовала не только построения анализа теоретических моделей, но и проведения комплексных фундаментальных исследований. В связи с этим автор посчитал целесообразным не включать этот материал в настоящую монографию, а представить его в виде самостоятельной работы [94], подкрепленной циклом публикаций [95 - 108].

Что касается пятого проблемного направления, связанного с изучением особенностей реальной эксплуатации емкостных конструкций, то к сожалению, автор практически не имеет 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. Поэтому в заключительном пятом разделе настоящей монографии затронуты лишь вопросы практического применения изложенных в предыдущих разделах работы результатов.

Раздел 2

Выбор формы и назначение габаритных размеров емкостной конструкции

Одной из часто встречающихся задач на начальном этапе проектирования любой строительной конструкции является задача выбора и назначения ее геометрической формы и основных размеров. Данный этап во многих случаях выполняют на основе накопленного опыта создания и эксплуатации аналогичных конструкций, нередко с использованием при этом различных эмпирических зависимостей для соотношений размеров отдельных элементов.

В данном разделе изложены соображения, позволяющие в значительной степени формализовать данный вопрос как в общем случае, так и на примерах ряда частных решений для наиболее распространенных в проектной практике видов емкостных конструкций для сыпучих материалов. Приведенные решения являются элементами геометрического формообразования емкостных конструкций.

Section 2

Choosing of form and setting of inner sizes of capacity structure

One of the often meetings tasks on the initial stage of designing of any building construction is a task of choice and setting of its geometrical form and basic sizes. This stage in many cases is made on the basis of the accumulated experience by creations and exploitations of similar constructions, quite often with the usage here of different empirical dependences for correlations of sizes of single elements.

Considering, allowing largely to formalize this question both in general case and on the examples of row of special solutions for the most widespread in project practice types of capacity structures for granular materials is presented in this section. The given solutions are the elements of geometrical shape-making of the capacity structures.

2.1. 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 [109, 110] 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 [45] по отношению к железобетонным емкостным конструкциям приводится прямо противоположная рекомендация относительно необходимости увеличения высоты вертикальной части емкости, при этом как подтверждается в работе [31], 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 [59, 111, 112]. Так, например, в работе [59, 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 гиперболоида вращения [113, 114], однолепесткового гиперболического параболоида [115] или треугольных плит, развернутых вершиной внутрь емкостного сооружения [116].

В конце XX ст. вопросы теоретической оптимизации внешней формы емкостных начал освещаться в работах известного в России исследователя по теории бункерных конструкций Х. Ягофарова [60, 117] и его сына А. Х. Ягофарова [118]. 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 автора 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.

2.2. Экономичность внешней формы

Если попытаться проанализировать приведенные в предыдущем 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 автор не считал бы необходимым излагать в данной монографии, если бы не его стремление к практически важной количественной оценке эффективности различных геометрических форм. Проведем для этого несложные математические преобразования.

2.2.1. 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. 2.1 для определенности приведен восьмиугольник с радиусом вписанной окружности R .

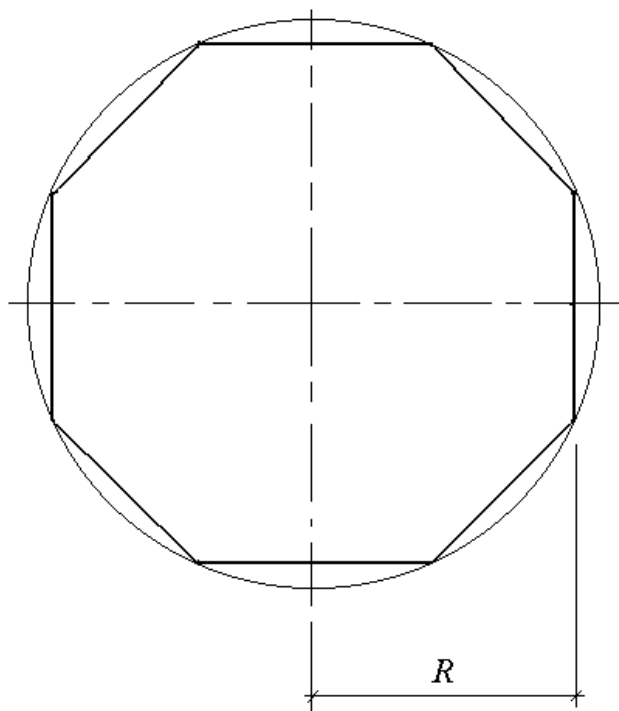


Рис. 2.1. Правильный восьмиугольник

Площадь A и периметр P правильного многоугольника определяются выражениями (2.1) и (2.2), соответственно:

$$A = n \cdot R^2 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (2.1)$$

$$P = 2 \cdot n \cdot R \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.2)$$

Считая площадь константой при изменении количества сторон многоугольника, выразим из выражения (2.1) радиус R и подставим в выражение (2.2). После преобразований получим функциональную зависимость $P(n)$ в виде выражения (2.3):

$$P(n) = 2 \cdot \sqrt{A \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi / n)} . \quad (2.3)$$

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_∞ . Оно представится соотношением (2.4):

$$\frac{P_n}{P_\infty} = \sqrt{\frac{n \cdot \operatorname{tg}(\pi / n)}{\pi}} . \quad (2.4)$$

Далее несложно для различных значений n из натурального ряда (кроме $n = 2$ для физически не существующего «двухугольника») рассчитать полученное соотношение. Результаты приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

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

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

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 объему 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 (2.5) и (2.6), соответственно:

$$A_k = k \cdot b^2, \quad (2.5)$$

$$P_k = 2 \cdot (k + 1) \cdot b. \quad (2.6)$$

Выражая, как и ранее, из (2.5) значение стороны b и подставляя в (2.6), после преобразований получим зависимость (2.7):

$$P_k(k) = 2 \cdot \sqrt{A} \cdot \frac{1+k}{\sqrt{k}}. \quad (2.7)$$

Далее, найдем отношение периметра прямоугольника с произвольным соотношением сторон $k \geq 1$ P_k к периметру квадрата P_4 . Оно представится соотношением (2.8):

$$\frac{P_k}{P_4} = \frac{1+k}{2 \cdot \sqrt{k}}. \quad (2.8)$$

В табл. 2.2 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.

**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.

2.2.2. Эффективность низкой по высоте формы

Рассмотрим емкость пирамидально-призматической формы. Ее вертикальное поперечное сечение в одной из плоскостей симметрии представлено на рис. 2.2.

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. 2.2 примет вид (2.9):

$$V = V_1 + V_2 = h_1 \cdot \left(a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right) + h_2 \left(a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2. \quad (2.9)$$

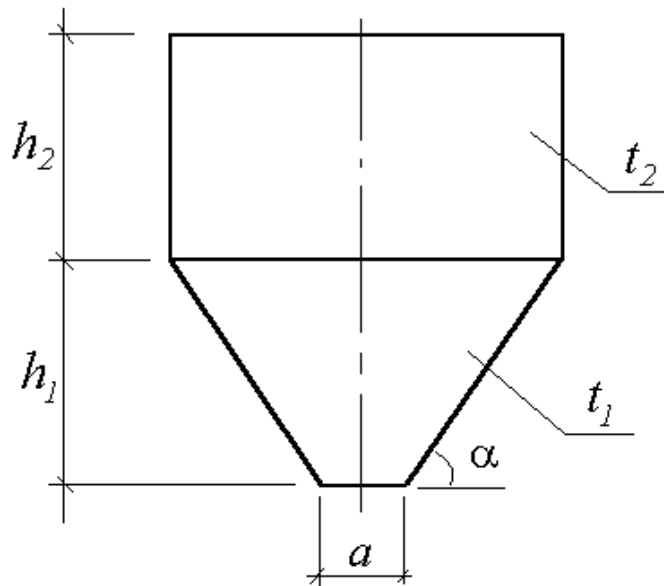


Рис. 2.2. Вертикальное сечение пирамидально-призматической емкости

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 (2.10):

$$M = \frac{4 \cdot h_1}{\sin \alpha} \left(a + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_1 + 4 \cdot h_2 \cdot \left(a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_2. \quad (2.10)$$

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 (2.9) величину h_2 . Получим выражение для отыскания высоты вертикальной части емкости (2.11):

$$h_2 = \frac{V - h_1 \cdot \left(a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{\left(a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2}. \quad (2.11)$$

Подставив выражение (2.11) в выражение (2.10), получим функцию одной переменной $M(h_1)$ в виде (2.12):

$$M(h_1) = \frac{4 \cdot h_1}{\sin \alpha} \left(a + \frac{h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot t_1 + 4 \cdot \frac{V - h_1 \cdot \left(a^2 + \frac{2 \cdot a \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{4 \cdot h_1^2}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \right)}{a + \frac{2 \cdot h_1}{\operatorname{tg} \alpha}} \cdot t_2. \quad (2.12)$$

Далее, взяв первую производную, выполнив промежуточные преобразования и приравняв ее нулю, получим кубическое уравнение (2.13):

$$\begin{aligned} & \frac{t_1}{\sin \alpha} \left(a + \frac{2h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) - t_2 \left(a + \frac{4h_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right) - \frac{2Vt_2 \operatorname{tg} \alpha}{(atg\alpha + 2h_1)^2} + \\ & t_2 \left(\frac{12ah_1^2 + 4a^2 h_1 \operatorname{tg} \alpha + \frac{32h_1^3}{3 \operatorname{tg} \alpha}}{3 \operatorname{tg} \alpha} \right) + \frac{t_2 \left(12ah_1^2 + 4a^2 h_1 \operatorname{tg} \alpha + \frac{32h_1^3}{3 \operatorname{tg} \alpha} \right)}{(atg\alpha + 2h_1)^2} = 0 \end{aligned} \quad (2.13)$$

Выполнив ряд преобразований, данное уравнение может быть приведено к классическому виду (2.14) с достаточно простыми коэффициентами при неизвестных, но сложным свободным членом:

$$\begin{aligned} & h_1^3 + (1,5atg\alpha)h_1^2 + (0,75atg\alpha)h_1 + \\ & + \frac{3a^3 \operatorname{tg}^3 \alpha (t_1 - t_2 \sin \alpha)}{8(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)} - \frac{6Vt_2 \operatorname{tg}^2 \alpha \sin \alpha}{8(3t_1 - 2t_2 \sin \alpha)} = 0. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Для решения этого уравнения будем использовать формулы Кардано [119]. Коэффициенты «неполного» кубического уравнения определяются выражениями (2.15) и (2.16):

$$p = 0, \quad (2.15)$$

$$q = -\frac{a^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 6 \cdot V \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{8 \cdot (3 \cdot t_1 + 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}. \quad (2.16)$$

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 (2.17):

$$x_1 = \sqrt[3]{|q|}. \quad (2.17)$$

Окончательно, корень исходного кубического уравнения (2.14) определится выражением (2.18):

$$h_1 = \sqrt[3]{\frac{a^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 6 \cdot V \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{8 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.18)$$

Используя принятые ранее обозначения, решение (2.18) может быть переписано в виде (2.19):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.19)$$

Для отыскания величины h_2 возможно использовать полученное в ходе настоящих выкладок выражение (2.11). Однако не является достаточно громоздким и может быть непосредственно использовано при проведении практических расчетов.

Используя принятые ранее обозначение выражение (2.11) может быть переписано в виде (2.20):

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot \left(a_0^2 \cdot y_1 + \frac{a_0 \cdot y_1^2}{tg \alpha} + \frac{y_1^3}{3 \cdot tg^2 \alpha} \right)}{4 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{tg \alpha} \right)^2}. \quad (2.20)$$

Здесь же отметим коротко, что, как показывают расчеты, выполненные в соответствии с выражениями (2.19) и (2.20), 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 (2.21) и (2.22), аналогичных выражениям (2.19) и (2.20), соответственно:

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{\pi \cdot a_0^3 \cdot t_2 \cdot tg^3 \alpha \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot V \cdot tg^2 \alpha \cdot \sin \alpha}{\pi \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - 0,5 \cdot a \cdot tg \alpha. \quad (2.21)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - \pi \cdot \left(a_0^2 \cdot y_1 + a_0 \cdot y_1^2 / tg \alpha + y_1^3 / (3 \cdot tg^2 \alpha) \right)}{\pi \cdot \left(a_0 + y_1 / tg \alpha \right)^2}. \quad (2.22)$$

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 (2.9) настоящей работы, и для на-

хождения массы затрачиваемого материала, подобное выражению (2.10) 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.

2.3. 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.

2.3.1. Геометрическая модель

Рассмотрим емкость, состоящую из произвольного количества k отдельных частей, связанных конструктивно (рис. 2.3). 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 кривыми, описываемыми функцией $R(y)$, которые в частном случае могут быть прямолинейными. Вся конструкция предполагается двоякосимметричной относительно вертикальной оси Y .

В качестве заданных параметров предполагаются 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 соображениям 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 данной публикации не рассматриваются.

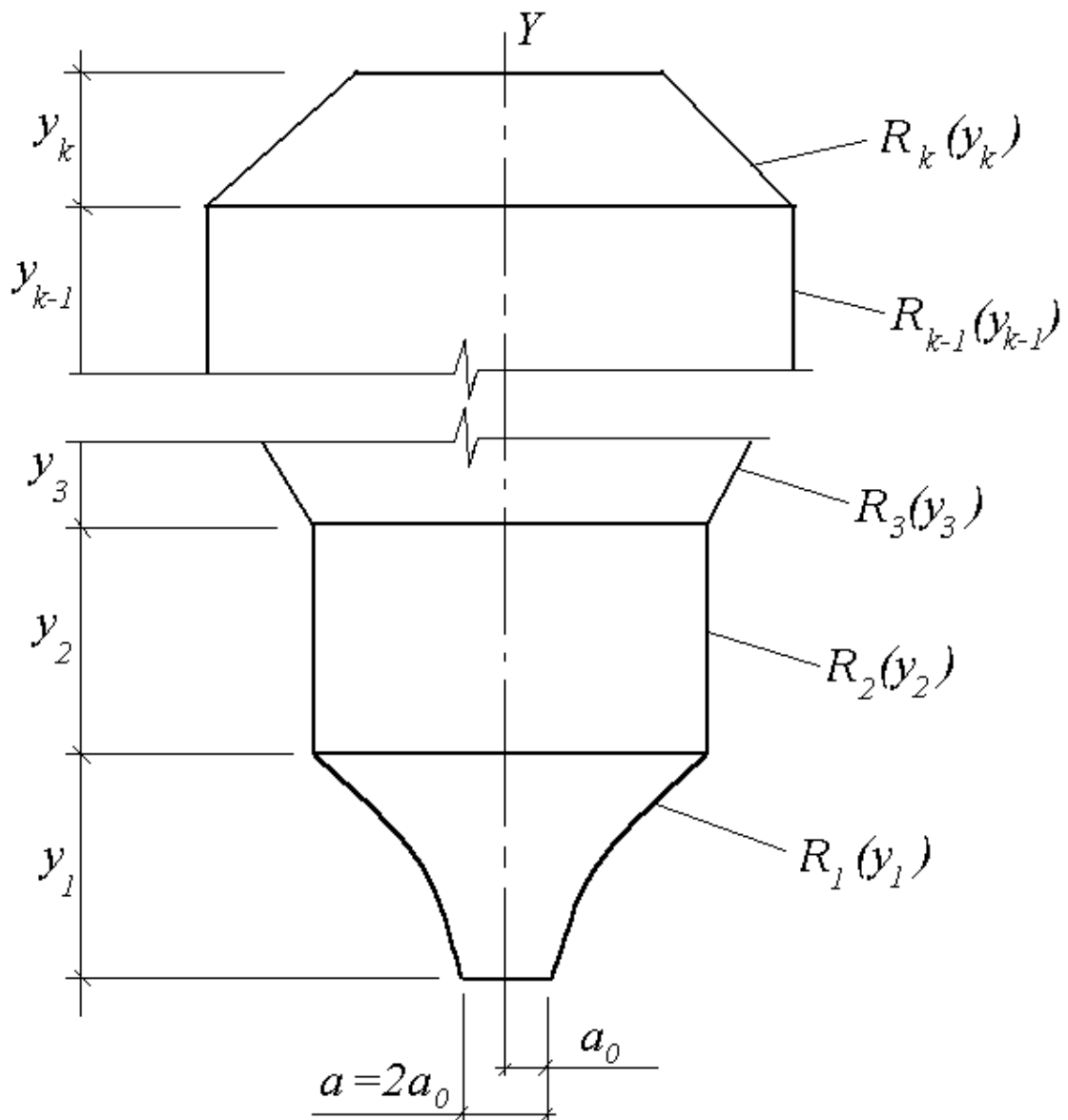


Рис. 2.3. Геометрическая модель емкостной конструкции

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. 2.3).

2.3.2. 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 2.4.

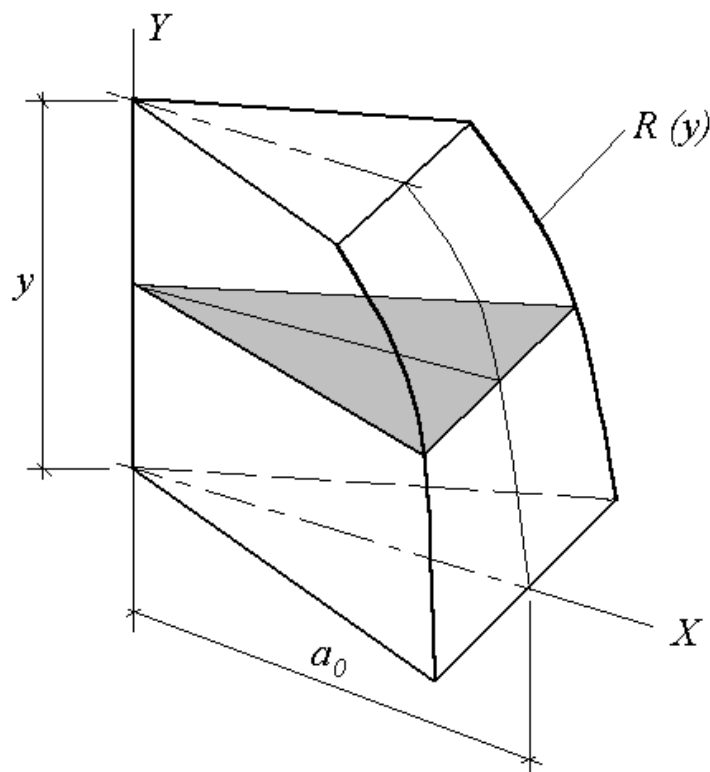


Рис. 2.4. Произвольный сегмент емкости

Она представляет собой произвольный сегмент емкости, образованный двумя горизонтальными плоскостями, ограничивающими фигуру сверху и снизу, двумя вертикальными плоскостями, выделяющими сегмент из всей части емкости, а также боковой поверхностью, описываемой уравнением $R(y)$. Произвольное горизонтальное сечение фигуры (на рис. 2.4 показано более темным цветом) является сектором n -угольника для поперечного сечения соответствующей части емкости (рис. 2.5).

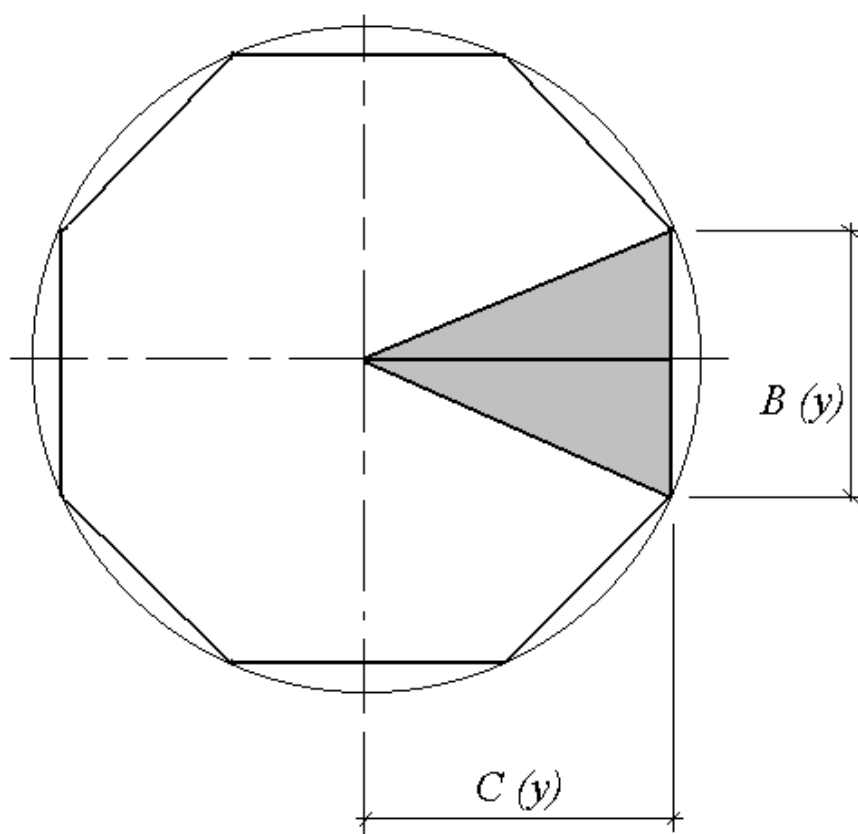


Рис. 2.5. Поперечное сечение i -ой части емкости

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 $A(y) = C^2(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi/n)$. Тогда ее объем определится выражением (2.23):

$$V_1 = \int_0^y A(y)dy = \int_0^y C^2(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) dy . \quad (2.23)$$

Соответственно, для фигуры составленной из n аналогичных сегментов объем определится выражением (2.24):

$$V = n \cdot V_1 = n \cdot \int_0^y C^2(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) dy = n \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) \cdot \int_0^y C^2(y) dy . \quad (2.24)$$

Рассуждая аналогично, выражение для площади боковой поверхности сегмента определится выражением (2.25), а для фигуры составленной из n аналогичных сегментов – выражением (2.26):

$$S_1 = \int_0^y B(y) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy = \int_0^y 2 \cdot C(y) \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy , \quad (2.25)$$

$$S = n \cdot S_1 = 2 \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) \cdot \int_0^y C(y) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy . \quad (2.26)$$

Масса всего сегмента будет равна площади боковой поверхности, по выражению (2.26), умноженной на толщину стенки сегмента t и определится выражением (2.27):

$$V_m = S \cdot t = 2 \cdot t \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi / n) \cdot \int_0^y C(y) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC(y)}{dy} \right)^2} dy . \quad (2.27)$$

Для емкостей, состоящих из произвольного количества k отдельных частей, выражение для нахождения массы конструкции примет вид (2.28):

$$V_m = S \cdot t = 2 \cdot \sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi / n_i) \int_0^{y_i} C_i(y_i) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right)^2} dy_i . \quad (2.28)$$

Полученное выражение (2.28) 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 запишется в виде (2.29), при отсутствии такой связанности – в виде (2.30):

$$C_i(y_i) = a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j), \quad (2.29)$$

$$C_i(y_i) = a_{0i} + R_i(y_i). \quad (2.30)$$

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, вид которой к тому же заранее неизвестен, т.е. она может быть как линейной, так и являться полиномом высших степеней, или же содержать трансцендентные функции и пр. В каждом конкретном случае емкости вид функции, конечно, будет известен и определится заданной формой боковой поверхности – функцией $R(y)$.

Как правило, при решении подобных задач поступают примерно следующим образом [120 – 122]. 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 [119, 123], который является одним из частных приложений теории неявных функций. Суть метода заключается в необходимости сформировать вспомогательную функцию L в виде выражения (2.31):

$$L = F + \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot O_i, \quad (2.31)$$

где F – исследуемая функция;

λ_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 (2.31) они суммируются.

Для рассматриваемого нами случая выражение (2.31) может быть записано в виде выражения (2.32), в котором исследуемая функция F опишется выражением (2.28), а ограничение будет иметь вид уравнения (2.24), записанного для конструкции емкости, состоящей из произвольного количества k частей:

$$F_m = \sum_{i=1}^k S_i \cdot t_i = 2 \cdot \sum_{i=1}^k t_i \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi / n_i) \times \int_0^{y_i} C_i(y_i) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dC_i(y_i)}{dy_i} \right)^2} dy_i + \lambda \cdot \left[\sum_{i=1}^k n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi / n_i) \cdot \int_0^{y_i} C_i^2(y_i) dy_i - V \right] \quad (2.32)$$

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 (2.32) 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 (2.32) точками разрыва являются только те точки, в которых функция $tg(\pi/n)$ является разрывной, т.е. выполняется следующее условие (2.33):

$$\pi/n_i = \pi/2 + \pi \cdot N, \text{ где } N \in \mathbb{Z}. \quad (2.33)$$

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 (2.27) для случая емкости, состоящей из полностью конструктивно связанных между собой частей, которое подставляем в выражение (2.32). 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 (2.34).

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.

$$\begin{aligned}
\frac{\partial F_m}{\partial y_i} = & 2 \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot t_i \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j)) \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \right)^2} + \\
& + 2 \cdot \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot t_m \cdot \int_0^{y_m} \sqrt{1 + \left(\frac{dR_m(y_m)}{dy_m} \right)^2} dy_m + \\
& + \lambda \cdot n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot (a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j))^2 + \lambda \cdot \frac{dR_i^2(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot y_m + \\
& + \lambda \cdot 2 \cdot \frac{dR_i(y_i)}{dy_i} \cdot \sum_{m=i+1}^k n_m \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_m) \cdot \int_0^{y_m} (a_0 + \sum_{l=1, l \neq i}^k R_l(y_l)) dy_m = 0 \quad (2.34)
\end{aligned}$$

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.

Уравнение связи, фактически, представляет собой исходное ограничение, записанное в виде выражения (2.35):

$$\sum_{i=1}^k n_i \cdot \operatorname{tg}(\pi/n_i) \cdot \int_0^{y_i} \left(a_0 + \sum_{j=1}^i R_j(y_j) \right)^2 dy_i - V = 0. \quad (2.35)$$

Дальнейшее решение системы уравнений вида (2.34) совместно с уравнением связи (2.35) 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 λ , а затем подстановки его в выражения для отыскания значений y_i . Такой подход, как показывает накопленный автором 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 (2.34) и (2.35).

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 согласно рекомендациям работ [124 – 126].

2.4. 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.

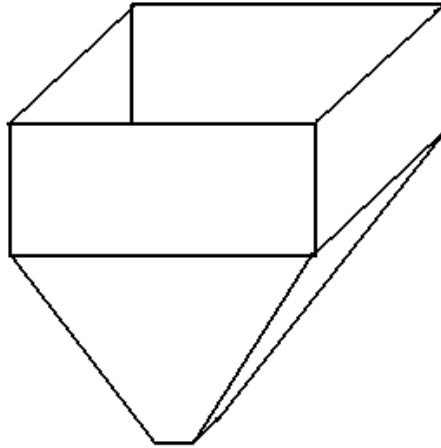
2.4.1. Случай двухступенчатой емкости

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. 2.6) 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 (2.36), соответственно:

$$R_1(y_1) = y_1 / \operatorname{tg} \alpha, \quad R_2(y_2) = 0, \quad (2.36)$$

где α - угол наклона стенок нижней пирамидальной части к горизонту, а a_0 – половина ширины выпускного отверстия.



**Рис. 2.6. Геометрическая схема
пирамидально-призматической емкости**

Величины угла α , 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 (2.33) и выполнив промежуточные преобразования, получим два уравнения (2.37) и (2.38):

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot t_2 + \lambda \cdot 4 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2 = 0, \quad (2.37)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_m}{\partial y_1} = & \frac{8 \cdot t_1}{\sin \alpha} \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right) + \frac{8 \cdot t_2}{\operatorname{tg} \alpha} \cdot y_2 + \\ & \lambda \cdot \left(4 \cdot \left(a_0 + \frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^2 + \frac{8 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{8 \cdot a_0 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha}\right) = 0. \end{aligned} \quad (2.38)$$

Уравнение связи (2.35) для данного случая с учетом оговоренных параметров может быть преобразовано к виду (2.39):

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = & 4 \cdot (a_0^2 \cdot y_1 + \frac{a_0 \cdot y_1^3}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha} \cdot) + \\ & (4 \cdot a_0^2 \cdot y_2 + \frac{2 \cdot a_0 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha}) - V = 0 \end{aligned} \quad (2.39)$$

Далее, решая совместно уравнения (2.38) и (2.39), может быть получено окончательное решение для отыскания оптимальной величины высоты нижней пирамидальной части, опуская промежуточные математические преобразования, в виде выражения (2.40):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg}^3 \alpha \cdot t_2 \cdot \sin \alpha + 3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} - a_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha. \quad (2.40)$$

Соответственно, величина оптимальной высоты верхней призматической части может быть найдена из выражения (2.39) и, опуская промежуточные математические вычисления, может быть представлена в виде выражения (2.41):

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha + 3 \cdot V}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha + 3 \cdot K^2)}}. \quad (2.41)$$

где вспомогательный коэффициент K определяется согласно выражению (2.42):

$$K = \frac{t_2 \cdot \cos \alpha}{t_1 - t_2 \cdot \sin \alpha}. \quad (2.42)$$

Заметим, также, что выражение (2.41) может быть легко приведено к виду выражения (2.43), которое совпадает с полученным ранее выражением (2.20) и является более удобным при практическом использовании.

Приведенные зависимости (2.40) и (2.41), также, могут быть представлены более наглядно в графическом виде. Для этого зададимся 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. 2.7 и 2.8, соответственно. Они построены в одном из современных математических пакетов прикладных программ.

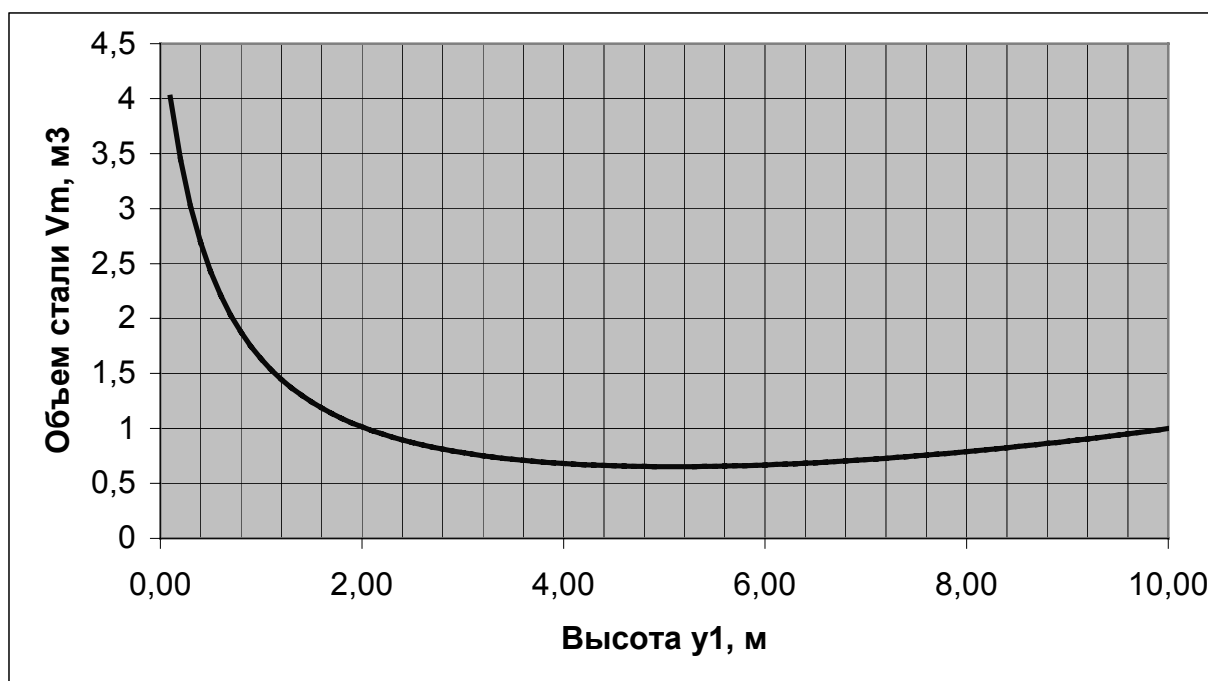


Рис. 2.7. График изменения высоты пирамидальной части емкостной конструкции

Видно, что оба графика имеют явно выраженный минимум, который в количественном отношении (с использованием выражений (2.40) и (2.41)) 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. 2.8).

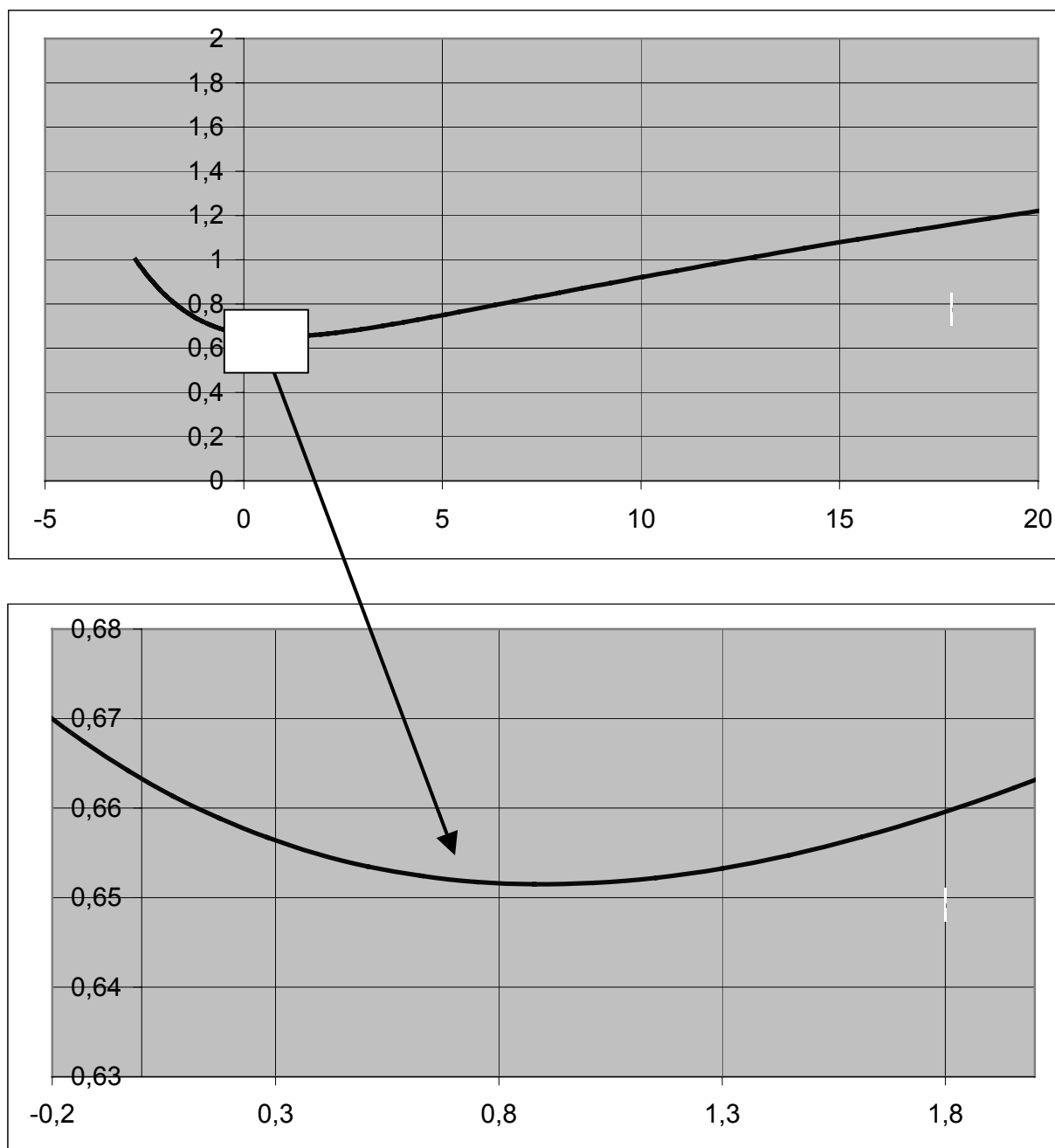


Рис. 2.8. График изменения высоты призматической части емкостной конструкции

Для более простого частного случая пирамидально-призматической емкости, в которой условно принята ширина выпускного отверстия $a_0 = 0$, решения (2.40) и (2.41) упрощаются до вида, соответственно, (2.43) и (2.44):

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{4 \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}} , \quad (2.43)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot y_1^3 / (3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha)}{4 \cdot (y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2} . \quad (2.44)$$

Заметим, также, что вычисленные значения оптимальных высот пирамидальной и призматической частей емкости по формулам (2.43) и (2.44) отличаются от результатов, подсчитанных по формулам (2.40) и (2.41), 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 (2.43) и (2.44) могут быть рекомендованы для практического использования при нахождении приближенных оценок величин искомых оптимальных высот емкостной конструкции.

На основе приведенных на рис. 2.7 и 2.8 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 на рис. 2.9 и 2.10.

Любопытным, также, представляется проследить влияние различных параметров на изменчивость графиков оптимизации. На рис. 2.11 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. 2.7 приобретает вид представленный на рис. 2.11, а, для случая $\delta = 0,5$

– рис. 2.11, б. Видно, что в последнем случае вообще не существует оптимального решения.

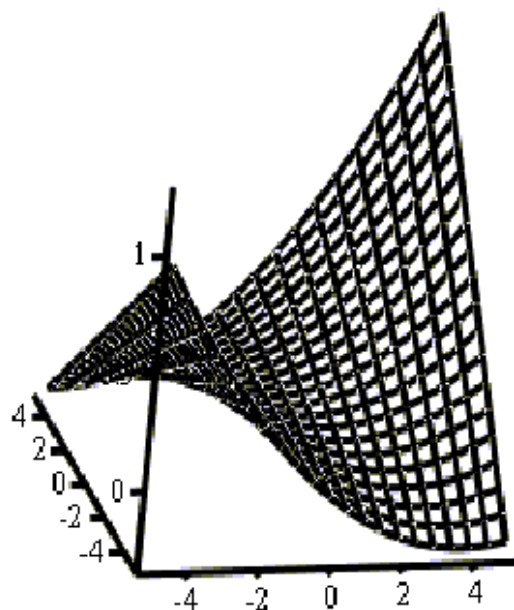
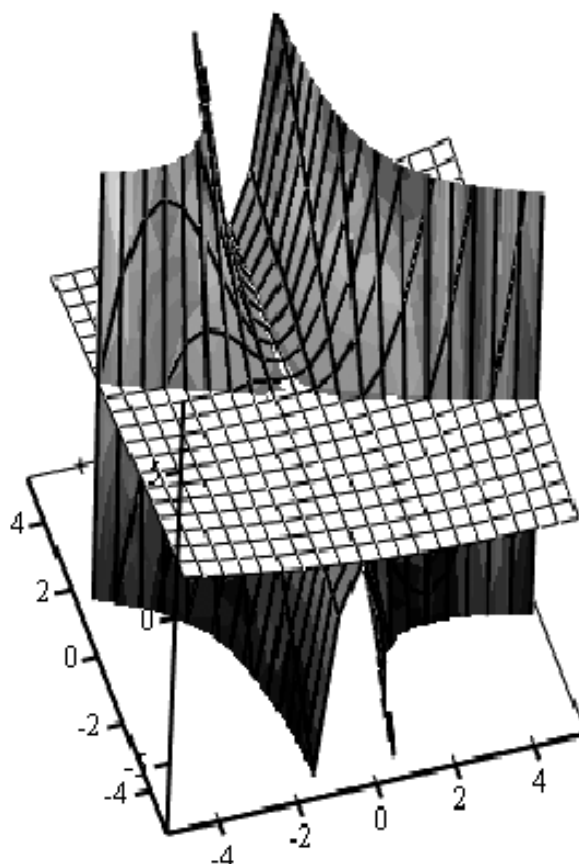
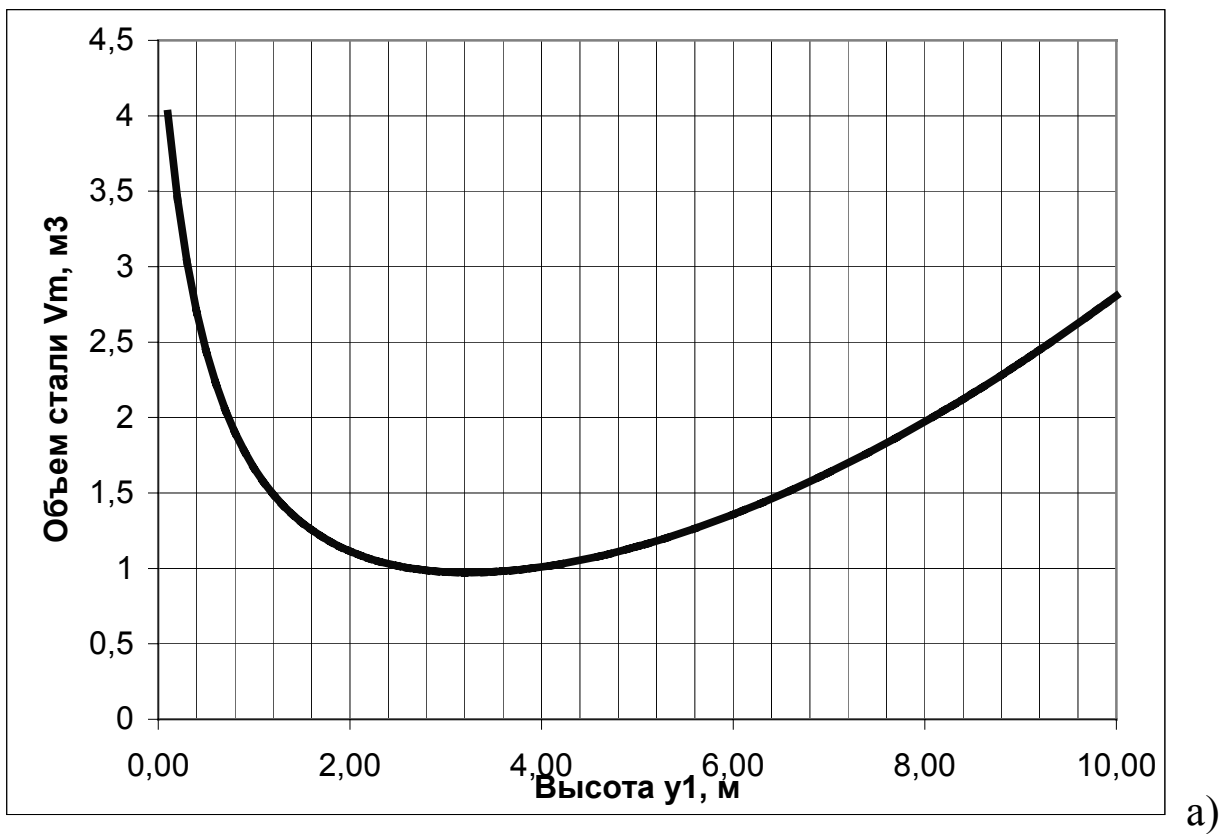


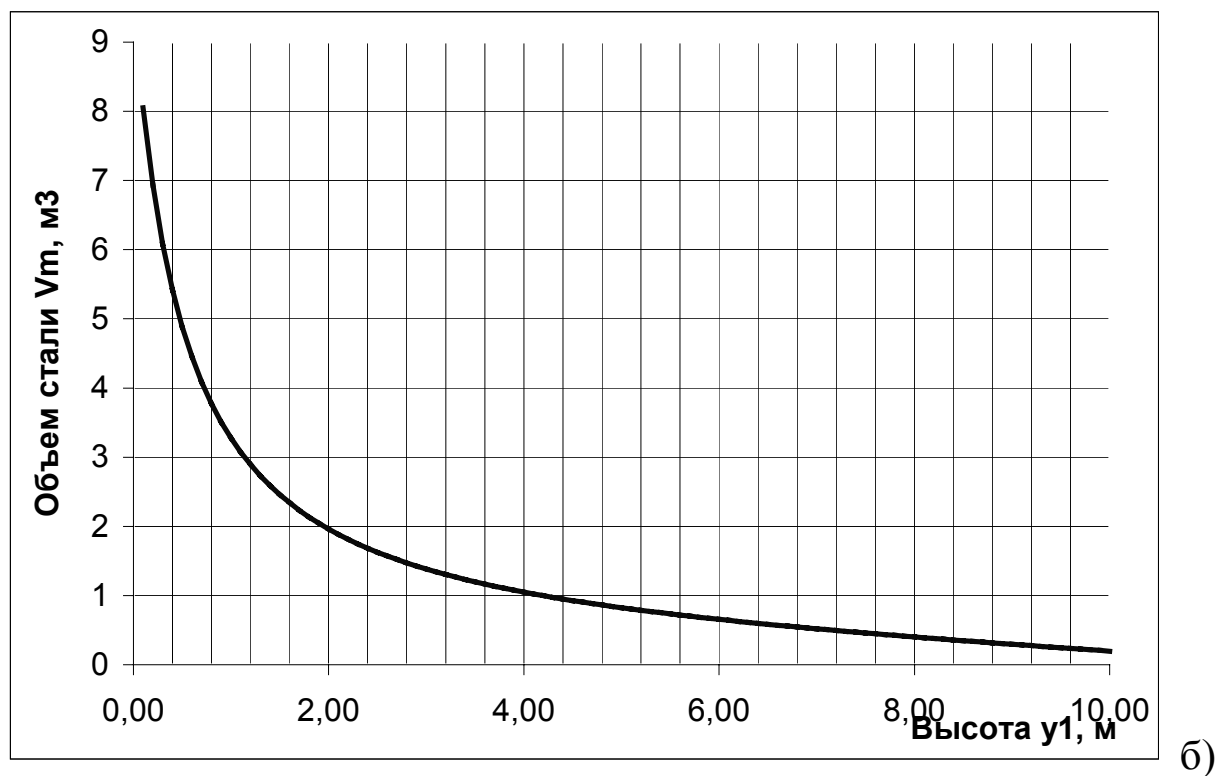
Рис. 2.9. Графическое изображение функции формы



**Рис. 2.10. Графическое изображение функции формы
с использованным ограничением**



а)



б)

Рис. 2.11. График изменения высоты пирамидальной части емкостной конструкции:
а) при $\delta = 2$, б) при $\delta = 0,5$

Еще одним интересным случаем, имеющим немаловажное практическое значение, является случай конусно-цилиндрической емкости (рис. 2.12).

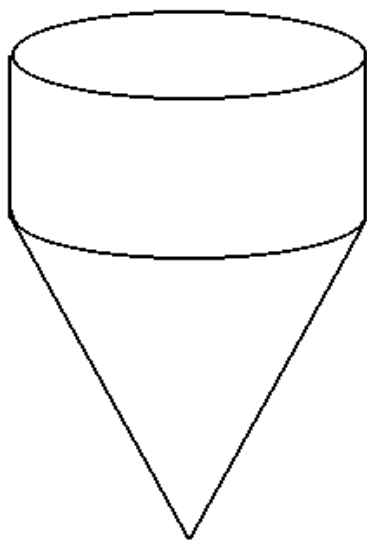


Рис. 2.12. Геометрическая схема упрощенной конусно-цилиндрической емкости

Для частного случая упрощенной емкости (при ширине выпускного отверстия $a_0 = 0$) выражения для оптимальных величин высот конусной и цилиндрической частей сооружения (выражения (2.45) и (2.46), 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.

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha \cdot \sin \alpha \cdot V}{\pi \cdot (3 \cdot t_1 - 2 \cdot t_2 \cdot \sin \alpha)}}, \quad (2.45)$$

$$y_2^{opt} = \frac{V - 4 \cdot y_1^3 / (3 \cdot \operatorname{tg}^2 \alpha)}{\pi \cdot (y_1 / \operatorname{tg} \alpha)^2}. \quad (2.46)$$

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 (2.43), (2.44) с верхней стороны и (2.45), (2.46) с нижней стороны.

Так, например, для принятых ранее конструктивных параметров емкости величины оптимальных высот, рассчитанные по формулам (2.45) и (2.46) 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, (2.45) и (2.46), 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° - $0 < \beta < 90^\circ$ (рис. 2.13).

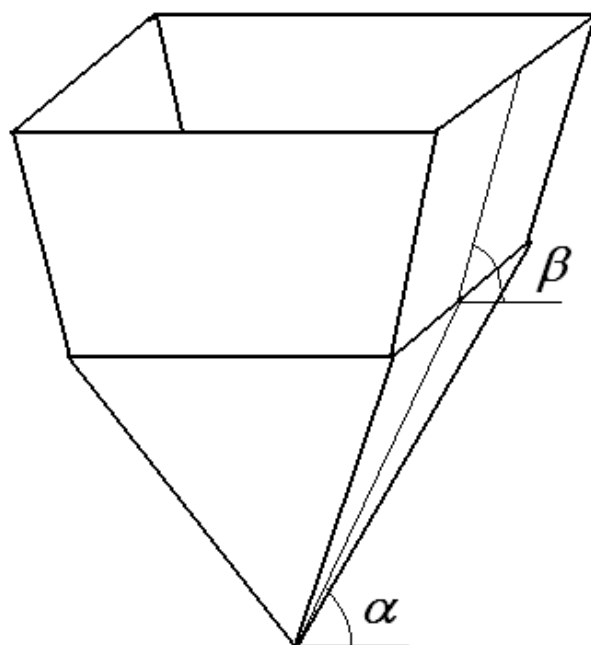


Рис. 2.13. Геометрическая схема упрощенной пирамидально-призматической емкости с невертикальной верхней частью ($0 < \beta < 90^\circ$)

Полученные для этого случая оптимальные решения имеют вид выражений (2.47) для нижней части конструкции и (2.48) для верхней части конструкции:

$$y_1^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot t_2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta \cdot V \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1\right)^3}{4 \cdot t_1 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}\right)^3 + 4 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{\cos \beta}{\cos \alpha} - 1\right)^3 \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \alpha}\right) \cdot \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{\operatorname{tg}^2 \alpha}}}, \quad (2.47)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}}, \quad (2.48)$$

где коэффициент K определяется выражением (2.49):

$$K = \frac{t_2 \cdot \cos \alpha - t_1 \cdot \cos \beta}{t_1 \cdot \sin \beta - t_2 \cdot \sin \alpha}. \quad (2.49)$$

В предельном случае^о ($\beta \rightarrow 90^\circ$) данные выражения приобретут вид выражений (2.43) и (2.44), 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 (2.50) и (2.51) для нижней и верхней частей конструкции, соответственно:

$$y_1^{opt} = \operatorname{tg} \alpha \cdot (K \cdot y_2^{opt} - a_0) \quad (2.50)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^2 \beta}{4 \cdot (K \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K^2 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta + 3 \cdot K \cdot \operatorname{tg} \beta + 1)}}. \quad (2.51)$$

Для получения аналогичных выражений для емкости конусно-цилиндрического типа, вертикальная часть которой образует с горизонтом некоторый угол, больший 90° , достаточно заменить в выражениях (2.47) – (2.50) коэффициент 4 на π .

2.4.2. Случай трехступенчатой емкости

Для данного случая трехступенчатой емкости (рис. 2.14), в которой углы наклона сторон обшивки к горизонту равняются для нижней и верхней частей, соответственно, α и β уравнения основной разрешающей системы, полученные из общего решения (2.34), будут иметь достаточно сложный вид выражений (2.52 – 2.55):

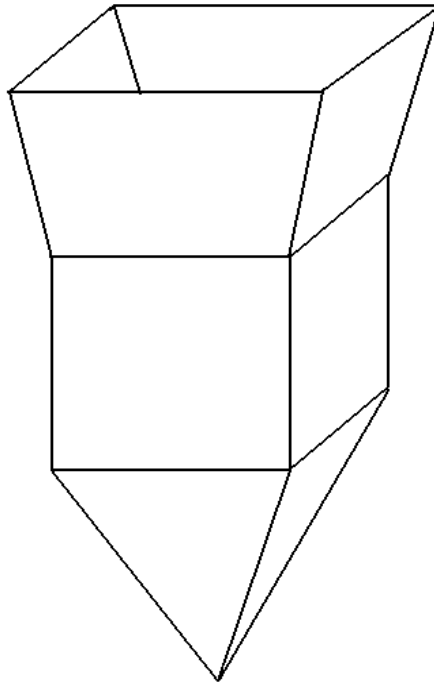
$$\frac{\partial F_m}{\partial y_1} = 8 \cdot \left(\frac{t_1 \cdot y_1}{\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{t_2 \cdot y_2}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{t_3 \cdot y_3}{\sin \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha} \right) + \lambda \cdot 4 \left(\left(\frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^2 + \frac{2 \cdot y_1 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{2 \cdot y_1 \cdot y_3}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{2 \cdot y_2 \cdot y_3}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} + \frac{y_3^3}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) = 0, \quad (2.52)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_2} = 8 \cdot \frac{t_2 \cdot y_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \lambda \cdot 4 \cdot \frac{y_1^2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} = 0, \quad (2.53)$$

$$\frac{\partial F_m}{\partial y_3} = 8 \cdot \left(\frac{t_3 \cdot y_1}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \sin \beta} + \frac{t_3 \cdot y_3}{\sin \beta \cdot \operatorname{tg} \beta} \right) + \lambda \cdot 4 \left(\frac{y_1}{\operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_3}{\operatorname{tg} \beta} \right)^2 = 0, \quad (2.54)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial F_m}{\partial \lambda} = 4 \cdot \left(\frac{y_1^3}{3 \cdot \operatorname{tg} \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_2}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \frac{y_1^2 \cdot y_3}{\operatorname{tg}^2 \alpha} + \right. \\ \left. + \frac{y_1 \cdot y_3^2}{\operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg} \beta} + \frac{y_3^3}{3 \cdot \operatorname{tg}^2 \beta} \right) - V = 0 \end{aligned} \quad (2.55)$$

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 $\alpha = 60^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $V = 200 \text{ м}^3$, $t_1 = t_2 = t_3 = 1 \text{ см}$, автор получил 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. 2.14. 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 2.3 настоящей монографии. Поэтому, предполагая монотонность изменения функции материала для параметра y_2^{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.

2.4.3. 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. 2.13, угол наклона верхней части в данном случае будет находиться в диапазоне $90^\circ < \beta < 180^\circ$ (рис. 2.15).

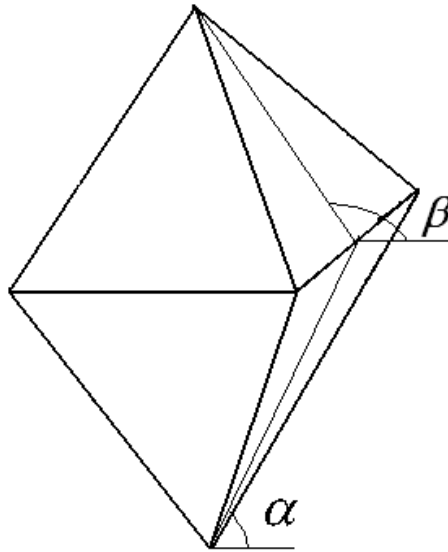


Рис. 2.15. Геометрическая схема упрощенной пирамидально-призматической емкости с невертикальной верхней частью ($90^\circ < \beta < 180^\circ$)

Полученные для этого случая решения будут иметь вид выражений (2.50) и (2.51) для нижней и верхней частей конструкции, соответственно, где коэффициент K определится выражением (2.56):

$$K = -\frac{1}{\operatorname{tg} \beta}. \quad (2.56)$$

Выражение (2.51) после соответствующих преобразований может быть приведено к виду выражения (2.57). Для случая емкости упрощенной формы (без выпускного отверстия) это выражение также упростится и приобретет вид выражения (2.58):

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot a_0^3 \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot \operatorname{tg}^3 \beta + 3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^3 \beta}{4 \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}}, \quad (2.57)$$

$$y_2^{opt} = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot V \cdot \operatorname{tg}^3 \beta}{4 \cdot (\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha)}}. \quad (2.58)$$

Заметим, что для подобного случая двухступенчатой емкостной конструкции, у которой верхняя часть наклонена под углом к горизонту больше, чем 90° , решение становится вырожденным и потому оказывается проще аналогичного выражения (2.46). В частности, оно перестает зависеть от толщин отдельных частей емкостной конструкции.

2.5. 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 автор преднамеренно избегал 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. 2.16, которые являются оболочечными конструкциями и в которых углы наклона отдельных частей сооружения определяются соответствующими технологическими условиями.

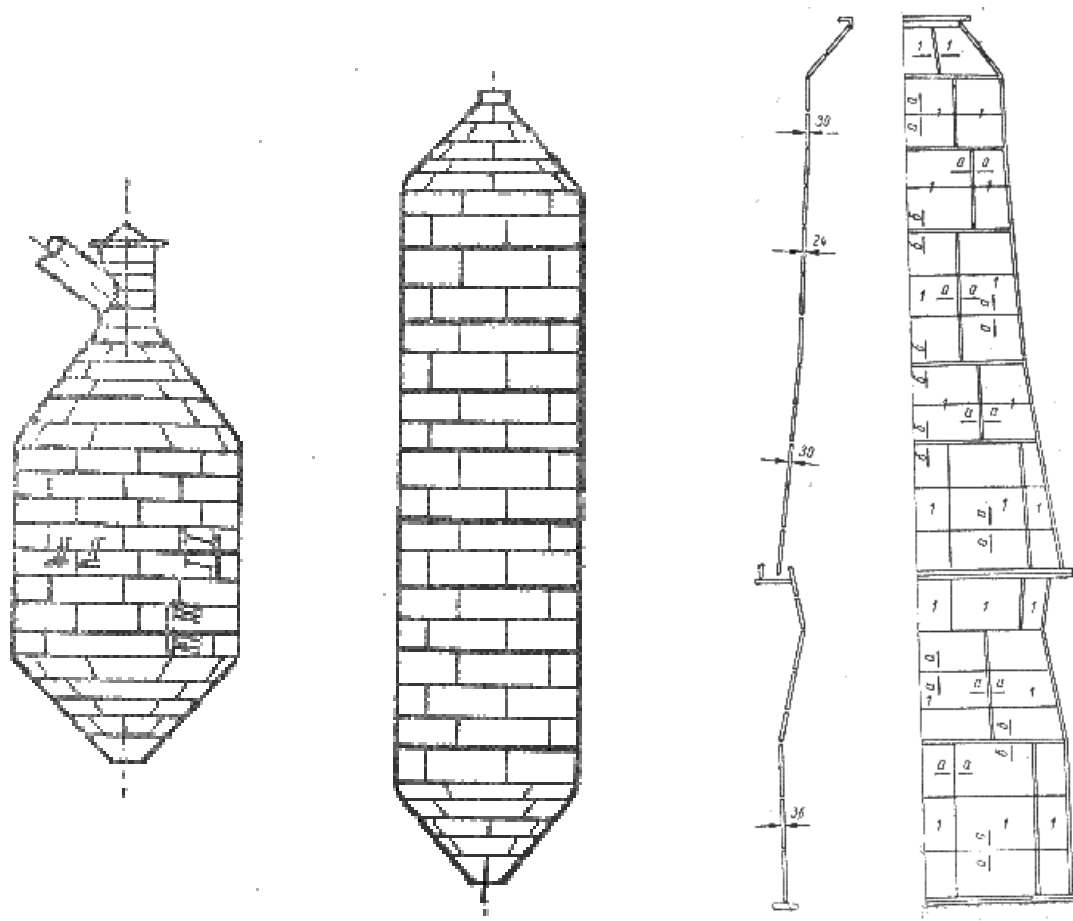


Рис. 2.16. Листовые оболочечные сооружения

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 3

Выбор конструктивного решения емкостной конструкции

В данном разделе рассматривается не менее важное, чем в предыдущих случаях, направление, связанное с улучшением и модернизацией существующего конструктивного решения стальных емкостей для сыпучих материалов. Подобные вопросы затрагивались и продолжают затрагиваться как рядом инженеров-проектировщиков, занимающихся непосредственным созданием емкостных сооружений, так и ведущими отечественными специалистами-теоретиками. Выполняется анализ таких предлагаемых подходов и указываются их основные слабые места.

Отдельно рассматриваются авторские предложения и рекомендации, являющиеся основой конструктивного формообразования емкостных конструкций.

Section 3

Choosing of constructive solution of capacity structure

The no less important, than in previous cases, direction is examined in this section. It is connected with the improvement and modernization of the existing constructive solution of steel capacities for granular materials. Similar questions were affected and continue to be affected both in a number of engineers-designers, engaged in direct creation of capacity structures and by leading domestic specialists-theorists. An analysis of the such offered approaches is executed and their basic weak points are specified.

Suggestions and recommendations of the author, being the basis of constructive shape-making of capacity structures, are separately considered.

3.1. Особенности существующего конструктивного решения

Прежде, чем перейти к рассмотрению сути различных предложений и рекомендаций, направленных на улучшение и совершенствование существующего конструктивного решения стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, следует более детально с ним ознакомиться.

Все имеющее место в практике разнообразие форм и размеров емкостных конструкций (см. раздел 1 настоящей монографии) определяется рядом технологических факторов. Между тем, применяемая конструктивная схема стальных емкостей для сыпучих материалов, как уже не раз подчеркивалось в ходе настоящего изложения, остается достаточно однотипной и существенным образом не видоизменяется в зависимости от типа технологического сыпучего материала, загружаемого в сооружение (рис. 3.1).

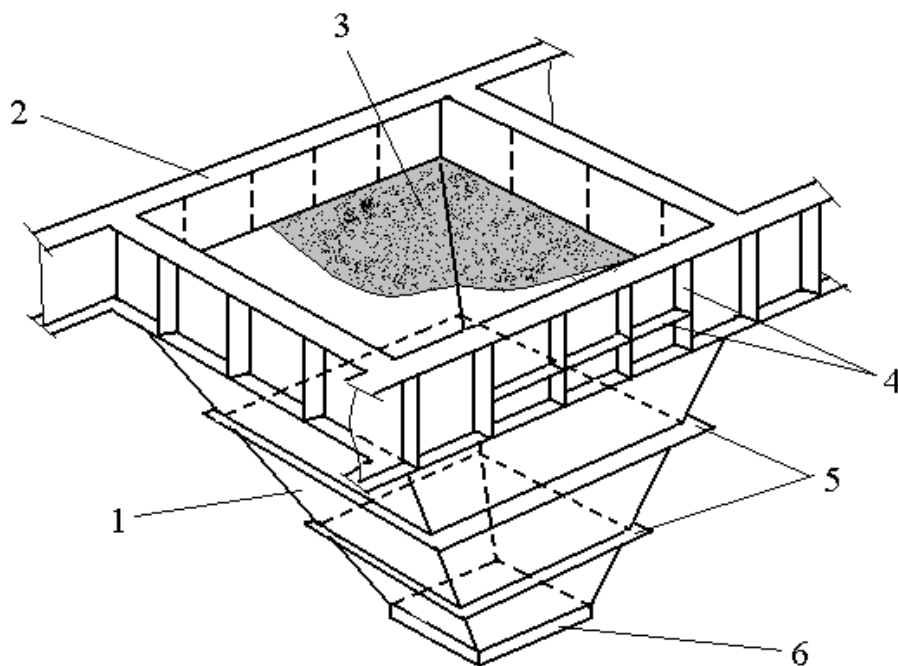


Рис. 3.1. Типовая конструктивная схема двухступенчатой стальной емкости для сыпучих материалов:

- 1 – нижняя часть, 2 – верхняя часть,
3 – футеровочный слой, 4 – вертикальные ребра жесткости,
5 – горизонтальные ребра жесткости, 6 – разгрузочное отверстие

Современное конструктивное решение стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов начало формироваться в начале XX века. Оно представляло собой прямоугольный, треугольный или трапецеидальный клеточный каркас из ребер жесткости, на который прикреплялись листы настила, формировавшие обшивку емкости [7, 36, 109, 110]. Такое решение было довольно громоздким и материалоемким, потому постепенно оно упрощалось в направлении отхода от массивной системы усиливающих ребер.

Наиболее распространенной в настоящее время является двухступенчатая конструктивная схема емкостных конструкций. Она предполагает организацию вертикальной верхней части, формирующей необходимый запас хранимого сыпучего материала, и наклонной нижней части (воронки), через которую происходит самотечная выгрузка этого сыпучего материала во время разгрузки сооружения [42 – 47].

Конструктивно стенки воронки образованы стальными листами относительно небольшой толщины (4 - 16 мм), формирующими обшивку емкости, которые для возможности восприятия давления от сыпучего материала подкрепляются ребрами жесткости.

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, проф. Х. Ягофаровым была обоснована возможность вертикального (точнее, веерообразного) расположения ребер жесткости воронки (подробнее, см., например, его работы [60, 117]). Конструктивное решение в этом случае предполагает наличие специальной нижней рамки жесткости, необходимой для повышения жесткости всего сооружения.

Вертикальная часть емкостной конструкции довольно часто конструктивно решается аналогично наклонной части, хотя иногда, при ее небольшой высоте, она может быть решена в виде специ-

альных бункерных балок. Однако, принцип ее работы остается при этом неизменным.

С внутренней стороны стенки емкостей футеруются для предупреждения их абразивного или ударного износа сыпучим материалом при его загрузке-выгрузке и температурного перегрева, если загружаемый материал имеет повышенную температуру. В практике применяют самые разнообразные типы футеровки – начиная от самофутеровки и заканчивая постановкой специальных многослойных пакетов противоударного типа. Подробные конструктивные описания основных из них можно найти, например, в работе [47].

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

Приведенная в разделе 1 настоящей монографии статистика отказов и аварий стальных емкостных конструкций, разнообразные отчетные работы [91, 127, 128], а также современные научные исследования [60, 118], в том числе и проведенные в свое время автором настоящей монографии [2, 129 - 140], к сожалению, не позволяют считать применяемую конструктивную схему достаточно надежной и долговечной. В совокупности возможно выделять ряд определенных недостатков, характерных для такой схемы.

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 автора, является полный отказ от ребер жесткости. Необходимое

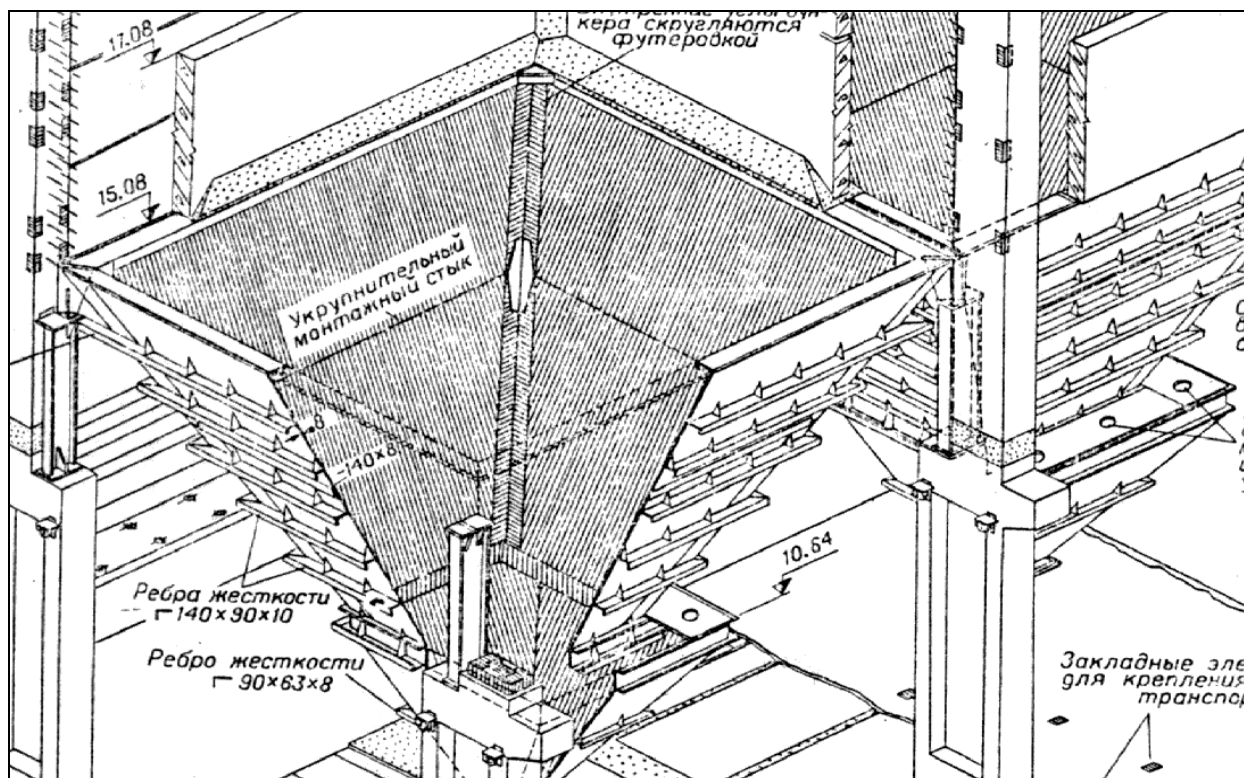
усиление обшивки при этом должно осуществляться иным путем, с расположением элементов жесткости с малым шагом.

Следующий недостаток связан с повышенным расходом материала. Он обусловлен попыткам при расчете конструкции 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 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 достаточно оказываются довольно значительными. К тому же, поскольку во время работы сами ребра нередко испытывают деформации кручения, то приходится ставить специальные фиксирующие элементы (рис. 3.2), которые в свою очередь способствуют дополнительным расходам материала и являются чрезвычайно нетехнологическими с точки зрения изготовления конструкций.

Возможным путем устранения этих двух недостатков, как и в предыдущем случае, может быть полный или частичный отказ от усиливающих ребер жесткости и использования усиливающих элементов с более равномерным делением жесткости по длине и высоте конструкции.

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.



**Рис. 3.2. Постановка
противокрутильных фиксирующих элементов
на ребрах жесткости емкостных конструкций**

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 направлением устранения 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 (см., например [141]). 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 из-

готовления 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 конструкцию нижней выпускной части емкости, как например, изображено на рис. 3.3.

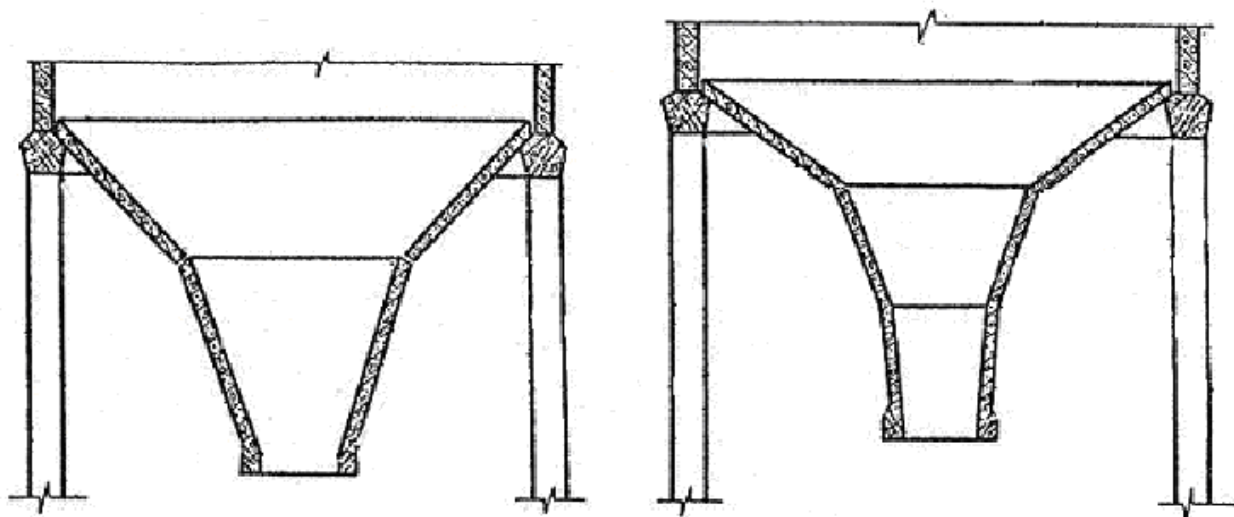


Рис. 3.3. Ломаная поверхность выпускной части емкостной конструкции

В пользу совершенствования существующего конструктивного решения емкостных конструкций для сыпучих материалов говорит и еще один довод. Так, анализируя известные выражения для индикаторов механического подобия из теории подобия [142 - 144] применительно к оребренным емкостям (3.1) 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:

$$F_r \cdot L_r^{-2} = \sigma_r = E_r, \quad L_r = w_r, \quad (3.1)$$

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

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

Таким образом, обобщая все вышеизложенное, по мнению автора 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.

3.2. Предлагаемые конструктивные решения

Указанные выше недостатки применяемого конструктивного решения, постепенно выявляемые в ходе эксплуатации емкостных конструкций для сыпучих материалов, заставляли инженеров искать возможные пути улучшения ситуации. Однако этот процесс оказался достаточно сложным, что обусловлено целым рядом объективных трудностей, связанных с проектированием таких сооружений. К их числу, в первую очередь, относится сложность аналитического расчета емкостной конструкции, представляющей собой складчатую пространственную систему. Также, не последнюю роль сыграли в этом и известные проблемы, связанные с прогнозированием поведения сыпучей среды в замкнутых сосудах.

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

- разработка разнообразных устройств для повышения эффективности разгрузки емкости [145 - 162]. Автору 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 [163];

- разработка легкоборных конструкций емкостей, преимущественно силосного типа, с применением гибких элементов [164 - 167] или простых одиночных гофрированных панелей [168 - 171]. Однако, как констатируют сами авторы большинства подобных разработок, такие конструкции оказываются непригодными для промышленных предприятий с тяжелыми сыпучими материалами и химически агрессивными сыпучими веществами.

Часть исследований направлена на улучшение работы отдельных узлов емкостных конструкций [172 - 174]. Однако все такие подходы лишь частично улучшают ситуацию, нивелируя только некоторые из указанных в предыдущем подразделе настоящей монографии недостатков применяемой конструктивной схемы стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Однако, предлагаются и более принципиальные улучшенные схемы. Так, специалистами Ленинградского отделения ЦНИИ Проектстальконструкция была обоснована возможность снижения материалоемкости емкостной конструкции за счет учета упругопластической работы ее несущих элементов [175 - 178]. Однако широкого распространения данное решение, к сожалению, не получило.

Специалистами проектного института «Днепрпроектстальконструкция», 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 проектного института «Ленпроектстальконструкция». 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, по-видимому, внесения каких-либо принципиальных изменений в конструктивную схему.

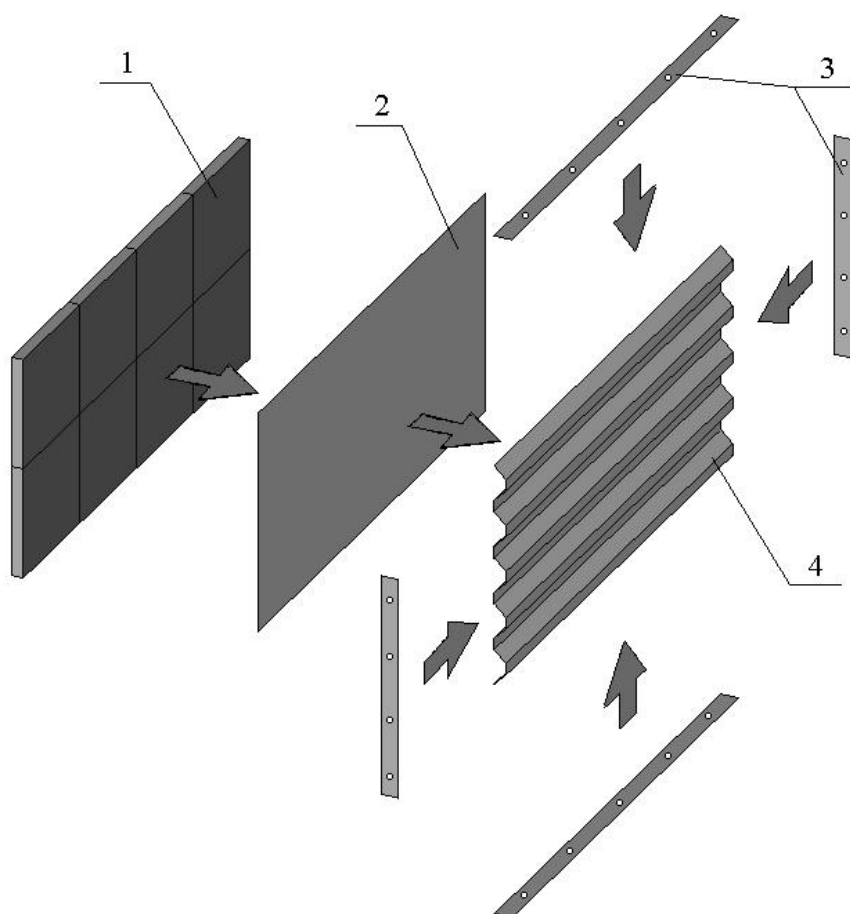
3.3. Авторская панельная конструктивная схема

В результате детального анализа особенностей работы и эксплуатации емкостных конструкций автором было предложено принципиально иное конструктивное решение. Его суть заключается в формировании конструкции емкости из отдельных панелей.

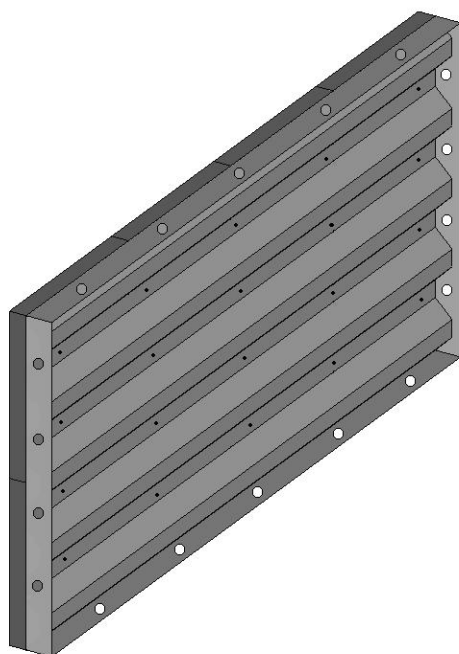
Конструкция предлагаемой панели приведена на рис. 3.4. Панель представляет собой составной двухслойный элемент. Наружный слой является профилированным и предназначен для восприятия нагрузки от давления хранимых сыпучих материалов. Конструктивно он представляет собой стальной лист с имеющимися усиливающими 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 [179 - 181]. Толщина листа при этом может колебаться от 2 – 3 мм при использовании профилей отечественного производства, соответствующих стандарту [182], до 5 – 6 мм при использовании профилей заграничного производства [183]. За счет этого удастся добиться более равномерного распределения жесткости усиливающего элемента. К тому же гофрированный профиль является закрытым, что также отвечает приведенным выше соображениям относительно улучшения существующего конструктивного решения.

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. В этом случае панельная схема приближается к традиционной конструктивной схеме с ребрами жесткости (рис. 3.5) и, фактически, представляет собой некоторый промежуточный вариант между традиционной конструктивной схемой и предлагаемым автором панельным конструктивным решением.

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.



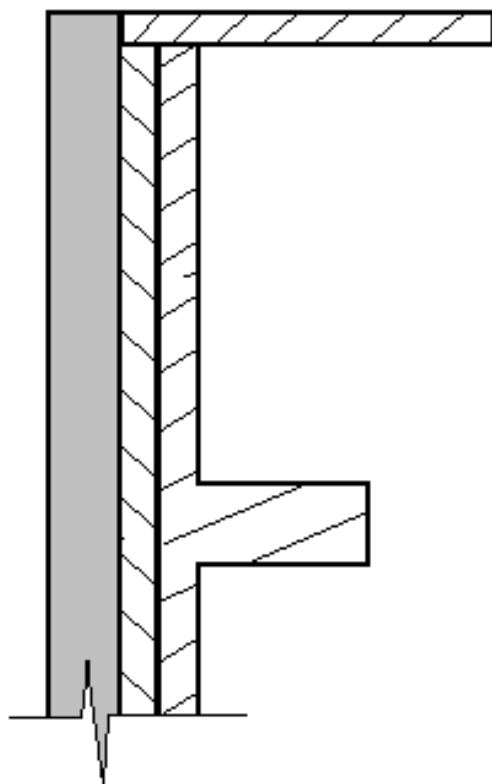
а)



б)

**Рис. 3.4. Конструктивная схема панели (а)
и ее внешний вид (б):**

1 – футеровочный слой, 2 – внутренний лист,
3 – обвязочный элемент, 4 – внешний профилированный лист



**Рис. 3.5. Внешний слой панели
с усиливающими ребрами жесткости**

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» [184 – 187]. 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 (рис. 3.6).

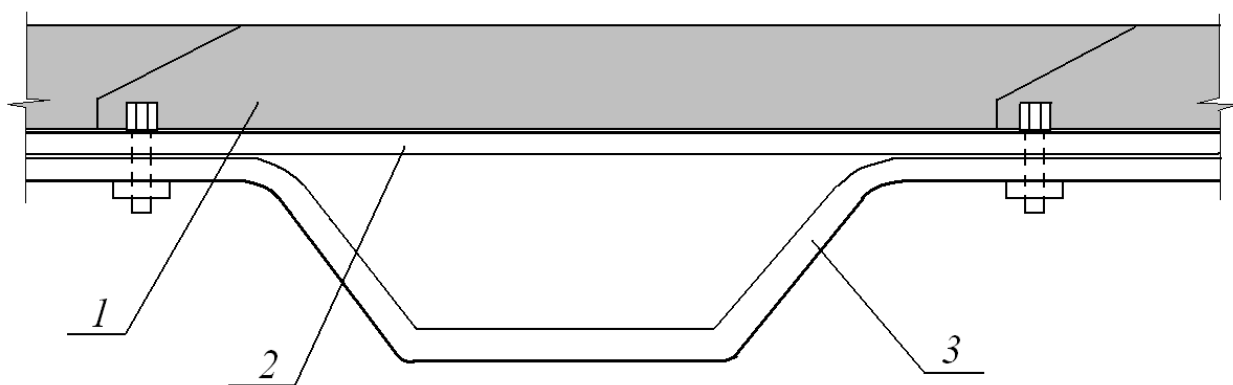


Рис. 3.6. Схема крепления РФП:

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

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

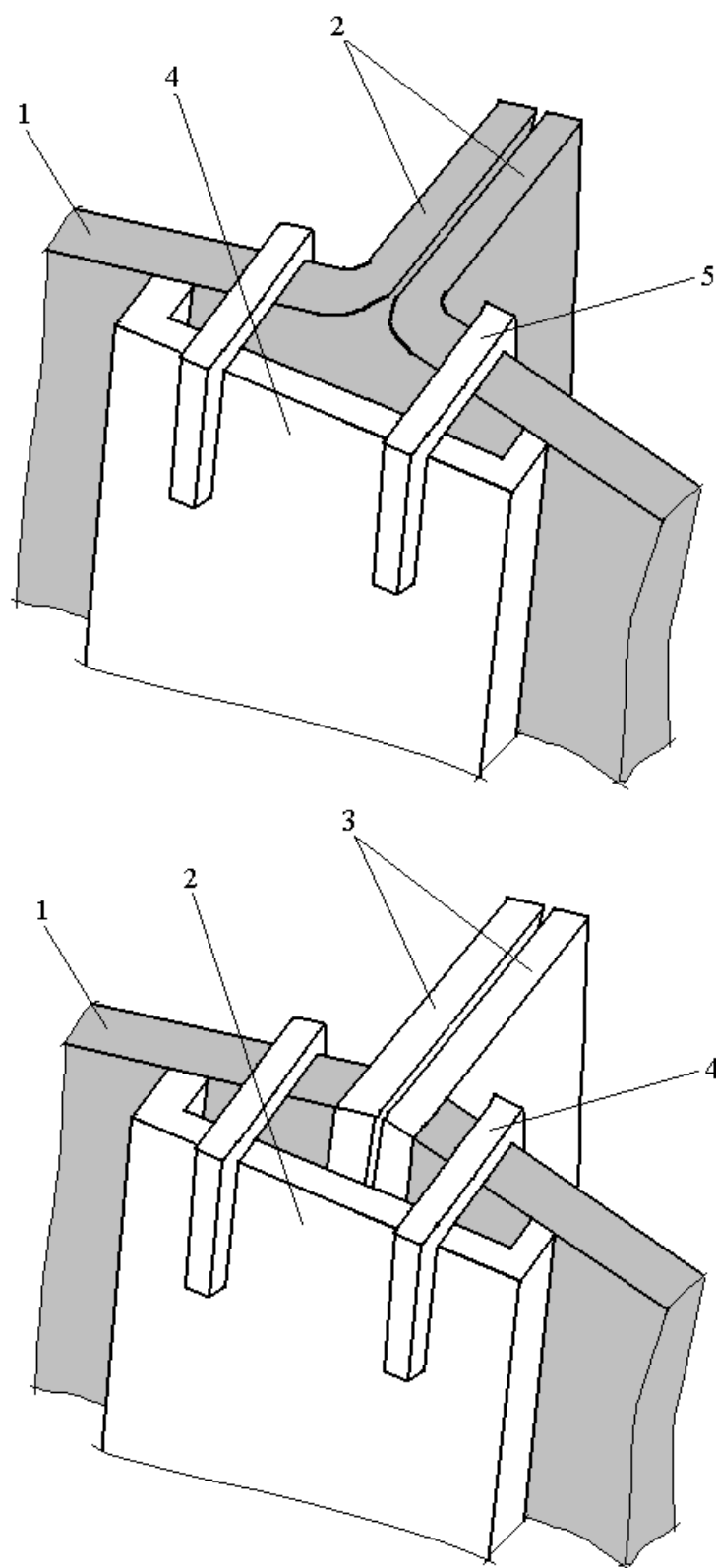
циевидной – для нижней пирамидальной части емкости. Однако, конструктивно они оказываются совершенно тождественны.

Соединение панелей между собой выполняется на высокопрочных болтах, диаметр которых на 3 - 4 мм меньше диаметра отверстий в обвязочных элементах панелей. 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 [188 – 191].

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. 3.7. 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. 3.8).

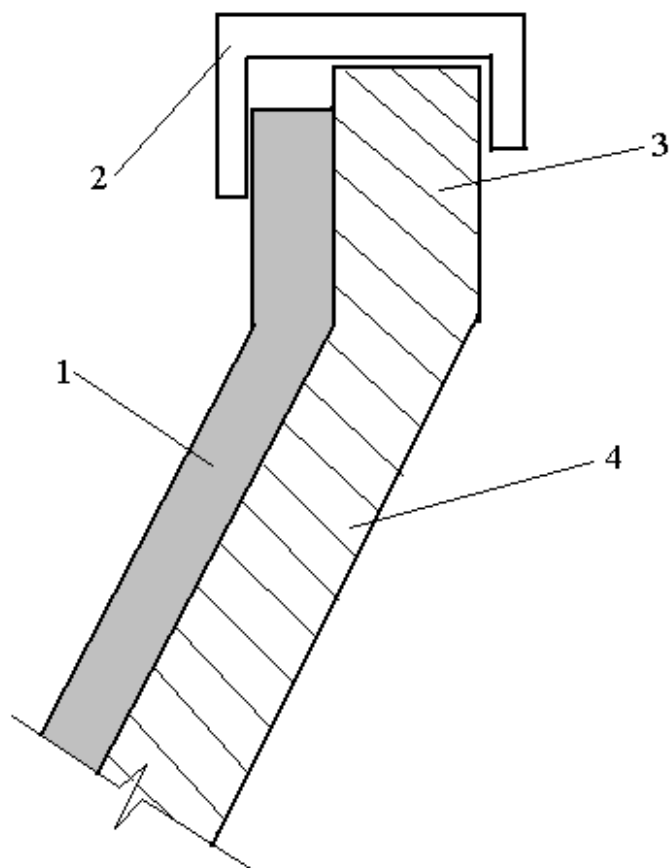
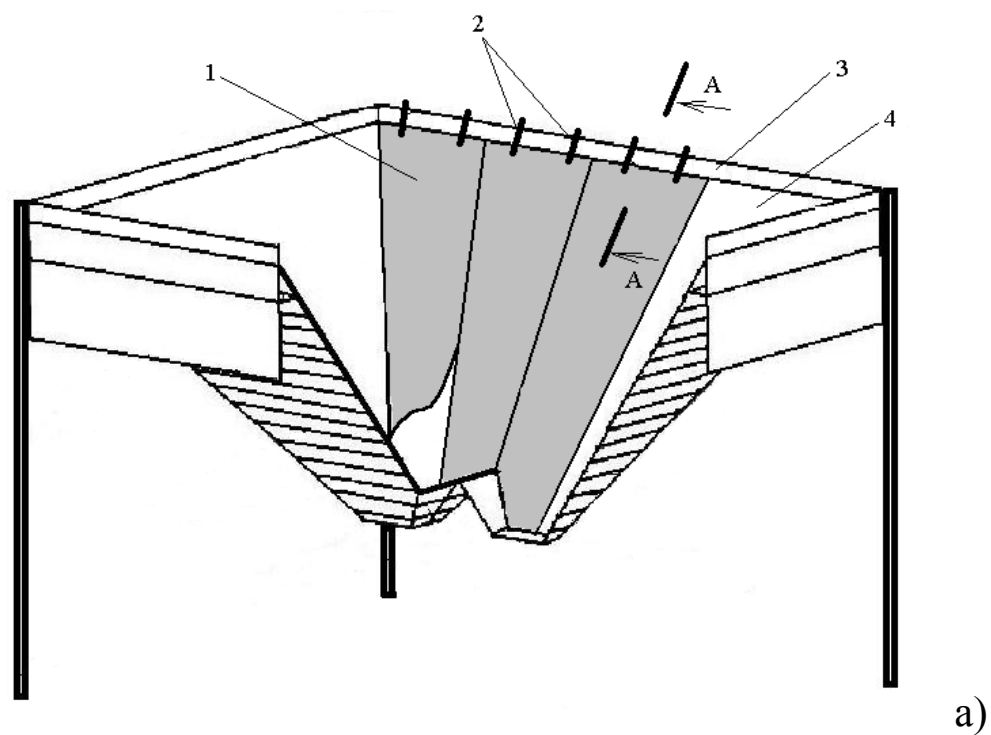
Таким образом, разработанная автором панельная конструктивная схема жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов, оказывается лишенной большинства недостатков, присущих традиционной конструктивной схеме и, кроме этого, имеет ряд существенных преимуществ, среди которых следует отметить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



**Рис. 3.7. Возможные варианты
вертикального узла соединения панелей:**

1 – несущий элемент панели, 2 – отгиб,
3 – дополнительный элемент,
4, 5 – навесной защитный вкладыш



**Рис. 3.8. Общий вид (а)
и схема расположения (б) навесной футеровки:**
1 – элемент навесной футеровки, 2 – крепящий захват,
3 – вертикальная часть емкости, 4 – наклонная часть емкости

- 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.

В целом же, по мнению автора, изложенный метод совершенствования конструкции емкостей путем использования стальных панелей, соединенных между собой высокопрочными болтами, свидетельствует о возможности существенного повышения уровня надежности и ремонтпригодности стальных емкостных конструкций.

Предложенные автором технические решения защищены декларационными патентами Украины [192 – 194] 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.

Раздел 4

Теоретические исследования работы емкостной конструкции

Как известно, любая новая идея может быть использована в практической деятельности человека, особенно такой ответственной, как создание строительных конструкций, лишь в том и только в том случае, если последствия от ее внедрения могут быть прогнозируемы. Изложенная в предыдущей главе авторская концепция панельной конструктивной схемы емкостной конструкции также не является исключением. Поэтому, в настоящем разделе приводится совокупность соображений теоретического плана, которые позволяют не только оценить характер и особенности работы панельной конструктивной схемы, но и емкостной конструкции вообще как таковой.

В разделе приведено также решение ряда частных теоретических задач, которые могут оказаться полезными при проведении практических расчетов стальных емкостных конструкций.

Section 4

Theoretical researches of working of capacity structure

As is generally known, any new idea can be used in practical activity of man, especially such responsible, as creation of building constructions, only in that case if the consequences of its introduction can be forecasted. The author's conception of the panel constructive scheme of capacity structures presented in the preceding section also is not an exception. That's why in this section the aggregate of theoretical considerations is presented. They allow not only to estimate character and features of work of the panel constructive scheme, but also to the capacity structure in general as such.

In the section the solving of row of private theoretical tasks is also presented, which can appear useful during conducting of practical calculations of steel capacity structures.

4.1. Существующие аналитические подходы

Расчет вертикальной жесткой стальной емкости для сыпучих материалов – достаточно сложный процесс, который включает анализ работы пространственных тонких оболочек и оребренных 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 [37 – 47].

В соответствии с этим ряд теоретических исследований был направлен на уточнение применявшихся плоских расчетных схем отдельных элементов конструкции емкости. Наиболее известны работы в этом направлении принадлежат уже упоминавшейся Ленинградской школе инженеров, которые пошли путем повышения несущей способности элементов конструкции за счет учета их пластичной работы [175 – 178]. Результаты их работы были включены в рекомендации современных справочников по вопросам проектирования емкостных конструкций [42, 43].

К этому же направлению относится и работа [195], которая однако не была доведена до практически приемлемого способа расчета.

Достаточно интересной, по мнению автора настоящей монографии, является работа [196], которая, к сожалению, не получила своего логического продолжения.

Постепенно все больше становилось понятным, что исследование 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 отказы и аварии конструкций.

Это направление достаточно активно начало разрабатываться одним из современных теоретических исследователей бункерных емкостей Х. Ягофаровым, чьи работы уже упоминались в ходе предыдущего изложения [60, 117]. Ему удалось частично решить проблему учета пространственной работы конструкции пирамидально-призматического бункера за счет использования вертикаль-

ной жесткости стенок воронки [197 - 201]. Однако она предусматривает постановку снова-таки подкрепляющих ребер жесткости.

Широкое распространение в конце XX века одного из современных численных методов строительной механики – метода конечных элементов (МКЭ) [202 – 210] – открыло новые возможности для исследователей. С его помощью начали рассчитываться множество сложных пространственных конструкций, аналитическое описание работы которых оказывалось затруднительным [211 – 222].

Приоритет, по данным автора настоящей монографии, в использовании МКЭ к моделированию емкостных конструкций для сыпучих материалов принадлежит работе [223], в которой исследователи анализировали действие температурных воздействий на бункерные сооружения.

В своей кандидатской диссертационной работе автор настоящей монографии впервые использовал МКЭ для установления закономерностей пространственной работы стальных бункерных емкостей [140] 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 [118, 173]. 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 [224] проанализирован целый элеваторный комплекс и установлены закономерности распределения усилий в его несущих элементах.

4.2. Численные исследования

МКЭ в настоящее время оказывается, пожалуй, единственным приемлемым методом, позволяющим не только учесть пространственность работы сложных строительных сооружений, которыми являются 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 автор настоящей монографии использует его уже на протяжении довольно значительного периода времени, то именно МКЭ был выбран для проведения дальнейших численных исследований. При этом использовался один из достаточно мощных и современных проектно-вычислительных комплексов, практически реализующих МКЭ, - комплекс SCAD for Windows [225, 226]. Заметим, что этот комплекс оказался единственным из всех представленных на рынке программных продуктов, позволивших обеспечить проводимые автором исследования в полном объеме.

4.2.1. Работа отдельной панели

Прежде всего, необходимо представить работу отдельной панели, 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 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 – 4×6 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 [129 – 140].

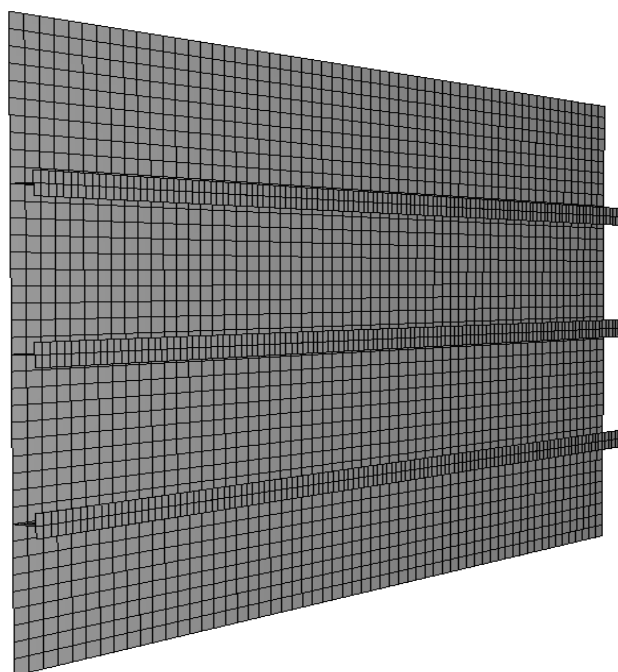
На рис. 4.1 приведено напряженно-деформированное состояние (НДС) фрагмента оребренной стенки традиционной конструкции. Видно, что оно отличается достаточно высокой неравномерностью с наличием четких зон локальной концентрации напряжений. Более темным участкам на данном рисунке соответствуют зоны с более высоким уровнем напряжений. Приведенные в табл. 4.1 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. 4.2. Видно, что несущая способность такой панели оказывается ниже, чем в предыдущем случае (см. табл. 4.1).

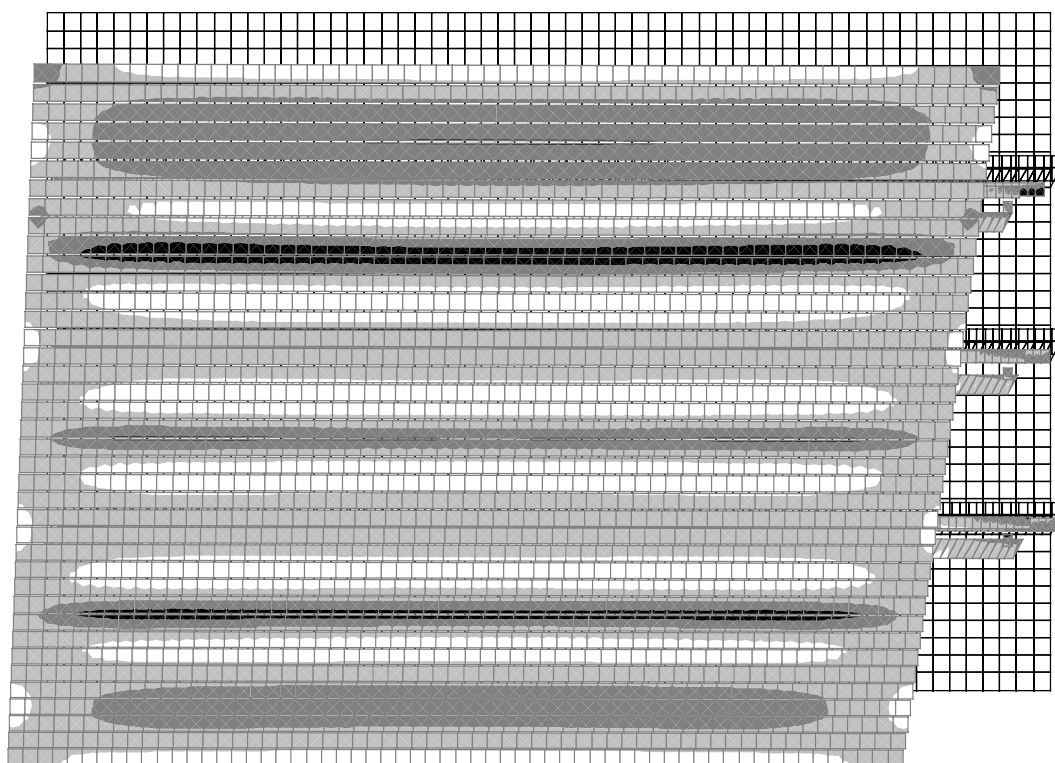
Поэтому, такой одиночный гофрированный лист был дополнительно усилен плоским листом, располагаемым с внутренней стороны (со стороны приложения внешней нагрузки) и при этом появилась возможность уменьшить толщину гофрированного листа в два раза. Таким образом, масса получившегося пакета осталась практически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

Однако, полученная картина напряженного состояния (рис. 4.3) 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. 4.4. Сравнивая этот конструктивный вариант панели с первоначальным (рис. 4.1) возможно констатировать, что показатели напряженно-деформированного состояния для такой панели значительно ниже, при практически одинаковой массе (см. табл. 4.1).



a)



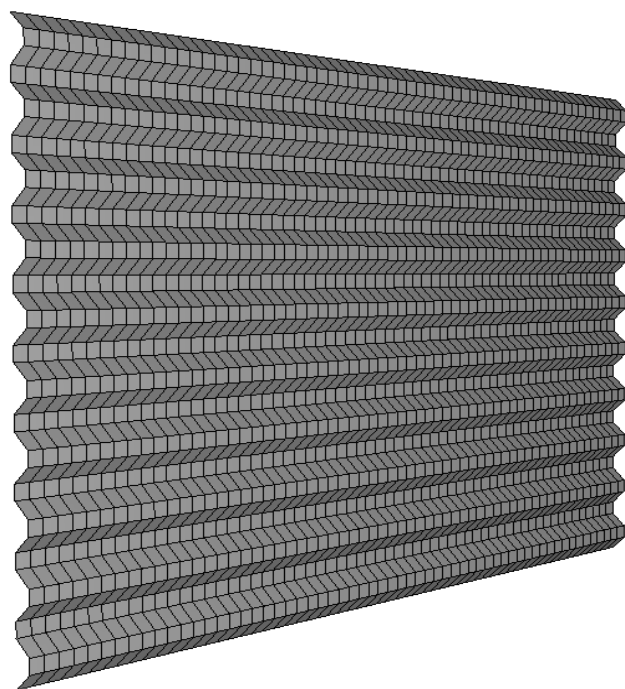
1,57 111,95
111,95 222,33

222,33 332,71
332,71 443,09

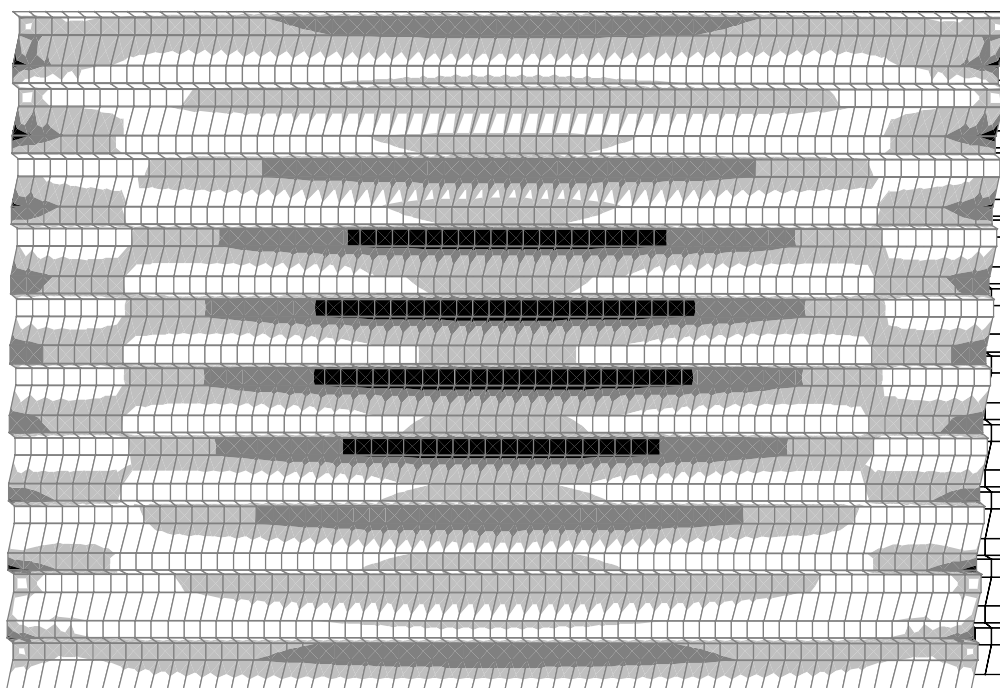
Внешний слой NE4 Н/мм2 Загружение 1

б)

Рис. 4.1. Внешний вид (а) и напряженное состояние (б) панели традиционной конструкции с ребрами жесткости



а)



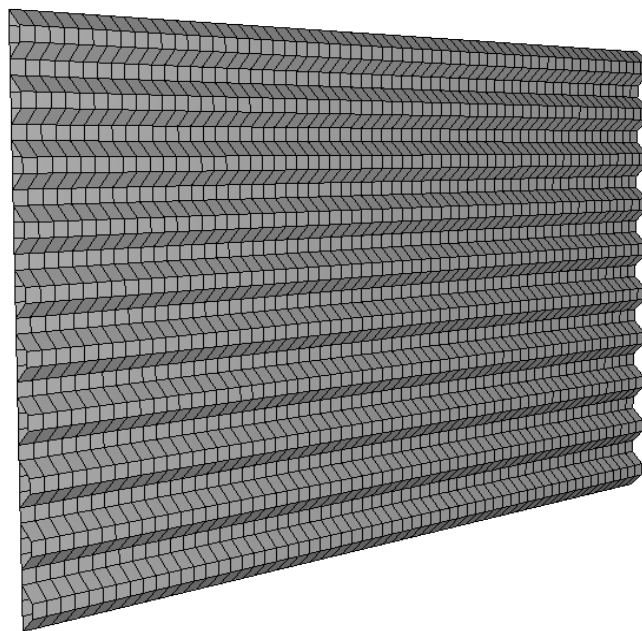
4,18 128,71
128,71 253,24

253,24 377,77
377,77 502,3

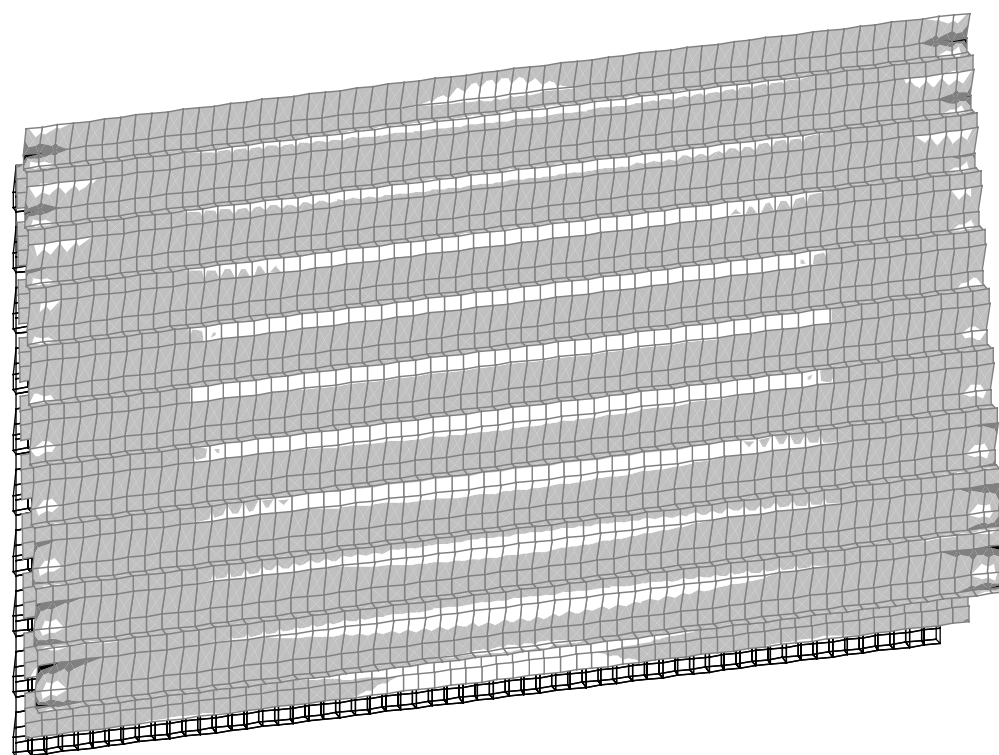
Внешний слой NE4 Н/мм2 Загружение 1

б)

Рис. 4.2. Общий вид (а) и напряженное состояние (б) панели из гофрированного листа



a)



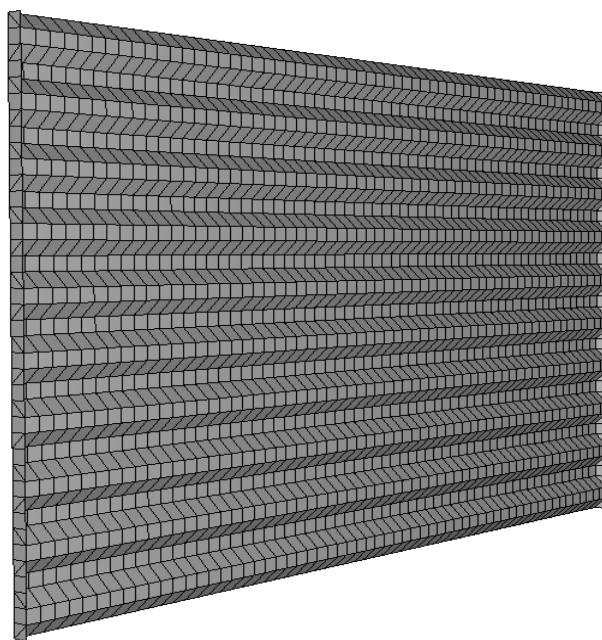
-452,94 21,05
 21,05 495,05

495,05 969,04
 969,04 1443,03

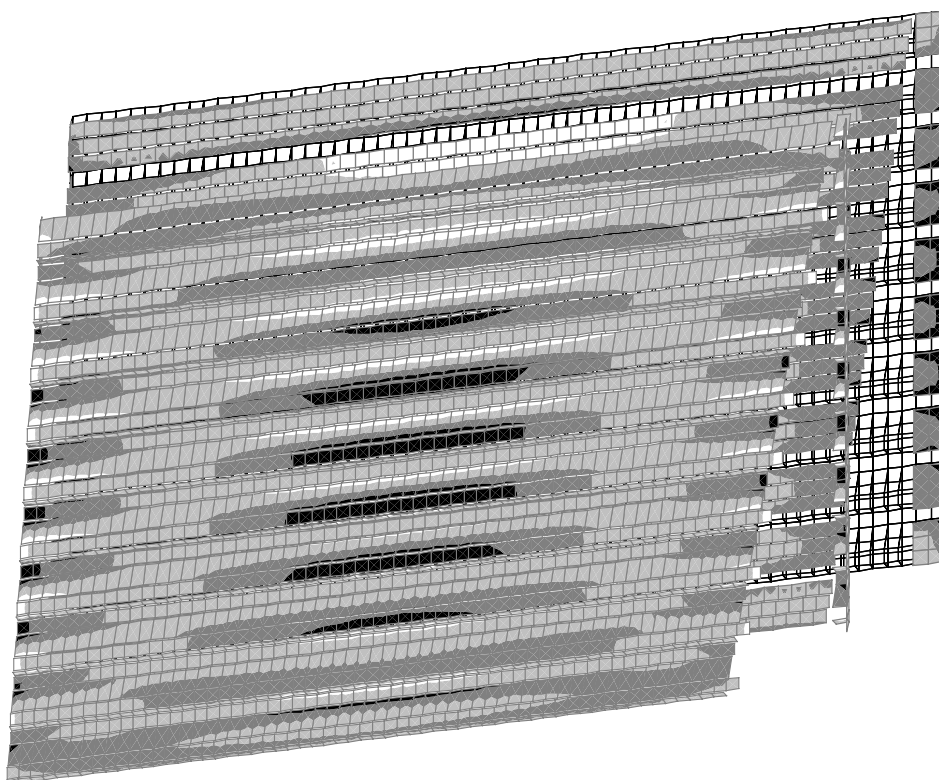
Внешний слой S1 Н/мм2 Загружение 1

б)

Рис. 4.3. Общий вид (а) и напряженное состояние (б) панели из гофрированного листа с подкрепляющим плоским листом



a)



-112,22 -28,6
 -28,6 55,03

55,03 138,65
 138,65 222,28

Внутренний слой S1 Н/мм² Загружение 1

б)

Рис. 4.4. 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 жесткой 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 разделе 3 настоящей монографии.

4.2.2. 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, предлагавшихся 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 [47]: размеры емкости в плане 6×6 м, высота вертикальной части 2 м, высота наклонной части 4,6 м, кут наклона боковых стенок нижней части 60°. 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:

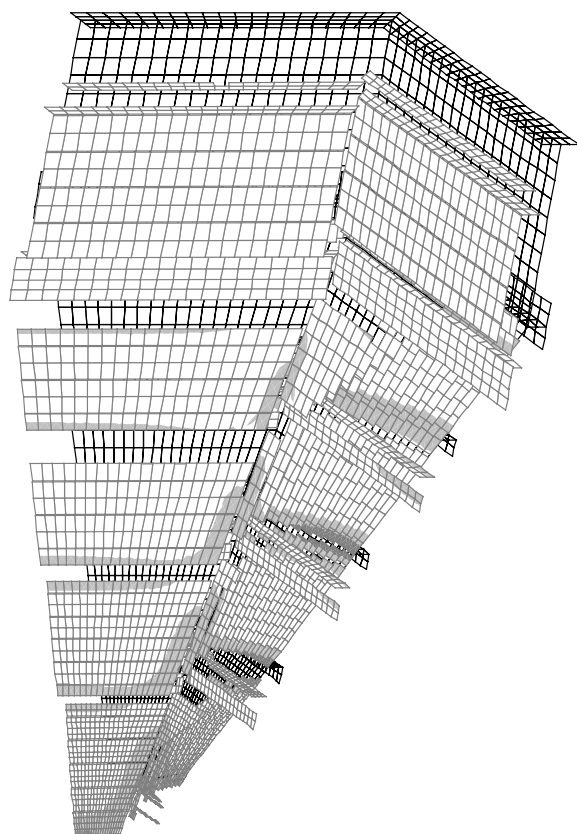
- вариант № 1 (базовый) представлял собой емкость с горизонтальной ориентацией ребер жесткости, соответствующий традиционно принятой конструктивной схеме. Толщина стенки была принята 6 мм, подкрепляющие ребра выполнялись из уголка 140×140×9 мм. Общая масса емкости - 9020 кг;

- 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 250×250×4 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 450×100×4 мм. Общая масса емкости - 9180 кг.

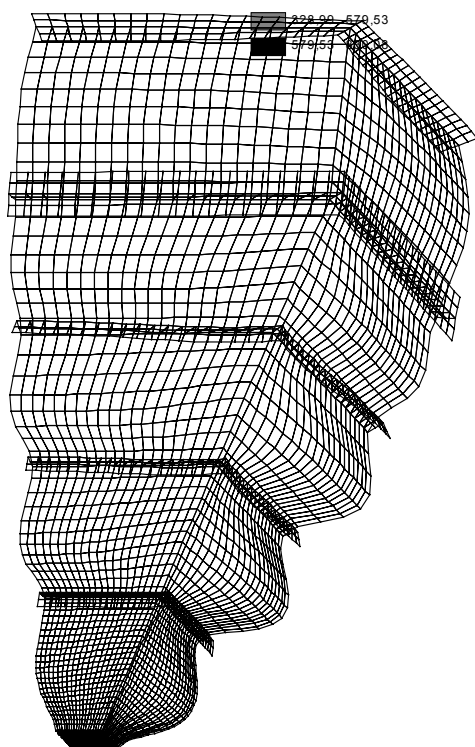
На рис. 4.5 – 4.8 приведены полученные картины напряженно-деформированного состояния для всех четырех рассматриваемых конструктивных вариантов бункерной емкости. В ходе расчетов рассматривалась четверть модели емкости с заданием соответствующих граничных условий симметрии деформаций по краям. Опираемость емкостей моделировалось для всех конструктивных вариантов однотипно – постановкой в угловой зоне шарнирной опоры, имитировавшей угловой опорный элемент. Расчет выполнялся в геометрически нелинейной постановке.



a)

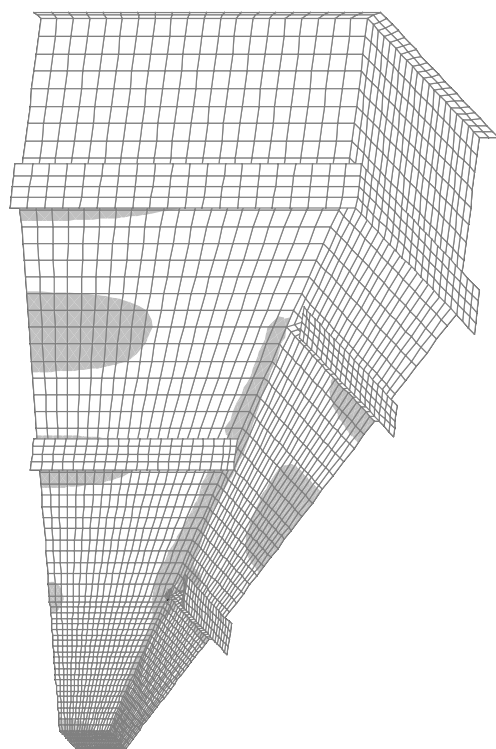
-172,09 78,45
78,45 328,99

Внутренний слой S1 Н/мм2 Загружение 1



б)

**Рис. 4.5. Картина распределения напряжений (а)
и картина деформаций (б)
для конструктивного варианта № 1**

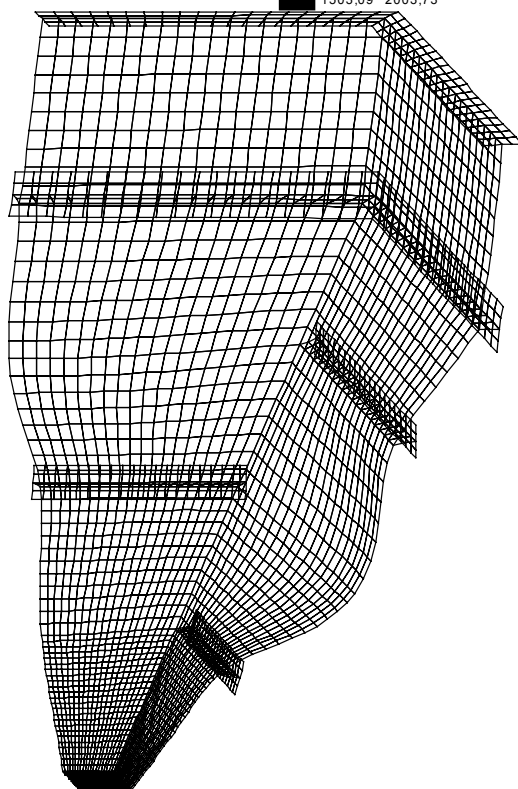


a)

1,16 501,81
501,81 1002,45

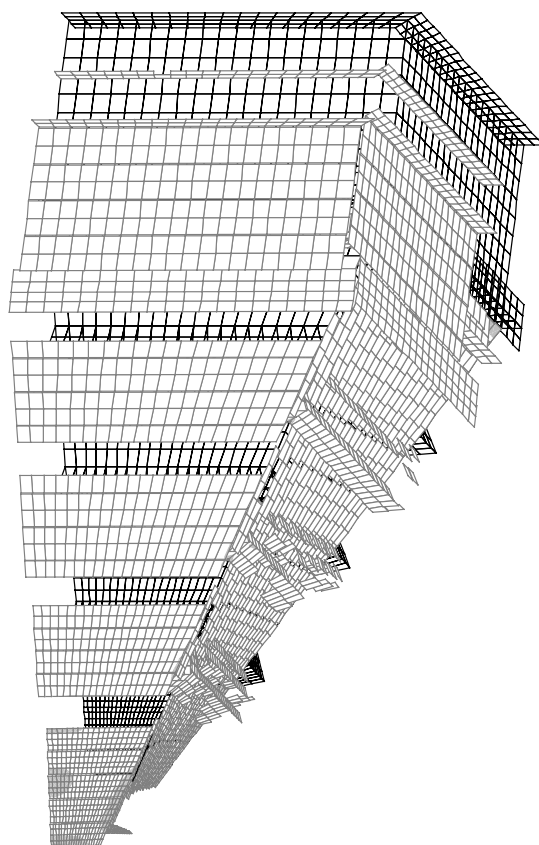
1002,45 1503,09
1503,09 2003,73

Внутренний слой NE4 Н/мм² Загружение 1



б)

**Рис. 4.6. Картина распределения напряжений (а)
и картина деформаций (б)
для конструктивного варианта № 2**

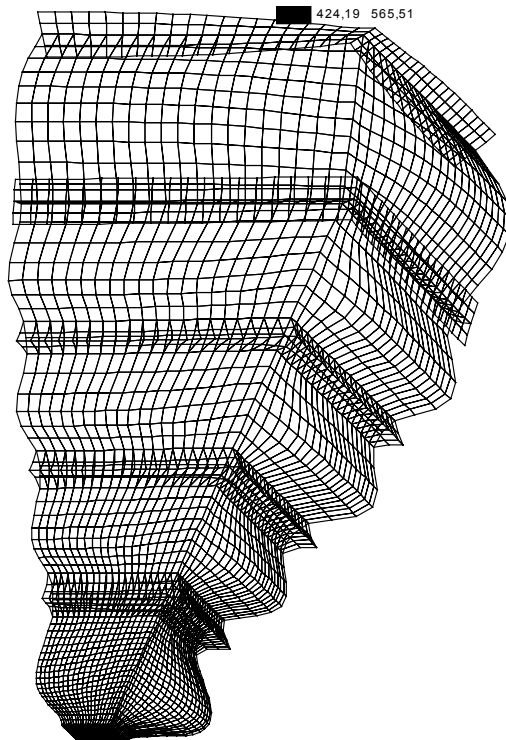


a)

0,25 141,57
141,57 282,88

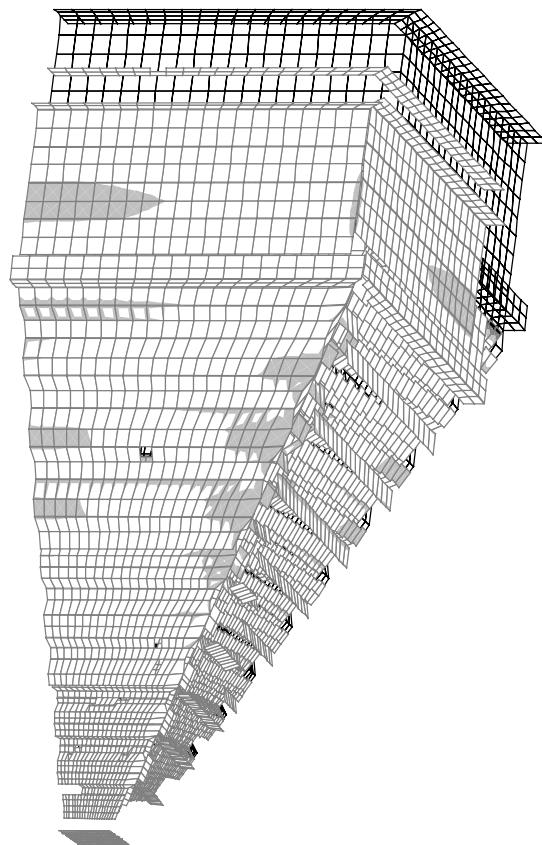
282,88 424,19
424,19 565,51

Внутренний слой NE4 Н/мм2 Загружение 1



б)

**Рис. 4.7. Картина распределения напряжений (а)
и картина деформаций (б)
для конструктивного варианта № 3**

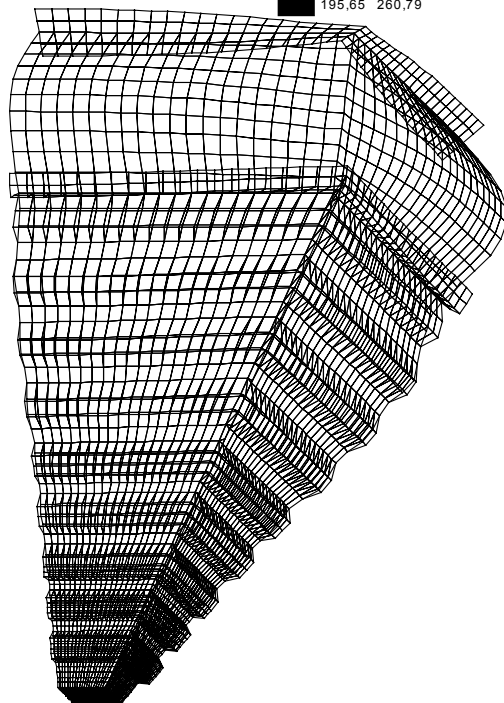


a)

0,25 65,38
65,38 130,52

130,52 195,65
195,65 260,79

Внутренний слой NE4 Н/мм2 Загружение 1



б)

**Рис. 4.8. Картина распределения напряжений (а)
и картина деформаций (б)
для конструктивного варианта № 4**

Под буквой «а» на этих рисунках приведены поля распределения эквивалентных напряжений по 4-й 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 4.2 приведены значения полученных напряжений и деформаций в наиболее характерных точках для каждого из конструктивных вариантов.

Таблица 4.2

**Параметры НДС
конструктивных вариантов**

Конструктивный вариант	Эквивалентные напряжения (МПа) в				Наибольший прогиб стенки, мм
	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.

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 удастся 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, замечен повышенный уровень концентрации напряжений.

Таким образом, предложенная автором 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.

4.3. Замечания о работе узловых соединений

Практическая реализация предлагаемой авторской конструктивной панельной схемы предполагает устройство соединения отдельных панелей с помощью высокопрочных болтов. При этом, как показывают проведенные исследования, работа такого соединения аналогична работе фланцевого соединения в условиях трехосного напряженного состояния.

Работа фланцевых соединений в условиях одноосного напряженного состояния исследована достаточно подробно. Имеются разработанные практические рекомендации на данную тему [188 – 190]. При этом практический опыт их многолетней эксплуатации подтверждает достаточно высокую эффективность и долговечность таких соединений при условии качественного выполнения их в процессе монтажа и сборки конструкций.

Проводившиеся исследование работы фланцевых соединений на высокопрочных болтах в условиях двухосного напряженного состояния свидетельствуют о том, что такое соединение имеет более высокие показатели прочности и долговечности по отношению к случаю одноосного напряженного состояния [227 - 231]. При этом отмечается, что в условиях трехосного приложения усилий эффективность работы соединений такого типа, также, существенно повышается.

В связи с этим следует констатировать практическую возможность и целесообразность использования таких фланцевых соединений для рассматриваемых стальных емкостных конструкций. Хотя, безусловно, достаточный интерес представляло бы отдельное изучение закономерностей и особенностей их работы в подобных условиях.

4.4. Частные теоретические задачи

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

4.4.1. Определение степени совместимости работы обшивки с ребром жесткости

Задача определения степени совместимости работы обшивки с жестко соединенным ребром жесткости имеет самостоятельное практическое значение, поскольку во многих случаях, включая, например, и действующий подход к расчету емкостных конструк-

ций, ребро может рассматриваться как отдельный конструктивный элемент реберной панели.

Данный вопрос исследовался рядом специалистов [232 - 237], 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 [59] или в более поздних работах – 30 [42 - 47]. Это вносит некоторое разночтение процесс проектирования. Поэтому данная задача была исследована автором настоящей монографии, 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 4.9 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 определяем в количестве толщин пластины $k \cdot t$, где k - и есть искомый параметр.

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. 4.9 показано более темным цветом) в общем 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 (4.1):

$$c_1 = \frac{0,5 \cdot k \cdot t^3 + h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t) + b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t)}{k \cdot t^2 + h \cdot s + b \cdot d}, \quad (4.1)$$

где все обозначения размеров приведены по рис. 4.9.

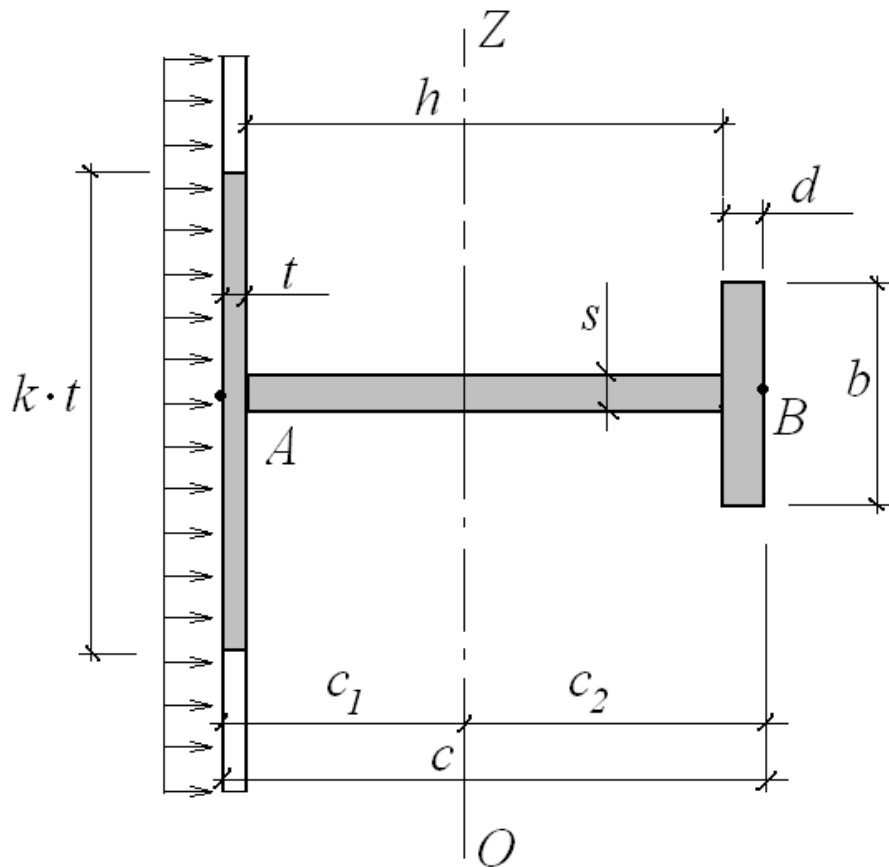


Рис. 4.9. Совместимая работа пластины с ребром жесткости

Из этого выражения легко можно получить выражение для определения параметра k (4.2):

$$k = \frac{h \cdot s \cdot (0,5 \cdot h + t - c_1) + b \cdot d \cdot (0,5 \cdot d + h + t + c_1)}{t^2 \cdot c_1 - 0,5 \cdot t^3}. \quad (4.2)$$

В этом выражении остается одна неизвестная величина – расстояние до центра тяжести c_1 . Его, в свою очередь, можно определить, зная уровень напряжений в точках A и B сечения - σ_A и σ_B . Именно их комбинация и определит величину параметра k .

В свою очередь, напряжение σ_A и σ_B можно найти, используя численные расчеты. Построенная конечно-элементная модель представляла собой пластину, подкрепленную ребрами жесткости (рис. 4.10). 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.

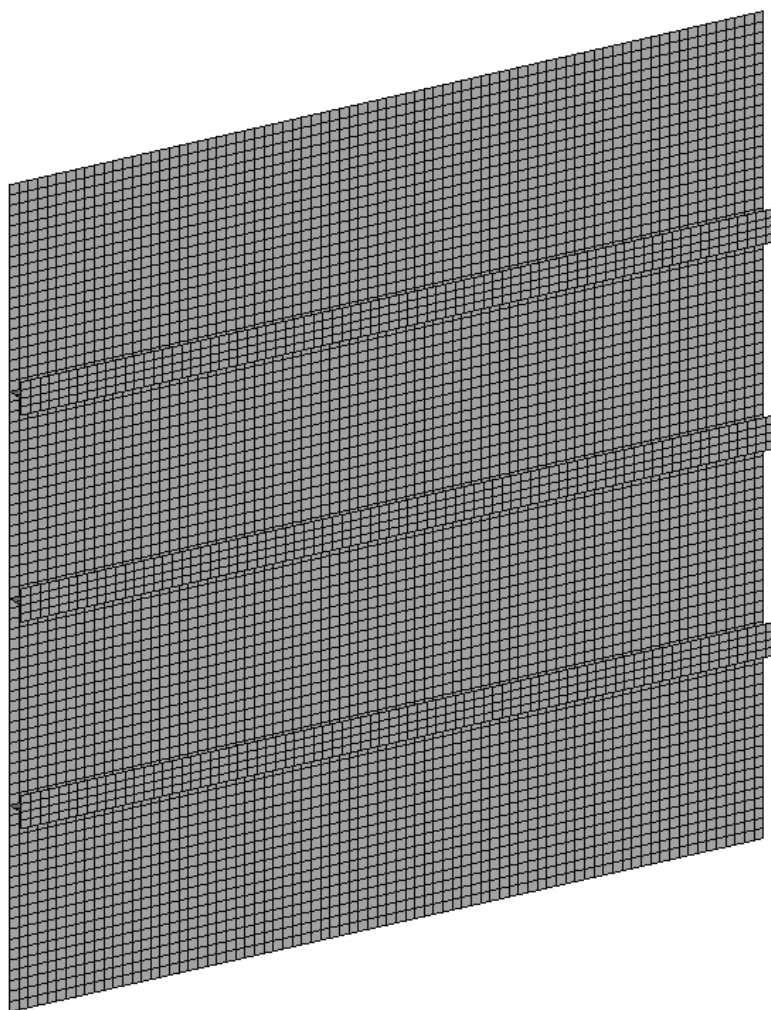


Рис. 4.10. Расчетная модель пластины, подкрепленной ребром жесткости

Основная сложность при определении 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.

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 (4.3) и (4.4) определялась составляющая от изгиба в плоскости расположения ребра жесткости M_z^{lin} согласно выражению (4.5):

$$M_x = -D \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) = M_x^{lin} + \mu \cdot M_z^{lin}, \quad (4.3)$$

$$M_z = -D \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) = M_z^{lin} + \mu \cdot M_x^{lin}, \quad (4.4)$$

$$M_z^{lin} = \frac{M_z - \mu \cdot M_x}{1 - \mu^2}, \quad (4.5)$$

где μ - 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 (4.6) и (4.7), соответственно:

$$\sigma_A = \frac{M_{Az}^{lin}}{I} \cdot c_1, \quad (4.6)$$

$$\sigma_B = \frac{M_{Bz}^{lin}}{I} \cdot c_2, \quad (4.7)$$

где I – момент инерции условной балки.

Учитывая, что $c_1 + c_2 = c$, из выражений (4.6) и (4.7) можно получить выражение для определения расстояния c_1 в виде (4.8):

$$c_1 = \frac{\sigma_A \cdot M_{Bz}^{lin}}{\sigma_A \cdot M_{Bz}^{lin} + \sigma_B \cdot M_{Az}^{lin}} \cdot c. \quad (4.8)$$

Подставляя найденное таким образом расстояние c_1 в выражение (4.2), 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. 4.3.

Таблица 4.3

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

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.

Для случая соотношения конструктивных параметров, выделенного в табл. 4.3 более темным цветом, в ходе экспериментальных исследований [238] 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.

4.4.2. Оптимизация формы ребра жесткости

В предыдущем подразделе настоящей монографии было установлено, 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 , подкреплённая ребром жесткости замкнутого профиля (для конкретности на рис 4.11 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.

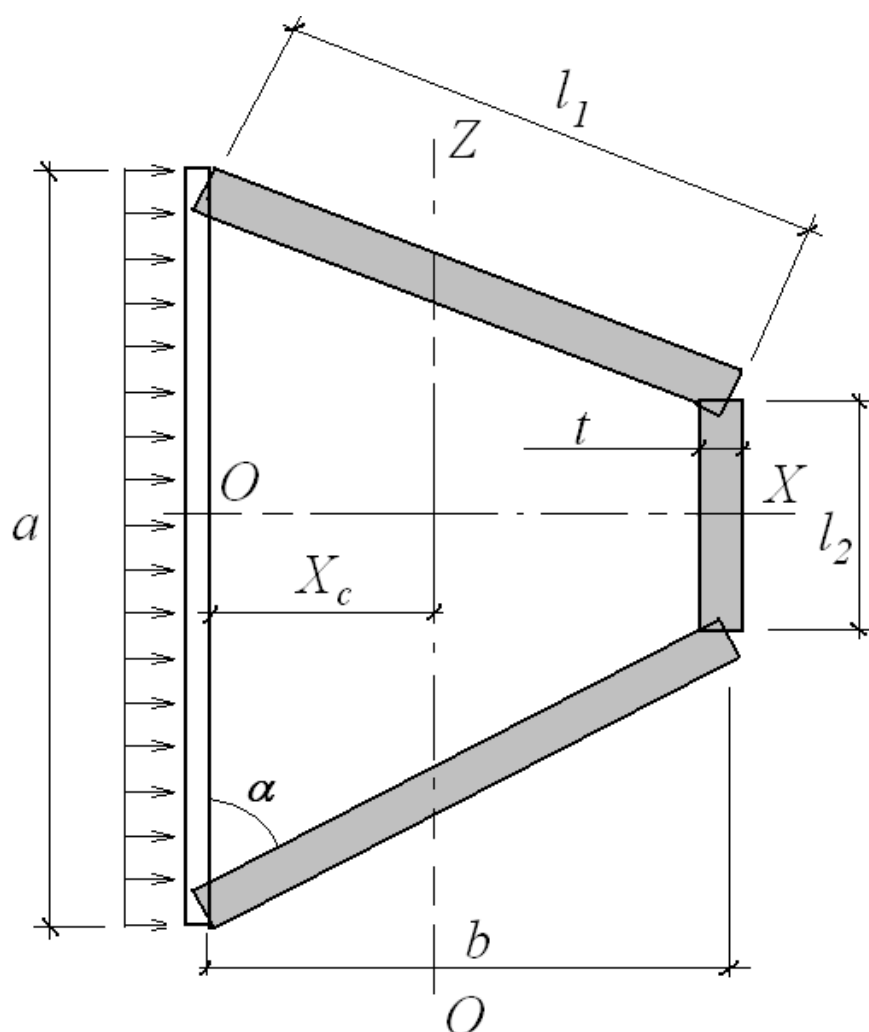


Рис. 4.11. Ребро жесткости в виде трапеции

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 (4.9):

$$X_c = \frac{(l_1^2 + l_1 \cdot l_2) \cdot \sin \alpha}{2 \cdot l_1 + l_2}, \quad (4.9)$$

где принятые обозначения геометрических размеров отдельных частей поперечного сечения ребра соответствуют представленным на рис. 4.11.

Далее может быть найден центральный момент инерции, который в рассматриваемом случае одновременно будет и главным, согласно выражению (4.10):

$$I_{zc} = \frac{2 \cdot A_0 \cdot t \cdot l_1^3 \cdot \sin^2 \alpha - 3 \cdot t \cdot l_1^4 \cdot \sin^2 \alpha}{3 \cdot A_0}, \quad (4.10)$$

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_l или угол их наклона α . Эти два критерия определяют форму поперечного сечения ребра жесткости.

В первом случае математическое условие будет иметь вид выражения (4.11):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial l_1} = 0. \quad (4.11)$$

Найденное при этом решение будет иметь вид выражений (4.12) и (4.13):

$$l_1 = \frac{A}{2 \cdot t}, \quad (4.12)$$

$$l_2 = 0. \quad (4.13)$$

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 (4.14):

$$\frac{\partial I_{zc}}{\partial (\sin \alpha)} = 0. \quad (4.14)$$

В соответствии с этим условием можно получить два решения. Первое будет иметь вид выражений (4.15) и (4.16):

$$l_1 = \frac{2 \cdot A}{3 \cdot t}, \quad (4.15)$$

$$l_2 = -\frac{A}{3 \cdot t}. \quad (4.16)$$

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

Второе решение определится выражением (4.17):

$$\alpha = 0. \quad (4.17)$$

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 (4.18) и его внешнего периметра (4.19), можно прийти к следующему выводу:

$$A = 2 \cdot l_1 \cdot t + l_2 \cdot t, \quad (4.18)$$

$$P = 2 \cdot l_1 + l_2 \quad (4.19)$$

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.

4.4.3. 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. 4.12).

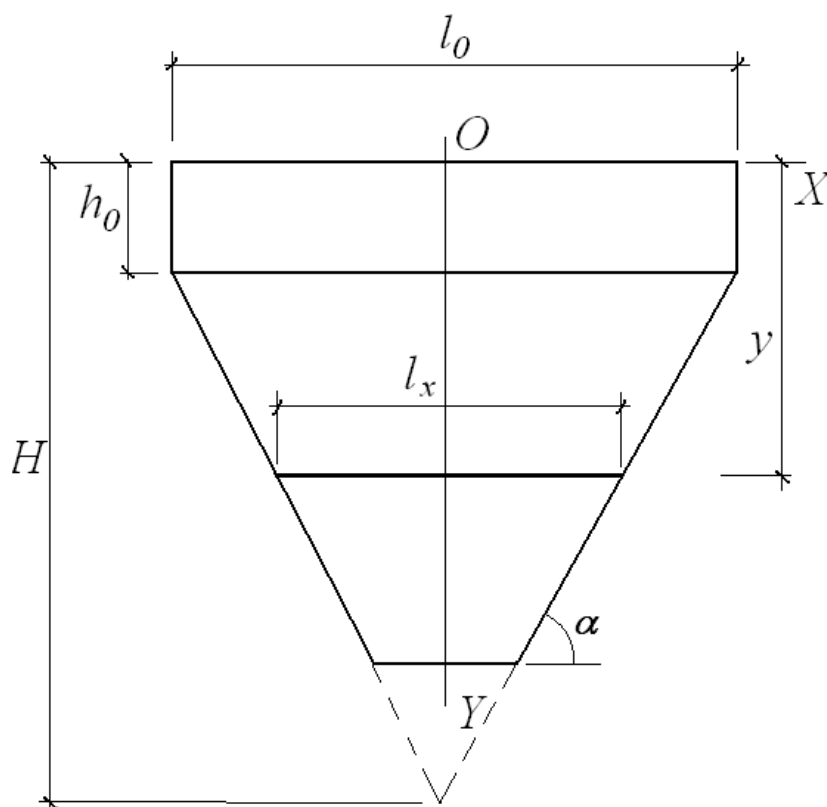


Рис. 4.12. Емкостная конструкция

В соответствии с традиционным подходом изгибающий момент M_x в произвольном горизонтальном ребре длиной l_x определится выражением (4.20):

$$M_x = P_x \cdot l_x / R, \quad (4.20)$$

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 (4.21):

$$P_x = C \cdot y, \quad (4.21)$$

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

Длина ребра на глубине y может быть найдена согласно выражению (4.22):

$$l_x = l_0 - 2(h_0 - y) \cdot \operatorname{ctg} \alpha, \quad (4.22)$$

где принятые обозначения геометрических размеров соответствуют приведенным на рис. 4.12.

Подставив выражения (4.21) и (4.22) в выражение (4.20), взяв первую производную по переменной y и приравняв ее нулю, получим следующие точки экстремума для изгибающего момента по высоте емкости (4.23) и (4.24):

$$y_1 = h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (4.23)$$

$$y_2 = (h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha) / 3. \quad (4.24)$$

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. 4.13,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 (4.25):

$$y_2 = (h_0 + 0,5 \cdot l_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha) / 2, \quad (4.25)$$

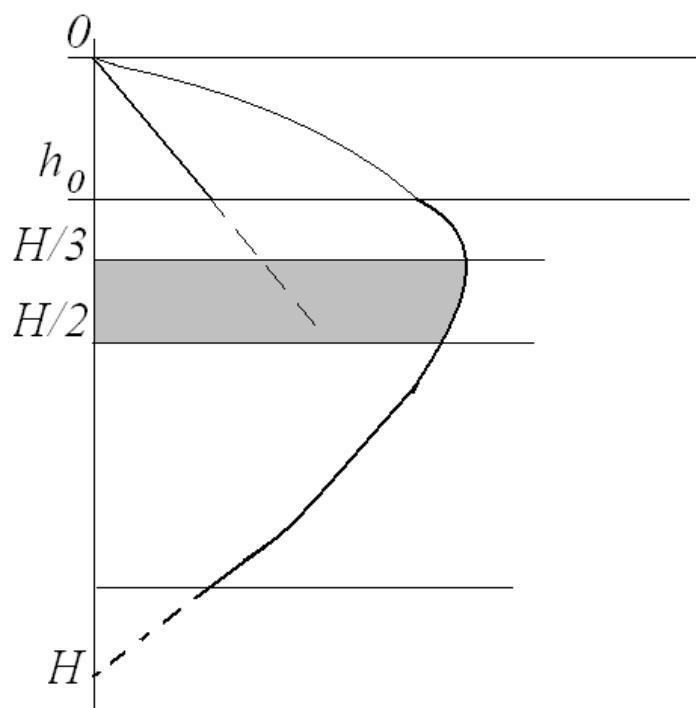
то есть будет отвечать точке, расположенной на уровне половины полной высоты мнимой пирамиды нижней наклонной части емкости.

Характер изменения величины продольной силы N_x по высоте емкости приведен на рис. 4.13,б.

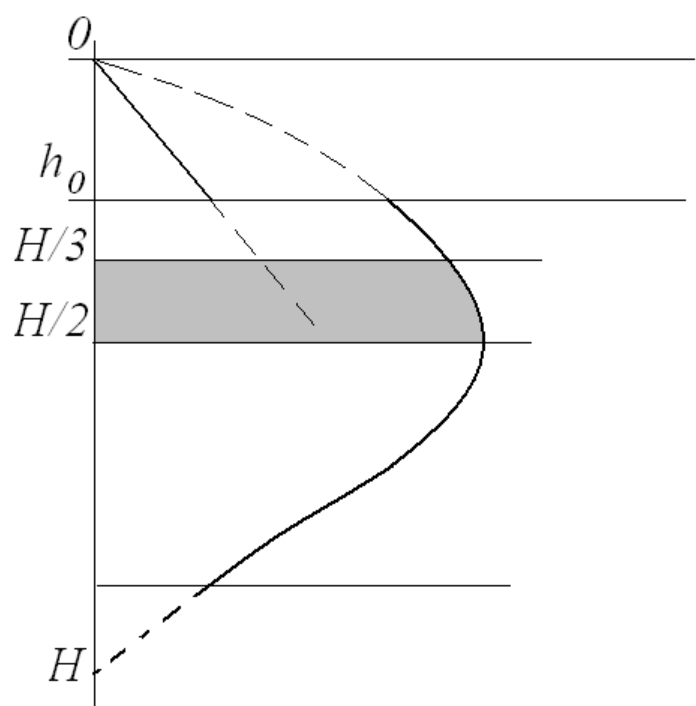
Таким образом можно констатировать, что наиболее опасной зоной с учетом одновременного действия изгибающего момента и продольной силы является зона, расположенная между 1/3 и 1/2 высоты полной мнимой пирамиды (на рис. 4.13 эта зона изображена более темным цветом). С учетом того, что растягивающие напряжения 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.

Как и в ряде предыдущих случаев, данная задача была проанализирована с использованием возможностей МКЭ. Расчет выполнялся для квадратной в плане емкости с размерами 6×6 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. 4.4. 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.



a)



б)

Рис. 4.13. Характер распределения изгибающего момента (а) и продольной силы (б) по высоте емкостной конструкции

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.

4.4.4. Определение динамических характеристик

Еще одной практически важной задачей является определение собственных динамических характеристик емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов. Отыскание собственных форм и частот колебаний всегда считалось важным направлением при исследовании любых строительных конструкций [239 - 241]. По отношению к емкостным строительным конструкциям для сыпучих материалов этот аспект исследований приобретает особое значение.

Во-первых, полученные теоретические значения собственных динамических характеристик могут быть использованы для проведения мониторинговых исследований конструкций с целью выявления скрытых дефектов и повреждений в них. Ведь наличие труднодоступных мест в сооружениях, выполненных согласно традиционной конструктивной схеме, отмечается многими специалистами

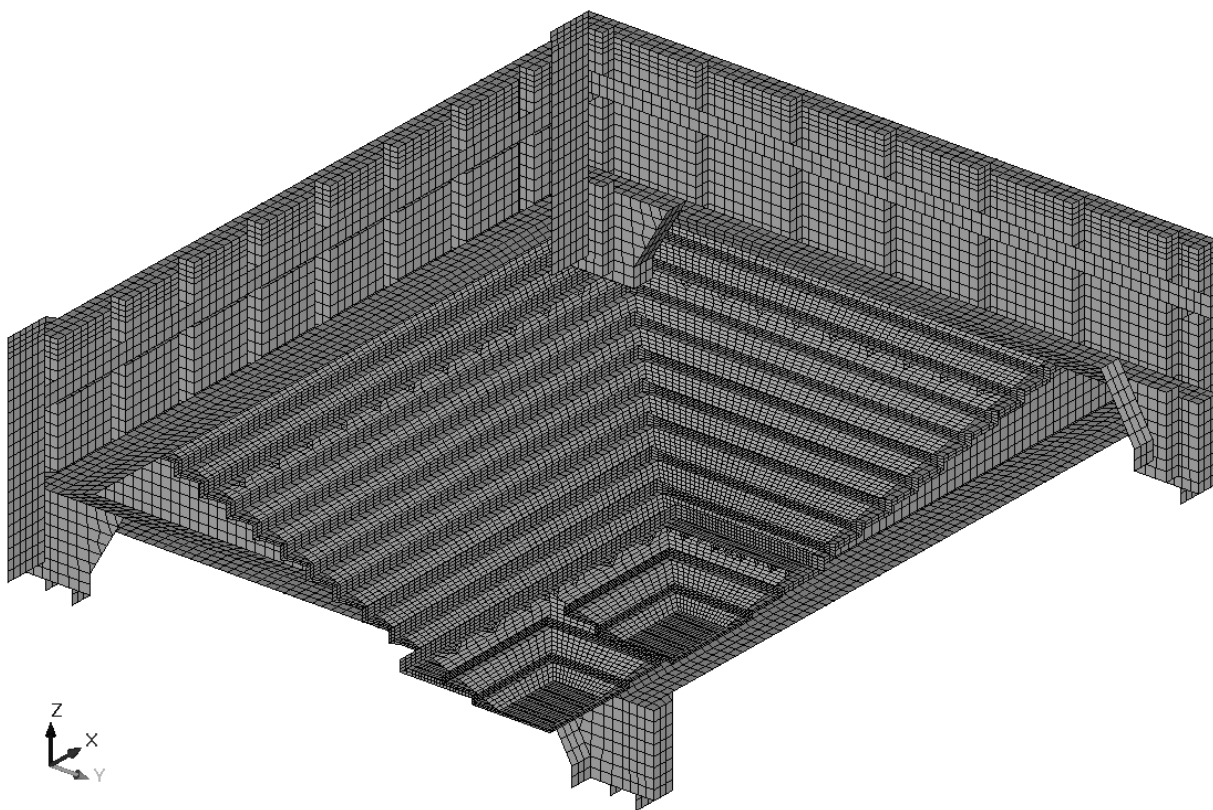
ми как их существенный недостаток. К тому же технологическая пыль достаточно часто сопровождает эксплуатацию емкостных конструкций практически для всех видов сыпучих материалов, поэтому визуальные отказы часто оказываются просто замаскированными.

В основу таких исследований может быть положен метод динамической интегральной диагностики, как это предложено, например, в работе [242], когда полученные по результатам динамических испытаний характеристики (собственные частоты и формы колебаний) сопоставляются с теоретическими значениями. Существенные отклонения при этом, особенно, нарастающие по своей величине от испытания к испытанию, могут сигнализировать об определенных проблемах в конструкции. Безусловно, проводить натурные исследования в случае малоразмерных емкостей окажется достаточно дорогим делом, однако для емкостей больших размеров, в которых особенно тяжело провести качественное визуальное обследование, такой подход будет очень полезным. Тем более, что технически для этого требуется наклейка всего 2 – 3 обычных тензодатчиков в определенных точках конструкции.

Вторым направлением использования собственных динамических характеристик может служить выбор более рационального конструктивного решения, как это рекомендовано, например, в работе [243]. При этом принимается во внимание, что динамические характеристики всегда являются более интегральным показателем, чем какие бы то ни было статические.

Практическое применение собственных динамических характеристик для емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов рассмотрим на примере большеразмерной бункерной емкости. Она имеет значительные габаритные размеры $15 \times 18 \times 9$ м и достаточно сложную конструкцию. К тому же ее объем превышает 1000 м^3 хранимых тяжелых сыпучих материалов.

Для моделирования, как и в предыдущих случаях, был использован МКЭ. Подготовленная конечно-элементная модель изображена на рис. 4.14. Она представляла собой модель полной конструкции (не ее четверти, как в ряде предыдущих случаев), поскольку требовалось определить полный спектр ее собственных динамических характеристик.



**Рис. 4.14. Компьютерная модель
большеразмерного емкостного сооружения**

Основные результаты динамического расчета для случая геометрически идеального конструктивного варианта приведены в работе [2]. Там же даны значения низших собственных частот колебаний для порожней емкости.

По результатам выполненных обследований в исследуемую модель были внесены основные повреждения, которые вызывали наибольшие опасения у специалистов. Таким образом были сформированы дополнительно три модели:

- модель № 1 – наличие коррозионных отверстий значительного размера в стенках обшивки емкости;
- модель № 2 – отсутствие ребра жесткости в наиболее нагруженной зоне конструкции на участке длиной 1,5 м;
- модель № 3 – разрыв в узле соединения вертикального конструктивного элемента несущей рамы емкости с горизонтальным элементом.

Полученные значения для первых низших частот приведены в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Частотный спектр по результатам моделирования

Конструктивный вариант	1-я частота, Гц	2-я частота, Гц	3-я частота, Гц
исходный	9,83	10,50	15,02
№ 1	9,48	10,11	15,02
№ 2	9,66	10,23	14,39
№ 3	7,17	8,52	12,11

Таким образом, первые два варианта повреждений оказываются не достаточно опасными, поскольку существенно не влияют на уровень изменения собственного частотного спектра конструкции. В третьем варианте изменение становится достаточно заметным, потому повреждение, которое ему соответствует следует обязательно ликвидировать до продолжения эксплуатации конструкции. В противном случае возникает риск развития аварийной ситуации, что и было отмечено специалистами.

Таким образом, теоретическое определение спектра собственных динамических характеристик емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов является мощным средством прогнозирования поведения емкостных сооружений во время эксплуатации и может быть использовано для проведения мониторинговых исследований.

Раздел 5

Практическое применение теории формообразования емкостной конструкции

Материал настоящего раздела является в определенном смысле ключевым для настоящей монографии, поскольку интегрально объединяет все то, о чем говорилось в предыдущих разделах. Акцент в изложении сделан на практической стороне применения рассмотренных ранее теоретических моделей и полученных результатов в непосредственной практической деятельности.

Section 5

Practical usage of shape-making theory of capacity structure

Material of the section is in certain sense key for the monograph, as the integral unites everything about what talked in the previous sections. An accent in exposition is done on the practical side of application of considered before theoretical models and got results in direct practical activity.

5.1. Сущность теории формообразования

Приведенные в предыдущих разделах настоящей монографии теоретические модели и рассуждения касаются различных аспектов совершенствования и модернизации существующих подходов и методов проектирования вертикальных жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. Каждый из этих аспектов, несомненно, имеет важное самостоятельное значение. Однако, еще более важное значение имеет их комплексное и системное использование.

В подразделе 1.4 настоящей монографии были оговорены основные направления, в которых следует развивать современную концепцию проектирования стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов. В разделах 2 – 4 работы были высказаны различные соображения, подкрепленные соответствующим теоретическим обоснованием. Данный, пятый раздел, является, в значительной степени интегральным, поскольку призван синтезировать изложенную информацию в единую концепцию.

Эта концепция была названа автором настоящей монографии теорией формообразования вертикальных жестких стальных конструкций для сыпучих материалов. И каждый из рассмотренных аспектов является некой ее частью, позволяющей в той или иной степени улучшить какие-либо свойства создаваемого емкостного сооружения.

Так, верный выбор геометрических размеров будущей конструкции на стадии ее проектирования позволяет избежать лишнего перерасхода материала. Применение панельной конструктивной схемы способствует уходу от ряда недостатков существующего решения и позволяет улучшить эксплуатационные показатели конструкции. Решение некоторых теоретических задач позволяет более обоснованно и грамотно осуществлять как процесс проектирования сооружения в целом, так и его эксплуатацию в дальнейшем. Сюда же следует причислить и авторские разработки в области изучения взаимодействия сыпучей среды с элементами емкостной конструкции, вошедшие в отдельную монографию [94]. Именно на их основе следует назначать внешнюю форму будущей конструкции.

5.2. Сущность инженерной методики формообразования

Приведенные в предыдущих разделах данной монографии результаты во многих случаях являются сугубо научными результатами. Однако в практике проектирования нужно использование не самих подобных результатов, а специальных рекомендаций, построенных на их основе. Потому возникает необходимость в своеобразной адаптации этих результатов к практическим потребностям, вместе с их обобщением и дополнительным переосмыслением. Так формируется инженерная методика формообразования вертикальных жестких стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов.

Ее подробное и детальное изложение представлено в специально разработанном автором настоящей монографии практическом пособии [244], ориентированном на непосредственное практическое применение. В данном же подразделе приведем лишь основные концептуальные положения разработанной инженерной методики.

Определение свойств сыпучего материала.

Процесс проектирования вертикальной жесткой стальной емкости для сыпучих материалов следует начинать не с определения ее геометрических размеров, как это рекомендует традиционный подход к проектированию, а с определения основных физико-механических свойств сыпучего материала, для хранения которого данная емкостная конструкция будет предназначаться. Ведь именно свойства сыпучего материала позволят в дальнейшем грамотно и эффективно избрать необходимые размеры и форму будущей конструкции.

Большинство необходимых характеристик сыпучих материалов являются достаточно известными и приведены во многих специализированных справочных изданиях [42 - 47]. Однако, к сожалению, эти данные не очень хорошо согласуются между собой. Поэтому в достаточно ответственных случаях рекомендуется выполнить предварительное практическое определение этих свойств. В менее важных случаях допустимо использовать наиболее распространенные значения таких характеристик.

После получения определенности со свойствами хранимого (или хранимых) сыпучего материала следует перейти к следующему этапу проектирования стальной емкостной конструкции.

Выбор внешней формы.

Этот этап начинается с определения необходимого объема хранимого сыпучего материала. Как правило, он задается инженерами-технологами, выдающими задание на проектирования.

Далее, исходя из габаритов предполагаемой площадки расположения емкостной конструкции и технологических возможностей по ее изготовлению, следует определиться с формой емкости в плане - круглая или квадратная. Принимать несимметричные или вытянутые формы не рекомендуется, поскольку это ведет к повышенному расходу стали.

После этого, определяют размер выпускного отверстия сооружения, который следует принимать не меньше, чем 10 размеров диаметра зерна сыпучего материала для предотвращения активных пульсаций во время его выгрузки, а лучше – не меньше, чем 20 таких размеров.

Затем, на основе рекомендаций работы [94] определяют оптимальную форму нижней выпускной части емкости с учетом ее взаимодействия с сыпучим материалом. В случае предположительной загрузки в конструкцию нескольких видов сыпучих материалов получают, соответственно, несколько зависимостей. Поскольку полученная форма будет иметь вид быстро суживающейся воронки, то согласно рекомендациям той же работы [94] следует определить угол наклона к горизонту ее основной части.

В случае существенного изменения его значения по высоте конструкции целесообразно предусмотреть ломаную конструкцию нижней части емкости, по схеме, приведенной, например, на рис. 3.3. Таким образом, полученная кривая должна быть аппроксимирована одной или несколькими наклонными участками с соответствующими принятыми углами наклона.

Угол наклона образующей верхней части емкостной конструкции к горизонту, как правило, следует принимать равным 90° .

Назначения габаритных размеров.

После выбора формы нижней и верхней частей емкостной конструкции на основе приведенных в разделе 2 настоящей монографии аналитических выражений следует отыскать оптимальные размеры каждой из частей конструкции.

При этом в первом приближении толщины верхней и нижней частей могут быть приняты одинаковыми, тогда в указанных выражениях они сократятся ($\delta = 1$) и фигурировать не будут. Если же по опыту проектирования или на основе еще каких-либо соображений известны их величины, то они сразу могут быть заложены в приведенные выражения и полученные результаты окажутся более корректными.

Таким образом, устанавливаются соответствующие габаритные размеры будущей емкостной конструкции, которые при необходимости могут быть скорректированы инженером по своему усмотрению, принимая во внимание, например, местные ограничения по габаритам емкости или какие-либо иные технологические условия. Однако при этом следует помнить, что отдаляясь от принятых оптимальных размеров конструкции, инженер повышает ее материалоемкость. Особенно нежелательным при этом оказывается развитие вертикальной части емкостного сооружения по высоте, то есть проектирование узких и высоких конструкций, поскольку они являются наиболее неэкономичными. С другой стороны, не следует, также, отдавать предпочтение емкостям без вертикальной части. Они, хотя и оказываются более рациональными, чем высокие емкости, однако не намного.

Определение давления сыпучего материала.

Следующим этапом проектирования стальных вертикальных емкостных сооружений для сыпучих материалов является вычисление нагрузок.

Относительно определения традиционных типов нагрузок, как например собственный вес оборудования, расположенного над емкостным сооружением, или снеговые и ветровые нагрузки, можно рекомендовать известные нормативные документы или справочники.

Основной технологической нагрузкой является давление сыпучего материала на стенки конструкции. И в этом вопросе инженер оказывается перед выбором одной из возможных теорий, согласно которой может быть рассчитано такое давление. При этом, безусловно, прежде всего следует использовать официально принятые подходы, отраженные в соответствующей нормативно-справочные литературе [39 - 47]. Однако далеко не лишним будет выполнение расчета еще по 2 - 3 наиболее привлекательным для

проектировщика теориям [64, 76 - 85], в том числе и предлагаемой автором настоящей монографии в его работе [94].

Заметим, что в последнем случае согласно авторской теории для емкостных конструкций опасными считаются два расчетных режима – статическое хранение сыпучего материала и момент начала его выгрузки. Во втором случае, как было теоретически обосновано и экспериментально подтверждено автором, давление сыпучего материала существенно возрастает. Количественно его величина зависит от физико-механических свойств конкретного сыпучего материала и может быть легко определена согласно приводимым аналитическим зависимостям.

Выбор конструктивного решения.

Как и в случае выбора теории для расчета давления сыпучего материала на стенки емкостного сооружения, его конструктивное решение, также, может быть выполнено согласно нескольким схемам. Так, может быть принята традиционная конструктивная схема с применением подкрепляющих ребер жесткости, описанная в специализированных справочных изданиях [42 - 47]. Однако, конструирование может быть выполнено и согласно предлагаемой авторской панельной конструктивной схеме, суть которой изложена в разделе 3 настоящей монографии.

При этом вполне возможно, также, принять промежуточную конструктивную схему. По желанию инженера-проектировщика панельная схема допускает использование подкрепляющих ребер жесткости, которые устанавливаются между обвязочными элементами панели. Такая схема будет более приближенной к традиционной конструктивной схеме с использованием отдельных усиливающих ребер жесткости.

Форму сечения подкрепляющих ребер жесткости, в случае их использования, рекомендуется принимать замкнутой, лучше в виде V-образных элементов. И совсем не следует допускать устройство незамкнутых контуров жесткости по периметру конструкции.

Расчет конструкции.

Для определения напряженно-деформированного состояния (НДС) элементов сконструированного таким образом емкостного сооружения, рекомендуется применение специализированных программных комплексов на базе метода конечных элементов. Это позволит выполнить пространственный расчет конструкции и избежать неточностей в представлениях о работе ее отдельных конст-

руктивных элементов. При этом необходимые рекомендации касательно построения и дискретизации расчетных моделей, постановки опор и задания нагрузок, отладки моделей и анализа полученных результатов расчета возможно отыскать в монографии автора [2].

Отметим, что большинство современных проектно-вычислительных комплексов позволяют вместе с определением НДС элементов конструкции проводить проектировочные расчеты по подбору их необходимых сечений. При этом, как правило, используются известные общепринятые критерии проверки прочности, устойчивости и жесткости.

Для подбора поперечных сечений несущих элементов емкостной конструкции могут быть использованы, также, и существующие аналитические подходы. Так, в случае применения панельной конструктивной схемы с ребрами жесткости расчет может проводиться, как и в случае простой реберной конструктивной схемы, согласно рекомендаций уже неоднократно упоминавшейся справочной литературы [42 - 47]. Однако при этом следует учитывать ряд особенностей, рассмотренных в разделе 4 настоящей монографии.

Расчет гофрированных панелей может быть выполнен с помощью имеющихся рекомендаций, приведенных, например, в работах [245 - 247], а подбор диаметра и необходимого количества высокопрочных болтов – согласно приводимым рекомендациям работ [188 – 190, 230, 231]. Там же можно отыскать и рекомендации относительно технологии их монтажа и использования.

Заключение

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

Автору, 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 автора, который, стремясь улучшить представленную работу, вполне мог и перестараться. Просьба не судить его за это слишком строго.

И наконец, автор посчитал целесообразным привести соответствующие ссылки на опубликованных им работы, так или иначе связанные с представленными в данной монографии сведениями, – это работы [248 – 146], которые приведены в списке использованной литературы к настоящей монографии.

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. Материалы для проектирования хранилищ отходов обогательных фабрик / Под ред. К. А. Михайлова. – М.: Госстройиздат, 1962. – 197 с.
11. Лурье З. С. Бункерные устройства углеобогажительных и брикетных фабрик / З. С. Лурье. – М.: Недра, 1972. – 208 с.
12. Матвеев С. Г. Рудничные сооружения / С. Г. Матвеев. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 580 с.

13. Справочник по проектированию цементных заводов / Под ред. С. И. Данюшевского. – Л.: Стройиздат, 1969. – 240 с.
14. 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.
15. Остапенко М. А. Моделирование процессов уплотнения сыпучих и порошковых материалов / М. А. Остапенко // Труды ДГТУ: сер. Химия и химическая технология. – Донецк. - 2000. – Вып. 13. — С. 174 – 178.
16. Лурье З. С. Комплексная механизация и автоматизация бункеров тепловых электростанций / З. С. Лурье. – Л.: Энергия, 1975. – 136 с.
17. 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.
18. Кондратюк Г. Г. Стальные емкости для хранения зерна / Г. Г. Кондратюк, О. С. Воронцов // Промышленное строительство. - 1969. - № 4. – С. 18-20.
19. Грузовые вагоны колеи 1520 мм железных дорог СССР: альбом-справочник. – М.: Транспорт, 1989. – 280 с.
20. Барбас И. Г. К вопросу методики расчета продольного борта думпкара / И. Г. Барбас, А. И. Логвинов, В. И. Панасенко, В. В. Татарчук // Сб. научн. трудов ВНИИВ. - М., 1978. – Вып. 36. – С. 76 - 84.
21. Барбас И. Г. Экспериментальные исследования прочности восьмисного вагона-самосвала грузоподъемностью 145 т / И. Г. Барбас, Г. Г. Музалев, В. И. Панасенко // Сб. научн. трудов ДИИТа. – Днепропетровск: ДИИТ, 1984. – Вып. 205/26. - С. 67 – 72.
22. Визняк Р. И. Определение прочностных характеристик кузова полувагона при выгрузке сыпучих грузов: дис. ... кандидата техн. наук: 05.22.07 / Украинская гос. академия железнодорожного транспорта. - Харьков, 2003. - 165 с.
23. Магула В. Э. Судовые мягкие емкости / В. Э. Магула. - Д.: Судостроение, 1966. - 356 с.
24. Магула В. Э. Судовые эластичные конструкции / В. Э. Магула. - Л.: Судостроение, 1978. - 264 с.
25. Попельнух В. Н. Температурные напряжения в стенах силосов: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.01 / Харьковская гос. академия городского хозяйства. — Х., 1999. — 159 с.

26. Солодарь М. Б. Металлические конструкции для строительства на севере / М. Б. Солодарь, Ю. С. Плишкин, М. В. Кузнецова. – Л.: Стройиздат, 1981. – 207 с.
27. Ваганов А. П. Деревянные подвесные хранилища для сыпучих материалов / А. П. Ваганов // Строительная промышленность. - 1950. - № 10. - С. 12 - 14.
28. Литвиненко В. И. Железобетонные бункера и силосы / В. И. Литвиненко. – М.: Госстройиздат, 1953. – 278 с.
29. Ждахин Л. П. Расчет железобетонных бункеров по предельным состояниям / Л. П. Ждахин. – М.: Изд-во лит-ры по строительству, 1970. – 304 с.
30. Шебуев Б. А. Железобетонные резервуары, бункеры и силосы. Расчёт и конструирование / Б. А. Шебуев. - М.: ОНТИ, 1935. – 322 с.
31. Липницкий М. Е. Проектирование железобетонных бункеров и силосов / М. Е. Липницкий, Ж. Р. Абрамович. – Л.: Стройиздат, 1960. – 356 с.
32. Липницкий М. Е. Проектирование железобетонных бункеров и силосов / М. Е. Липницкий, Ж. Р. Абрамович. – [2-е изд.] – Л.: Стройиздат, 1967. – 288с.
33. Ращепкин С. В. Принципы конструирования и экспериментальные исследования новых металлических спиральных силосов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01 / С. В. Ращепкин. – Саратов, 2002. - 16 с.
34. Ягофаров Х. Гибкие бункера / Х. Ягофаров. – М.: Стройиздат, 1980. – 168 с.
35. Ваганов А. П. Сборные подвесные хранилища / А. П. Ваганов. - Л. - М.; Госстройиздат, 1955. - 79 с.
36. Канторович З. Б. Расчёт подвесных железных бункеров / З. Б. Канторович. М. -Л.: ОНТИ, 1932. - 42 с.
37. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81*. – [Чинний від 1983-01-02]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
38. Сталеві конструкції. Норми проектування, виготовлення і монтажу (проект): ДБН В.2.6-....:200... – [1-ша редакція]. – К.: Міненергобуд України, 2008. – 210 с.
39. Предприятия, здания и сооружения по хранению и переработке зерна: СНиП 2.10.05-85. – [Чинний від 1986-01-01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985. – 24 с.

40. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. – [Чинний від 1987-01.01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
41. Складские здания: СНиП 2.11.01-85*. – [Чинний від 1986-01.01]. – М.: Госстрой СССР, 1991. – 40 с.
42. 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.
43. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
44. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
45. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величина, В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
46. Мельников Н. П. Металлические конструкции / Н. П. Мельников. – М.: Стройиздат, 1973. – 251 с.
47. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.
48. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров / Центр. н.-и. и проек.-эксперим. ин-т пром. зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1978. – 29 с.
49. Материалы для расчета стальных бункеров. Серия ИП-232/74. – Днепропетровск: ГПИ «Приднепровский Промстройпроект», 1974. – 40 с.
50. Клименко Ф. Є. Металеві конструкції: [підруч. для вузів] / Ф. Є. Клименко, В. П. Барабаш, Л. І. Стороженко. – [2-ге вид]. – Львів: Світ, 2002. - 312 с.
51. Металлические конструкции: [учебн. для вузов] / Под общ. ред. Е. И. Беленя. – [5-е изд.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 600 с.
52. Стальные конструкции: [учебник для инж.-строит. вузов и фак-ов]. – [2-е изд.] / Под ред. Н. С. Стрелецкого. – М.: Изд-во лит-ры по строит-ву и арх.-ре, 1952. – 852 с.
53. Лихтарников Я. М. Расчет стальных конструкций / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – [2-е изд.]. – К.: Будівельник, 1984. – 368 с.

54. Тахтамышев А. Г. Примеры расчета стальных конструкций / А. Г. Тахтамышев. – М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969. – 264 с.
55. Муханов К. К. Металлические конструкции: [учебник для вузов]. – [3-е изд., испр. и доп.]. – М.: Стройиздат, 1978. – 572 с.
56. Строительные конструкции: [учебник для инж.-строит. вузов и фак-ов]. / Под ред. Р. Л. Маиляна. – М.: Изд-во лит-ру по строит-ву, 1967. – 502 с.
57. Жудин Н. Д. Стальные конструкции: : [учебник для инж.-строит. вузов]. – М.: Изд-во лит-ру по строит-ву и арх.-ре, 1957. – 336 с.
58. Металлические конструкции: [учебн. для вузов] / Под ред. Н. С. Стрелецкого. – [3-е изд.]. – М.: Стройиздат, 1961. – 776 с.
59. Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
60. Ягофаров Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
61. Ожегов С. И. Словарь русского языка / Под ред. Н. Ю. Шведовой. – [22-е изд., стер.]. – М.: Русский язык, 1990. – 921 с.
62. 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.
63. Великий тлумачний словник сучасної української мови [уклад. і голов. ред. Бусел В. Т.]. – К., Ірпінь: ВТФ «Перун», 2002. – 1440 с.
64. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. – 312 с.
65. Лащенко М. Н. Аварии металлических конструкций зданий и сооружений / М. Н. Лащенко. – Л.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969. – 184 с.
66. Сахновский М. М. Уроки аварий стальных конструкций / М. М. Сахновский, А. М. Титов. – К.: Будівельник, 1969. – 200 с.
67. Добромыслов А. Н. Анализ аварий промышленных зданий инженерных сооружений / А. Н. Добромыслов // Промышленное строительство. - 1990. - № 9. – С. 9 - 10.
68. Сахновский М. М. Надежность строительных сварных конструкций и некоторые уроки аварий / М. М. Сахновский // Труды ДИИТа: Вопросы строительных конструкций, 1971. – Выпуск 118. – С. 3 – 10.

69. Аугустин Я. Аварии стальных конструкций / Я. Аугустин, Е. Шледзевский.; пер. с польского. – М.: Стройиздат, 1978. – 183 с.
70. 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.
71. Шкинев А. Н. Аварии в строительстве / А. Н. Шкинев. – М.: Стройиздат, 1984. – 320 с.
72. 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.
73. Терцаги К. Теория механики грунтов. / Под ред. Н. А. Цытовича; пер. с нем. - М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.
74. Чеботарёв Г. П. Механика грунтов. Основания и земляные сооружения / Г. П. Чеботарев. - М.: Стройиздат, 1968. - 616 с.
75. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. – М.: Стройиздат, 1977. – 256 с.
76. Решетнев Е. К. Истечение сыпучих материалов из бункеров закладочных комплексов / Е. К. Решетнев. – М.: Наука, 1987. – 119 с.
77. Давидсон В. Е. О фильтрационном истечении сыпучих материалов из бункеров / В. Е. Давидсон, А. П. Толстопят // Инженерно-физический журнал, 1972. – Том XXIII. - № 4. – С. 655 – 658.
78. 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.
79. 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.
80. Донсков Е. Г. Элементы теории сыпучей среды в приложении к загрузке материалов в доменную печь / Е. Г. Донсков, В. П. Лялюк, В. И. Ильченко // Metallургическая и горнорудная промышленность, 2008. - № 5. – С. 60 – 63.
81. 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.

82. Лончный В. Математические модели бункера для сыпучих материалов / Пер. с польск. статьи W. Loczny. Modele matematyczne zasabrika materlatow syprkich. Журн. IZM, 1978. – V. 30. - № 4. – P. 219 – 224.
83. 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.
84. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов / В. А. Богомягких. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1974. – 149 с.
85. Семенов В. Ф. Бункеры и хранилища зерна: [учеб. пособие для студ. вузов] / В. Ф. Семенов. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.
86. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. – [4th ed]. - McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
87. ESDEP WG: Vol. 15: Structural Systems. Bins: Lecture 15C.2. – 31 p.
88. Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks: prEN 1991-4. Eurocode 1. - CEN, 2002.
89. Execution of steel structures. Part 7: Tanks, silos and pipelines: prEN 1090-7. - CEN, 1998.
90. Wichtowski B. Service life of steel coke bin – non-destructive testing (NDT) / B. Wichtowski, W. Nazarko // Proc. of 6th Int. Conf. “Modern Building Materials, Structures and Techniques” – Vilnius. – 1999. – P. 155 – 159.
91. 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.
92. 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.

93. Усикова Н. И. Антикоррозионная защита металлических силосов для хранения зерна порошковыми полимерными композициями: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.08 / Н. И. Усикова. – М., 1998. – 18 с.
94. Банніков Д. О. Сипучий матеріал в ємнісній конструкції. – Дніпропетровськ: Моноліт, 2009. – 172 с.
95. Банников Д. О. Применяемые методики расчета давления сыпучего материала в емкостных конструкциях / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Тез. доп. V Міжнар. наук.-техн. конф. «Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку». – К.: Сталь. - 2006. – С. 14 – 15.
96. Банников Д. О. Давление сыпучей среды в емкостях переменного сечения / Д. О. Банников // Тез. 67 Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2007. – С. 274 – 275.
97. Банников Д. О. Модельные исследования статического поведения сыпучей среды в емкостных конструкциях / Д. О. Банников // Тез. докладов коллокви. «Расчет и проектирование пространственных большепролетных конструкций». – Киев. – 2007. – С. 47 – 50.
98. Банніков Д. О. Континуальна модель тиску сипучого матеріалу в замкненій ємнісній конструкції / Д. О. Банніков // Збірник наук. праць “Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди”. – Рівне. – 2008. – Вип. 17. – С. 333 – 340.
99. Банніков Д. О. Особливості розподілу тиску сипучого матеріалу в одноступінчастих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Збірник наукових праць ПолтНТУ: серія “Галузеве машинобудування, Будівництво”. – Полтава: вид-во ПолтНТУ. – 2008. - Вип. 21. – С. 79 – 87.
100. Банніков Д. О. Тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 23. – С. 143 – 149.
101. Банніков Д. О. Визначення коефіцієнта бокового тиску сипучого матеріалу в замкненій посудині / Д. О. Банніков // Журнал “Металеві конструкції”. – 2008. – Том 14, № 2. – С. 113 – 123.
102. Банніков Д. О. Вага сипучого матеріалу та її тиск на стінки ємності / Д. О. Банніков // Тез. 68 Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2008. – С. 124.

103. Банников Д. О. Исследование угла укладки зерен сыпучего материала на модели емкости / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2008. – Вип. 22. – С. 94 – 100.
104. Банников Д. О. Планирование и проведение исследований по экспериментальному изучению сыпучих материалов в емкостных конструкциях / Д. О. Банников // Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – Днепропетровск: изд-во ПГАСА. – 2008. – Вип. 47. – С. 40 – 52.
105. Банников Д. О. Особенности процесса разгрузки бункерных емкостей / Д. О. Банников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 131 – 135.
106. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів / Д. О. Банніков // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – № 4. – С. 79 – 88.
107. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження тиску сипучого матеріалу в сталевих ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Зб. доповідей IX Укр. науково-техніч. конф. “Металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку”. – К. – 2008. – С. 62 – 63.
108. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження статичної поведінки сипучого середовища в ємнісній конструкції / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2009. – Вип. 26. – С. 103 – 111.
109. Алферов К. В. Бункеры, затворы и питатели / К. В. Алферов. – Л.: Изд-во машиностр. лит-ры, 1946. – 178 с.
110. Алфёров К. В., Бункерные установки / К. В. Алферов, Р. Л. Зенков. – М.: Машгиз, 1955. - 308 с.
111. Стрелецкий Н. С. Проектирование и изготовление экономических металлических конструкций / Н. С. Стрелецкий, Д. Н. Стрелецкий. - М.: Стройиздат, 1964. - 360 с.
112. Хуберян К. М. Рациональные формы трубопроводов, резервуаров и напорных перекрытий / К. М. Хуберян. - М.: Стройиздат, 1956 – 187 с.
113. А. с. 678174 СССР, МКИ³ 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.

114. А. с. 1065573 СССР, МКИ³ 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.
115. А. с. 1222801 СССР, МКИ³ 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.
116. А. с. 881282 СССР, МКИ³ Е 04 Н 7/22. Бункер / Г. П. Иванов (СССР). - № 2865668/29-33; заявл. 04.01.80; опубл. 15.11.81, Бюл. № 42.
117. Ягофаров Х. Стальные бункера как пространственные системы: автореф. дис. на соискание учен. степени док. техн. наук: спец. 05.23.01 / Х. Ягофаров. – Екатеринбург, 1998. – 48 с.
118. 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.
119. 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.
120. Шор Н. З. Методы минимизации недифференцируемых функций и их приложения / Н. З. Шор. – К.: Наукова думка, 1979. – 200 с.
121. Сухарев А. Г. Курс методов оптимизации / А. Г. Сухарев, А. В. Тимохов, В. В. Федоров. – М.: Наука, 1986. – 328 с.
122. Беллман Р. Введение в теорию матриц / Р. Беллман; пер. с англ. / Под ред. В. Б. Лидского. – М.: Наука, 1969. – 368 с.
123. Евтушенко Ю. Г. Методы решения экстремальных задач и их применение в системах оптимизации / Ю. Г. Евтушенко. – М.: Наука, 1982. – 432 с.
124. Ланцош К. Практические методы прикладного анализа / К. Ланцош. – М.: Наука, 1961. – 188 с.
125. Пойа Д. Математика и правдоподобные рассуждения / Д. Пойа. – М.: Матиздат, 1957. – 256 с.
126. Петров Ю. А. Логические проблемы абстрактной бесконечности и осуществимости / Ю. А. Петров. – М.: Наука, 1967. – 156 с.
127. Совершенствование конструктивных решений бункеров горно-обогатительных предприятий черной и цветной металлургии. Предложения по улучшению использования емкости бункеров:

Отчет о НИР по теме № 469-1-68 / Ленинград. отдел. центр. н.-и. ин-та промзданий. – Л., 1968. – 138 с.

128. Технические решения по ликвидации дефектов бункеров склада товарного глинозема Николаевского глиноземного завода / Уральский электромеханический институт инженеров железнодорожного транспорта. – Свердловск, 1982. – 20 с.

129. Банников Д. О. Напряженно-деформированное состояние стального пирамидально-призматического бункера / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, С. А. Кострица // Вестник ДГАСА: Строительные конструкции. Здания и сооружения. – Макеевка: изд-во ДГАСА. – 1998. – Вып. 98-4 (12). – С. 37 – 44.

130. Банников Д. О. Эффективность расположения горизонтальных ребер жесткости бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, С. А. Кострица // Сб. научн. трудов ДГТУЖТ «Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве: Строительство». – Днепропетровск: Арт-Пресс. – 1998. – Вып. 5. – С. 98 – 104.

131. Банников Д. О. Анализ напряженно-деформированного состояния стального пирамидального бункера / Д. О. Банников, С. А. Кострица // Proc. of 6th Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warszawskiej Politechnik. – 1998. – С. 409 – 414.

132. Банников Д. О. Напряженно-деформированное состояние стального бункера транспортной эстакады / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, С. А. Кострица // Зб. допов. укр. міжгал. науково-практ. сем. «Сучасні проблеми проектування, будівництва та експлуатації споруд на шляхах сполучення». – К.: ОПВТД ОАО ПТИ «Киеворгстрой». – 1998. – С. 5 – 9.

133. Банников Д. О. Варианты расположения ребер жесткости в стальных бункерах / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Proc. of 6th Int. Conf. “Modern Building Materials, Structures and Techniques”. – Vilnius: Technika. – 1999. – С. 25 – 30.

134. Банников Д. О. МКЭ в пространственных расчетах стальных бункеров / Д. О. Банников // Сб. трудов XVIII межд. конф. «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов». – СПб.: НИИХ СПбГУ. – 2000. – Т. 2. – С. 269 – 274.

135. Банников Д. О. Оценка технического состояния стальных бункеров транспортной эстакады с применением МКЭ / Д. О. Банни-

ков, М. И. Казакевич // Тематич. вип. зб.: Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – К.: Укр. трансп. ун-т. – 2000. – № 59. – С. 1 – 3.

136. Банников Д. О. Выбор параметров конечных элементов при численном моделировании пирамидально-призматических бункеров / Д. О. Банников // Сб. научн. тр. ПГАСА: Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Днепропетровск: Gaudeamus. – 2000. – Вып. 11. – С. 126 – 133.

137. Банников Д. О. Применение МКЭ для прогнозирования работы стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Зб. допов. VII укр. науково-техн. конф. «Металеві конструкції». – Дніпропетровськ: ВАТ ДЗМК ім. І.В. Бабушкіна. – 2000. – С. 81 – 84.

139. Банников Д. О. Совершенствование конструкции стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Сб. тез. стенд. докл. междун. конф. «Сварные конструкции». – К: ИЭС им. Е.О. Патона. – 2000. – С. 42 – 43.

140. Банников Д. О. Исследование прочности пирамидально-призматических бункеров: дис. ... кандидата техн. наук: 05.23.01 / Днепропетровский государственный технический университет железнодорожного транспорта. - Днепропетровск, 2000. - 140 с.

141. 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 Украинской научно-практич. конфер. «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». – К., 2004. – С. 221 – 223.

142. Седов Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – [9-е изд.]. – М.: Наука, 1981. – 448 с.

143. 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.

144. Напряжения и деформации в деталях и узлах машин / Под ред. Н. И. Пригоровского. – М.: Изд-во машиностроит. лит-ры, 1961. – 546 с.

145. Волгин А. В. Интенсификация разгрузки бункерных устройств за счет сводообрушения импульсными электромагнитными системами: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.02 / А. В. Волгин. – Саратов, 2005. – 23 с.

146. Денисова Т. Б. Исследование выпускных устройств с целью совершенствования управления расходом зерна на предприятиях по его хранению и переработке: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / Т. Б. Денисова. – М., 1975. – 22 с.
147. Гаджимурадов М. С. Обоснование конструктивных технологических параметров механизированного самоочищающегося бункера для сыпучих зерновых материалов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / М. С. Гаджимурадов. – Воронеж, 1998. – 21 с.
148. Кузьменко К. И. Совершенствование процесса выгрузки из бункеров туковых смесей: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / К. И. Кузьменко. – Ростов-на-Дону, 2000. – 18 с.
149. Стальной В. П. Статическое сводообразование влажных зерновых материалов в бункерах и способы его устранения: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / В. П. Стальной. – Зернораз, 2001. – 19 с.
150. Попов Ю. В. Совершенствование процесса магнитной сепарации сыпучих материалов комбикормового производства: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.18.12. / Ю. В. Попов. – Воронеж, 1991. — 24 с.
151. Силин А. Н. Обоснование параметров и разработка вибрационного выпускающего устройства с маятниковой подвеской для сыпучих материалов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.04. / А. Н. Силин. – М., 1993. — 18 с.
152. Соломичев Н. Н. Разработка инерционного бигармонического грохота для классификации влажных сыпучих материалов: дис. ... кандидата техн. наук: 05.05.06 / Донецкий политех. ун-т. - Донецк, 2000. - 197 с.
153. Прошунин Ю. Е. Метод расчета устройств для складирования и выпуска углесодержащих сыпучих материалов коксохимической промышленности: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.04.09. / Ю. Е. Прошунин. – М., 1991. - 16 с.
154. Пельтинович А. Г. Зависание сыпучих материалов и пути его устранения / А. Г. Пельтинович, М. Е. Блехман // Труды ЦНИИ-промзданий, 1967. – Вып. 10. – 104 с.

155. Кочегаров А. В. Оптимизация конструкции и параметров бункера-дозатора решетной установки / А. В. Кочегаров. – Воронеж: Мысль, 2007. – 116 с.
156. Филлипов Г. С. Способы и средства интенсификации истечения сыпучих материалов из технологических емкостей / Г. С. Филлипов. – М.: Стройиздат, 1989. – 49 с.
157. Элементы конструкций вибрационных транспортно-технологических машин / Под ред. В. Н. Потураева. – К.: Наукова думка, 1984. – 124 с.
158. Ершов Л. В. О возможных способах улучшения работы бункеров / Л. В. Ершов, А. А. Лисин. // Теплоэнергетика, 1964. - № 4. – С. 44 – 47.
159. Ященко Н. Н. Разделение материала для облегчения разгрузки и повышения полезной емкости бункеров / Н. Н. Ященко, Н. Р. Романов. // Добыча и обогащение руд цветных металлов, 1963. - № 5. – С. 37 – 38.
160. Бадмаев З. В. Разработка установки активного вентилирования и саморазгрузки зернового вороха в бункерах приемных отделений: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / З. В. Бадмаев. – Улан-Удэ, 2005. — 22 с.
161. Кононов Д. А. Повышение точности дозирования сыпучих материалов путем усовершенствования вибрационных питателей: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.05.08. / Д. А. Кононов. – Донецк, 2004. - 20 с.
162. Панченко А. В. Критерии оценки работоспособности бункеров послойного распределения сельскохозяйственных сыпучих материалов / А. В. Панченко // Конструювання, виробництво та експлуатація сільськогосподарських машин. – Кіровоград, 1999. – Вип. 28. – С. 94 – 98.
163. Гордеев В. Н. Нагрузки на здания и сооружения / В. Н. Гордеев, А. И. Лантух-Лященко, М. А. Микитаренко, В. А. Пашинский, А. В. Перельмутер, С. Ф. Пичугин / Под общ. ред. А. В. Перельмутера. – К.: Сталь, 2005. – 500 с.
164. Кузнецов И. М. Пространственная работа гибкого металлического силоса с наружным стержневым каркасом: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01. / И. М. Кузнецов. – М., 2000. - 20 с.

165. Мерсиуз К., Дрител А. Использование гибких силосов для сыпучих продуктов / Пер. с нем. статьи Mersiows Ch., Dittel A. Журн. Lebensmittelindustrie, 1979. – Vol. 26. - № 8. – Р. 349 – 351.
166. Хессе Т. Бункера для сыпучих материалов / Пер. с нем. статьи Hesse T. Журн. PLZ, 1977. – Vol. 28. - № 8. – Р. 753 – 757.
167. Бок Ф. Дж. Стальные конструкции силосных башен, применяемых в Нидерландах / Пер. с нем. статьи Bok F.J. Журн. Lanabouwmechanisatie, 1977. – Vol. 28. - № 12. – Р. 1323 – 1327.
168. Ращепкина С. А. Металлические спирально-навивные силосы / С. А. Ращепкина, С. В. Ращепкин. – Саратов, 2004. – 146 с.
169. Пат. 2017918 Российская Федерация, МПК⁷ Е 04 Н 7/30. Металлическое зернохранилище / Киселев Б. Е., Кацнельсон Л. Б., Трофимов В. И., Погорелов В. А., Котович Л. А.; заявитель США № 4862661 МПК⁷ Е 04 Н 7/22, патентообладатель фирма «Батлер». - № 92000600/33; заявл. 15.10.92; опубл. 15.08.94, Бюл. № 15.
170. Пат. 2017919 Российская Федерация, МПК⁷ Е 04 Н 7/30. Металлическое зернохранилище / Киселев Б. Е., Кацнельсон Л. Б., Трофимов В. И., Погорелов В. А., Котович Л. А.; заявитель Великобритании № 1168837 МПК⁷ Е 04 Н 7/22, патентообладатель Франция № 245861 МПК⁷ Е 04 Н 7/30 и № 2618476 МПК⁷ Е 04 Н 7/30. - № 92000845/33; заявл. 15.10.92; опубл. 15.08.94, Бюл. № 15.
171. Соболев Ю. В. Металлические силосы. Современное состояние и опыт строительства: [учебн. пособие для вузов] / Ю. В. Соболев, С. А. Ращепкина, А. П. Денисова. – Саратов, 1988. – 51 с.
172. А. с. 1670068 СССР, МКИ³ Е 04 Н 7/30. Узловое соединение бункерных балок с колонной / Т. А. Шмелева, М. И. Дьяков (СССР). - № 4648499/29-33; заявл. 06.01.89; опубл. 15.08.91, Бюл. № 30.
173. Пат. 2219320 Российская Федерация, МПК⁷ Е 04 Н 7/30. Стальной круглый бункер для сыпучих и кусковых материалов / Ягофаров А. Х.; заявитель и патентообладатель Уральск. госуд. ун-т путей сообщ. - № 2001135991/03; заявл. 28.12.01; опубл. 20.12.03, Бюл. № 35.
174. Варламов А. В. Долговечность узловых соединений жестких стальных бункеров большой емкости: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01. / А. В. Варламов. – М., 1993. - 14 с.
175. Любаров Б. И. О расчете воронок стальных бункеров с учетом пластических деформаций / Б. И. Любаров // Проектирование ме-

таллических конструкций. - Л., 1972. – Серия VII, вып. 6 (38). – С. 29 - 34.

176. 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.

177. Плишкин Ю. С. К вопросу о расчете прямоугольной пластинки при повторных загрузениях за пределом упругости. Исследование работы стержневой системы с неподвижными опорами / Ю. С. Плишкин // Инженерные конструкции. – Л., 1970. - Вып. 3. – С. 39 - 46.

178. Лейтес С. Д. Упругий и упруго-пластический изгиб длинных прямоугольных пластинок / С. Д. Лейтес // Расчет пространственных конструкций. – М.: Госстройиздат, 1962. – Вып. VIII. – С. 152 - 177.

179. Шестоперов В. Г. Строительство арочного моста из гофрированных металлических элементов / В. Г. Шестоперов // Транспортное строительство, 2006. - № 2. – С. 16 –17.

180. Назаров Ю. М. Конструкции стальных листовых гофрированных оболочек / Ю. М. Назаров // Доповіді V Міжнар. науково-техніч. конфер. “Будівельні металеві конструкції: сьогодення та перспективи розвитку”. – К., 2006. – С. 129 – 132.

181. Белявский Ю. В. Применение сборных металлических гофрированных структур / Ю. В. Белявский, А. В. Мишутин. // Збірн. наук. праць “Дороги і мости”. – К., 2007. – Вип. 7. – С. 28 – 30.

182. Профили стальные гнутые гофрированные. Сортамент: ГОСТ 10551-75. – [Чинний від 1998-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1987. – 22 с.

183. Брудка Я. Стальные складчатые конструкции в строительстве / Я. Брудка, Р. Гарнцарек, К. Милачевски; пер. с польск. – К.: Будівельник, 1989. – 152 с.

184. А. с. 1460158 СССР, МКИ³ С 08 В 15/11. Плита облицовки из упругого материала / М. С. Хорольский, А. И. Скоков, А. А. Сачко (СССР). - № 4271903; заявл. 30.06.87; опубл. 22.10.88, Бюл. № 25.

185. А. с. 1261709 СССР, МКИ³ С 08 В 15/11. Плита облицовки / М. С. Хорольский, Г. В. Критский, А. П. Балашов, А. А. Сачко (СССР). - № 3774855; заявл. 08.05.84; опубл. 08.06.86, Бюл. № 14.

186. Хорольський М. С. Використання еластомерних матеріалів для захисту конструкцій від корозійного та ерозійного зносу / М. С. Хорольський // Хімічна промисловість, 2001. - № 3. - С. 53 – 58.
187. 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.
188. Рабер Л. М. Соединения на высокопрочных болтах. Диагностика. Ремонт. Повышение надежности конструкций / Л. М. Рабер. – Днепропетровск: Системные технологии, 2008. – 124 с.
189. Тарасенко В. П. Інструкція із застосування високоміцних болтів у мостах, що експлуатуються / В. П. Тарасенко, Л. М. Рабер, В. П. Орленко, В. І. Борщов, М. Д. Костюк, Г. О. Лінник, Б. В. Савчинський, М. В. Тарасенко, В. Л. Рикіна, В. О. Курач. – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУЗТ, 2003. – 112 с.
190. Вейтблат Б. М. Высокопрочные болты в конструкциях мостов / Б. М. Вейтблат. – М.: Транспорт, 1971. – 152 с.
191. Пермяков В. О. Особливості проектування сталевих конструкцій виробничих будівель у сучасних умовах / В. О. Пермяков, І. Д. Белов // Будівництво України, 2005. - № 1. - С. 24 – 30.
192. Декл. пат. 69817 А Україна, МПК⁷ 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.
193. Декл. пат. 70576 А Україна, МПК⁷ 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.
194. Декл. пат. 70577 А Україна, МПК⁷ 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.
195. Малый В. И. Приближенная расчетная схема пространственной системы пластинок обшивки бункера / В. И. Малый, О. Г. Восканян // Межвуз. тематич. сб. трудов «Металлические конструкции и испытания сооружений». – Л.: ЛИСИ, 1988. – С. 69 – 74.

196. Соловьев Н. Б. Расчет элементов металлических прямоугольных бункеров / Н. Б. Соловьев, Е. И. Панкин // Строительное проектирование промышленных предприятий. – Л., 1969. – Серия 1. – № 4. – С. 15-18.
197. Ягофаров Х. О расчетной схеме стальной пирамидальной воронки бункера / Х. Ягофаров // Изв. Вузов: сер. Стр-во и арх-ра. – 1985. – № 12. – С. 4-8.
198. Ягофаров Х. Стальной пирамидально-призматический бункер без бункерных балок / Х. Ягофаров // Промышленное строительство. – 1988. – № 12. – С. 21 - 22.
199. Ягофаров Х. О диагональном распоре в пирамидально-призматическом бункере / Х. Ягофаров // Изв. вузов: сер. Стр-во и арх-ра. – 1989. – № 9. – С. 126 - 129.
200. Ягофаров Х. Статическая несимметричность геометрически симметричного пирамидально-призматического бункера / Х. Ягофаров // Изв. вузов: сер. Стр-во. – 1997. – № 3. – С. 114 - 118.
201. Ягофаров Х. Распределение силового мотора на силы упругости заданных направлений / Х. Ягофаров // Изв. вузов: сер. Стр-во. – 1998. – № 8. – С. 128-133.
202. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
203. Зенкевич О. Метод конечных элементов в теории сооружений и в механике сплошных сред / О. Зенкевич, И. Чанг; пер. с англ. – М.: Недра, 1974. – 284 с.
204. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимации / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. / Под ред. Н. С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
205. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
206. Сегерминд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерминд. – М.: Мир, 1979. – 391 с.
207. Розин Л. А. Основы метода конечных элементов в теории упругости / Л. А. Розин. – Л.: ЛПИ, 1972. – 77 с.
208. Деклу Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу; пер. с франц. / Под ред. Н. Н. Яненко. – М.: Мир, 1976. – 95 с.
209. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 200 с.

210. Большаков В. И. Основы метода конечных элементов / В. И. Большаков, Е. А. Яценко, Г. Соссу, М. Лемэр, Ж. М. Рейнуар, Ж. Кестенс, Г. Варзее, И. Кормо. - Днепропетровск: ПГАСА, 2000. – 255 с.
211. Розин Л. А. Метод конечных элементов. Расчет гидротехнических сооружений на ЭЦВМ / Л. А. Розин. – Л.: Энергия, 1971. – 214 с.
212. Бурман З. И. Расчет тонкостенных подкрепленных оболочек методом конечных элементов с применением ЭЦВМ / З. И. Бурман, В. И. Лукашенко, М. Т. Тимофеев. – Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1973. – 570 с.
213. Постнов В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев. – Л.: Судостроение, 1974. – 342 с.
214. Постнов В. А. Метод конечных элементов в расчетах судовых конструкций / В. А. Постнов, И. Я. Хархурим. – Л.: Судостроение, 1974. – 342 с.
215. Розин Л. А. Метод конечных элементов в применении к упругим системам / Л. А. Розин. – М.: Стройиздат, 1977. – 129 с.
216. Немчинов Ю. И. Расчет пространственных конструкций (методом конечных элементов) / Ю. И. Немчинов. – К.: Будівельник, 1980. – 230 с.
217. Гордецкий А. С. Метод конечных элементов в проектировании транспортных сооружений / А. С. Городецкий, В. И. Зоворицкий, А. И. Лантух-Лященко, А. О. Рассказов. – М.: Транспорт, 1981. – 143 с.
218. Горбачев К. П. Метод конечных элементов в расчетах прочности / К. П. Горбачев. – Л.: Судостроение, 1985. – 156 с.
219. Шмельтер Я. Метод конечных элементов в статике сооружений / Я. Шмельтер, М. Дацко, С. Добровичинский, М. Вечорек; пер. с польск. / Под ред. В. Н. Сидорова – М.: Стройиздат, 1986. – 220 с.
220. Постнов В. А. Метод суперэлементов в расчете инженерных сооружений / В. А. Постнов, С. А. Дмитриев, Б. К. Емышев, А. А. Родионов. – Л.: Судостроение, 1989. – 288 с.
221. Перельмутер А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – Киев: ВПП «Компас», 2001. – 448 с.

222. Алямовский А. А. Solid Works / COSMOS Works. Инженерный анализ методом конечных элементов / А. А. Алямовский. – М.: ДМК Пресс, 2004. – 432 с.
223. 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.
224. Крюкова О. С. Створення розрахункової моделі елеваторного комплексу / О. С. Крюкова // Будівництво України, 2008. – № 6. – С. 42 – 45.
225. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофимчук. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332 с.
226. Карпиловский В. С. Формирование сечений и расчет их геометрических характеристик / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунов, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер. – К.: ВВП Компас, 2000. – 80 с.
227. Глауберман В. Б. Монтажные фланцевые соединения стальных конструкций открытого профиля на высокопрочных болтах: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01. / В. Б. Глауберман. – М., 1986. - 23 с.
228. Марабаев Н. Л. исследование фланцевых соединений трубчатых элементов на высокопрочных болтах: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.23.01. / Н. Л. Марабаев. – М., 1983. - 20 с.
229. Леонов В. П. Исследование фланцевых соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.22.05. / В. П. Леонов. – М., 1974. - 22 с.
230. Рекомендации по расчету, проектированию, изготовлению и монтажу фланцевых соединений стальных строительных конструкций / ЦНИИПроектстальконструкция им. Мельникова. – М.: Центр. бюро научно-технич. информации, 1989. – 53 с.
231. Инструкция по проектированию соединений на высокопрочных болтах в стальных конструкциях мостов. ВСН 144 –76. – М.: Минтрансстрой, 1977. – 22 с.
232. Папкович П. Ф. Труды по прочности корабля / П. Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1956. – 680 с.

233. Папкович П. Ф. Строительная механика корабля: в 2 ч. / П. Ф. Папкович. – Л.: Судпромгиз, 1945 – 1957.
234. Барабанов Н. В. Конструкция корпуса морских судов / Н. В. Барабанов. – Л.: Судостроение, 1981. – 552 с.
235. Новожилов В. В. Теория тонких оболочек / В. В. Новожилов. – Л.: Судпромгиз, 1962. – 344 с.
236. Короткин Я. И. Прочность корабля / Я. И. Короткин, Д. М. Ростовцев, Н. Л. Сиверс. – Л.: Судостроение, 1974. – 432 с.
237. Бубнов И. Г. Избранные труды / И. Г. Бубнов – Л.: Судпромгиз, 1956. – 440 с.
238. 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.
239. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле / С. П. Тимошенко; пер. с англ. – М.: Изд-во физ.-мат. лит-ры, 1959. – 440 с.
240. Филлипов А. П. Колебания деформируемых систем / А. П. Филлипов. – М.: Машиностроение, 1970. – 736 с.
241. Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова. – М.: Наука, 1987. – 352 с.
242. Горохов Е. В. Аэродинамика электросетевых конструкций / Е. В. Горохов, М. И. Казакевич, С. Н. Шаповалов, Я. В. Назим / Под ред. Е. В. Горохова, М. И. Казакевича. – Донецк, 2000. – 336 с.
243. Кулябко В. В. Выбор решений по реконструкции здания по его динамическим характеристикам моделей / В. В. Кулябко, И. А. Давыдов // Сб. научн. трудов ПГАСА «Строительство. Материаловедение. Машиностроение»: Серия «Проблемы реконструкции и эксплуатации промышленных и гражданских объектов», 1998. - № 3. – С. 121 – 124.
244. Банников Д. О. Руководство по проектированию вертикальных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников. – Днепропетровск: Новая идеология, 2009. – 56 с.
245. Корнеев М. М. Стальные мосты. Теоретическое и практическое пособие по проектированию / М. М. Корнеев. – К., 2003. – 547 с.
246. Андрианов И. В. Расчет прочности ребристых оболочек инженерных конструкций / И. В. Андрианов, В. А. Лесничая, В. В. Лобода, Л. И. Маневич. – К.- Донецк: Выща школа, 1986. – 104 с.

247. Енджиевский Л. В. Нелинейные деформации ребристых оболочек / Л. В. Енджиевский. – Красноярск: изд-во Краснояр. ун-та, 1982. – 296 с.
248. Банников Д. О. Снижение металлоемкости стальных пирамидально-призматических бункеров / Д. О. Банников // Сб. научн. работ ДДТУЗТ: Ресурсосберегающие технологии в транспортном и гидротехническом строительстве. Строительство. – Днепропетровск: Нова ідеологія. – 1999. – Вып. 6. – С. 196 – 201.
249. Bannikov D. O. Degree of Wall Joint Work Together with Stiffening Rib in Steel Bunker / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. Of Third Int. Conf. on Thin-Walled Structures “Advances and Developments”. – Krakow: Elsevier. – 2001. – P. 619 – 621.
250. Bannikov D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramiddally-prismatic type) / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 10th Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warszawskiej Politechnik. – 2002. – Vol. II. – P. 650 – 657.
251. Банников Д. О. Основные проблемы проектирования стальных бункеров транспортной эстакады / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Тематич. вип. зб.: Автомобільні дороги та транспортне будівництво. – К.: Нац. трансп. ун-т. – 2002. - № 64. – С. 86 – 89.
252. Банников Д. О. Мониторинг стальных бункеров / Д. О. Банников // Зб. наук. робіт ДНУЗТ: Будівництво. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2002. – Вып. 11. – С. 38 – 41.
253. Банников Д. О. Основные причины аварий жестких стальных бункеров и низких силосов / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції, 2002. – Т. 5. - № 1. – С. 59 – 66.
254. Банников Д. О. Формообразование жесткого стального бункера / Д. О. Банников // Матеріали V міжнар. науково-практ. конф. «Динаміка наукових досліджень». – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2002. – Том 2. – С. 3 – 4.
255. Банников Д. О. Направления совершенствования современной концепции проектирования жестких стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2003. - Вип. 1. – С. 130 – 136.
256. Банников Д. О. Анализ вопроса проектирования стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Тез. докл. межд. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и

строительного комплекса». – Гомель: изд-во БелГУТ. – 2003. – Ч. 1. – С. 231 – 233.

257. Bannikov D. O. Design problems of steel bunkers / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 12th Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warsaw University of Technology. – 2004. – Vol. II. – P. 559 – 564.

258. Банников Д. О. Современное состояние вопроса проектирования стальных бункеров / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, А. А. Тарнопольский // Сб. докладов VIII Укр. научно-технич. конф. «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». – К.: Сталь. – 2004. – Ч. 1 - С. 282 – 288.

259. Банников Д. О. Форма бункера – как один из факторов повышения его эксплуатационных качеств / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Сб. докладов VIII Укр. научно-технич. конф. «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». – К.: Сталь. – 2004. – Ч. 2. – С. 55 – 61.

260. Банников Д. О. Выбор рациональной геометрической формы емкостей для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Proc. of 13th Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warsaw University of Technology. – 2005. – P. 53 – 60.

261. Банников Д. О. Снижение площади коррозионного износа стальных емкостных конструкций / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2005. - Вип. 9. – С. 136 – 145.

262. Банников Д. О. Повышение коррозионной стойкости стальных емкостных конструкций / Д. О. Банников // Тез. 65 Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2005. – С. 248 – 249.

263. Банников Д. О. Модернизация конструктивной схемы стальных емкостей / Д. О. Банников // Наук.-техн. зб.: Автомобільні дороги та дорожнє будівництво. – К.: Нац. трансп. ун-т. – 2006. - № 73. – с. 30 – 35.

264. Банніков Д. О. Напружено-деформований стан сталеві панелі бункерної ємності / Д. О. Банніков // Зб. наук. робіт ДНУ: Методи розв'язання прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Дніпропетровськ: Наука і освіта. – 2006. – Вип. 7. – С. 3 – 10.

265. Банников Д. О. Оптимизация геометрической формы ступенчатой оболочки вращения / Д. О. Банников // Тез. VIII Міжнар. мо-
182

- лодіжн. наук.-практ. конф. «Людина і космос». – Дніпропетровськ: НЦАОМУ. – 2006. – С. 226.
266. Банников Д. О. Стальные емкостные конструкции из панелей / Д. О. Банников // Тез. 66 Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2006. – С. 261 – 262.
267. Банников Д. О. Частное решение оптимизации геометрической формы бункеров и силосов / Д. О. Банников // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2007. - Вип. 18. – С. 154 – 160.
268. Банников Д. О. Сопоставительный анализ конструктивных схем стальных бункерных емкостей / Д. О. Банников, М. И. Казакевич // Металеві конструкції, 2007. – Том 13. - № 3. – С. 163 – 172.
269. Банников Д. О. Новая конструкция бункерной емкости из стальных панелей / Д. О. Банников, М. И. Казакевич, Л. М. Рабер // Металлургическая и горнорудная промышленность. - 2007. – № 6. – С. 98 – 102.
270. Банников Д. О. Панельная конструктивная схема стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Мат-лы II междунар. науч.-практ. конф. «Проблемы и перспективы развития транспортных систем и строительного комплекса». – Гомель. – 2008. – С. 219.
271. Банников Д. О. Особенности классификации емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Вісник ОГА-СА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс. – 2009. - Вип. 33. – С. 12 – 17.
272. Банніков Д. О. Часткові теоретичні задачі роботи ребер жорсткості в ємнісних конструкціях / Д. О. Банніков // Вісник ДНУЗТ. – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2009. – Вип. 27. – С. 160 – 166.
273. Банніков Д. О. Современные подходы к проектированию стальных емкостных конструкций / Д. О. Банніков // Збірник наукових праць УкрНДПІСК. – К.: вид-во “Сталь”. – 2009. - Вип. 4. – С. 24 – 36.
274. Банніков Д. О. Інженерна методика проектування сталевих ємнісних конструкцій / Д. О. Банніков // Сб. научн. трудов «Строительство, материаловедение, машиностроение», серия: Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения. – Днепропетровск: изд-во ПГАСА. – 2009. – Вип. 50. – С. 32 – 43.

275. Банніков Д. О. Практична методика проектування сталевих ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів / Д. О. Банніков // Тез. 69 Міжнар. наук.-практ. конф. «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». – Дніпропетровськ: вид-во ДНУЗТ. – 2009. – С. 185 – 186.

276. Банников Д. О. Выбор оптимальной внешней формы емкостных строительных конструкций / Д. О. Банников // Зб. доповідей Міжнар. наук. конф. “Математичні проблеми технічної механіки - 2009”. – Дніпродзержинськ - Дніпропетровськ. – 2009. – С. 171 – 173.

Наукове видання

Банніков Дмитро Олегович

**Вертикальні жорсткі сталеві ємності:
сучасні концепції формоутворення**

монографія

Коректор Д. О. Банніков
Комп'ютерна верстка Г. М. Хомич

Підписано до друку 26.10.09. Формат 60×84/16.
Папір офсетний. Ум.-друк. арк. 10,8. Обл.-вид. арк. 10,01.
Тираж 300 прим. Вид. № 106. Зам. № 11/04.

Видання і друк ПП “МОНОЛІТ”.
49038, м. Дніпропетровськ, вул. Горького, 20
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру
ДК № 273 від 08.12.2000 р.

Банніков Д. О.

Б-23 Вертикальні жорсткі сталеві ємності: сучасні концепції формоутворення / Д. О. Банніков. – Д.: Моноліт, 2009. – 186 с.

ISBN 978-966-2252-06-4

У монографії узагальнено і систематизовано накопичений до теперішнього часу досвід проектування вертикальних жорстких сталевих ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів, у тому числі наводяться відомості щодо їх відмов і аварій. В основній частині роботи викладені авторські концепції і уявлення стосовно формоутворення таких споруд з урахуванням особливостей їх роботи, методів розрахунку і конструювання.

Монографія призначена для інженерно-технічних і наукових працівників, пов'язаних з проектуванням ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів. Може бути корисна студентам, аспірантам, викладачам будівельних спеціальностей вузів, а також всім, хто цікавиться питаннями проектування і створення тонкостінних просторових конструкцій.

УДК 624.954
ББК 38.728

Государственное предприятие
«Украинский научно-исследовательский
конструкторско-технологический институт
эластомерных материалов и изделий»
ГП "УНИКТИ "ДИНТЭМ"

ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ» – головная научная организация в Украине по созданию новых эластомерных материалов, конструкций резинотехнических изделий (РТИ) и установочных устройств с ними, технологии изготовления изделий из эластомеров и метрологическому обеспечению производства РТИ. В ее состав входит комплекс научно-исследовательских и конструкторско-технологических подразделений с испытательной базой и опытно-промышленным производством, оснащенный уникальным оборудованием.

Институт изготавливает практически все виды РТИ – уплотнители различной конфигурации и назначения для электростанций, строительных и гидротехнических сооружений, машин и механизмов, амортизаторы, футеровочные изделия, опорные части мостовых сооружений, резинометаллические подшипники, сита эластичные, изделия специального назначения, а также клеи, герметики и материалы для них.

Институт сотрудничает со многими украинскими и зарубежными предприятиями, научно-исследовательскими, конструкторско-технологическими и академическими институтами.

Продукция института отличается высоким качеством, постоянно экспонируется на международных ярмарках и выставках Украины, России, Германии и других стран.

ГП «УНИКТИ «ДИНТЭМ»

24а, ул. Кротова, г. Днепропетровск, 49033, Украина

тел.: (056) 763-50-22, факс: (056) 763-10-26

e-mail: postmaster@dintem.dp.ua

<http://www.dintem.com>

ДЛЯ ЗАМЕТОК