

**Д. О. БАННІКОВ**

**СИПУЧИЙ МАТЕРІАЛ  
В  
ЄМНІСНІЙ КОНСТРУКЦІЇ**

Дніпропетровськ 2009

**УДК 624.954:531.13**  
**ББК 38.728**

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради  
Дніпропетровського національного університету  
залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна  
(протокол № 4 від 24.11.2008 р.).*

**Рецензенти:**

**Петренко В. Д.**, доктор технічних наук, професор  
(Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна)

**Кулябко В. В.**, доктор технічних наук, професор  
(Придніпровська державна академія будівництва та архітектури)

**Б-23 Банніков Д. О.**

Сипучий матеріал в ємнісній конструкції / Д. О. Банніков. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2009. – 171 с.

В монографії представлена авторська теоретична концепція взаємодії сипучого матеріалу із елементами ємнісних будівельних конструкцій. Наведено результати порівняльного аналізу цієї концепції із виконаними автором експериментальними дослідженнями.

Монографія призначена для інженерно-технічних і наукових робітників, пов'язаних із проектуванням ємнісних конструкцій для сипучих матеріалів. Може бути також корисна студентам, аспірантам і викладачам будівельних спеціальностей вузів.

УДК 624.954:531.13  
ББК 38.728

**ISBN 978-966-2252-03-3**

**© Д. О. Банніков, 2009**

# Зміст

<b>Передмова</b> .....	7
<b>Вступ</b> .....	9
<b>Розділ 1. Ємнісні конструкції і сипучі матеріали</b> .....	15
1.1. Ємнісні конструкції для сипучих матеріалів .....	17
1.1.1. Функціональне призначення та області застосування .....	17
1.1.2. Основні конструктивні різновиди .....	18
1.2. Використовувані сипучі матеріали .....	26
1.2.1. Номенклатура та основні властивості .....	26
1.2.2. Історичні аспекти досліджень основних властивостей .....	27
1.2.3. Офіційні підходи до опису поведінки сипучого матеріалу .....	40
<b>Розділ 2. Авторська концепція поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції</b> .....	46
2.1. Передумови розробки концепції .....	48
2.2. Дискретно-континуальна модель .....	49
2.2.1. Континуальна модель .....	49
2.2.2. Дискретна модель .....	54
2.2.3. Коефіцієнт бокового тиску .....	59
2.3. Основні часткові рішення .....	60
2.3.1. Одноступінчаста конструкція .....	63
2.3.1.1. Конструкція з вертикальними стінками .....	63
2.3.1.2. Конструкція з похилими стінками .....	67
2.3.2. Двоступінчаста конструкція .....	73
2.3.2.1. Конструкція з вертикальною верхньою частиною .....	73
2.3.2.2. Конструкція з похилою верхньою частиною .....	80
2.4. Оптимізація зовнішньої форми конструкції .....	84
2.5. Сфери застосовності отриманих рішень .....	86

<b>Розділ 3. Експериментальне дослідження поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції</b> .....	88
3.1. Спостереження на моделі ємнісної конструкції .....	90
3.1.1. Мета і завдання спостережень .....	90
3.1.2. Експериментальна модель і сипучий матеріал .....	91
3.1.3. Прилади і обладнання .....	92
3.1.4. План досліджень .....	92
3.1.5. Результати досліджень та їх аналіз .....	92
3.2. Натурний експеримент на малорозмірній ємнісній конструкції .....	95
3.2.1. Мета і завдання досліджень .....	95
3.2.2. Експериментальні ємності і сипучі матеріали .....	96
3.2.2.1. Визначення властивостей сипучих матеріалів	100
3.2.2.2. Визначення властивостей сталі ємностей .....	103
3.2.2.3. Комп'ютерна модель ємності .....	108
3.2.3. Прилади і обладнання .....	114
3.2.4. План досліджень .....	121
3.2.5. Результати досліджень та їх аналіз .....	123
3.2.5.1. Результати статичних випробувань .....	123
3.2.5.2. Результати випробування на розвантаження .	124
3.2.5.3. Результати динамічних випробувань .....	129
<b>Заключні зауваження</b> .....	134
<b>Додаток А.</b>	
Фізико-механічні характеристики сипучих матеріалів .....	135
<b>Додаток Б.</b>	
Результати експериментальних досліджень .....	142
<b>Список використаної літератури</b> .....	159

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	7
<b>Введение</b> .....	9
<b>Раздел 1. Емкостные конструкции и сыпучие материалы</b>	15
1.1. Емкостные конструкции для сыпучих материалов .....	17
1.1.1. Функциональное назначение и области применения .....	17
1.1.2. Основные конструктивные разновидности .....	18
1.2. Используемые сыпучие материалы .....	26
1.2.1. Номенклатура и основные свойства .....	26
1.2.2. Исторические аспекты исследований основных свойств .....	27
1.2.3. Официальные подходы к описанию поведения сыпучего материала .....	40
<b>Раздел 2. Авторская концепция поведения сыпучего материала в емкостной конструкции</b> .....	46
2.1. Предпосылки разработки концепции .....	48
2.2. Дискретно-континуальная модель .....	49
2.2.1. Континуальная модель .....	49
2.2.2. Дискретная модель .....	54
2.2.3. Коэффициент бокового давления .....	59
2.3. Основные частные решения .....	60
2.3.1. Одноступенчатая конструкция .....	63
2.3.1.1. Конструкция с вертикальными стенками .....	63
2.3.1.2. Конструкция с наклонными стенками .....	67
2.3.2. Двухступенчатая конструкция .....	73
2.3.2.1. Конструкция с вертикальной верхней частью	73
2.3.2.1. Конструкция с наклонной верхней частью ....	80
2.4. Оптимизация внешней формы конструкции .....	84
2.5. Сферы применимости полученных решений .....	86

<b>Раздел 3. Экспериментальные исследования поведения сыпучего материала в емкостной конструкции</b> .....	88
3.1. Наблюдения и модели емкостной конструкции .....	90
3.1.1. Цель и задачи наблюдений .....	90
3.1.2. Экспериментальная модель и сыпучий материал .	91
3.1.3. Приборы и оборудование .....	92
3.1.4. План исследований .....	92
3.1.5. Результаты исследований и их анализ .....	92
3.2. Натурный эксперимент на малоразмерной емкостной конструкции .....	95
3.2.1. Цель и задачи исследований .....	95
3.2.2. Экспериментальные емкости и сыпучие материалы .....	96
3.2.2.1. Определение свойств сыпучих материалов ...	100
3.2.2.2. Определение свойств стали емкостей .....	103
3.2.2.3. Компьютерная модель емкости .....	108
3.2.3. Приборы и оборудование .....	114
3.2.4. План исследований .....	121
3.2.5. Результаты исследований и их анализ .....	123
3.2.5.1. Результаты статических испытаний .....	123
3.2.5.2. Результаты испытаний на разгрузку .....	124
3.2.5.3. Результаты динамических испытаний .....	129
<b>Заключительные замечания</b> .....	134
<b>Приложение А.</b>	
Физико-механические характеристики сыпучих материалов .	135
<b>Приложение Б.</b>	
Результаты экспериментальных исследований .....	142
<b>Список использованной литературы</b> .....	159

# Передмова

Дослідженням ємнісних будівельних конструкцій для сипучих матеріалів автор займався на протязі багатьох років. Його цікавили досить різноманітні аспекти проектування та роботи таких споруд, починаючи із вибору зовнішньої форми майбутньої ємності та закінчуючи питаннями її захисту від негативного впливу сипучої середовища під час експлуатації.

Поступово, одним з центральних питань, яке так чи інакше має бути вирішено при цьому, виявилось питання взаємодії сипучої середовища із елементами ємнісної конструкції. Звернення до відповідної нормативної, фахової, довідкової та звітної літератури поступово переконали автора у надзвичайній складності та суперечності даного питання, яке набуло статусу самостійної проблеми. Адже багато розроблених теорій та концепцій поведінки сипучої речовини виявляються придатними лише до певних, іноді навіть чітко неоговорених умов, а розраховані за ними результати нерідко суперечать один іншому та й наявним експериментальним даним.

Тому автором було вирішено спробувати розробити власну теоретичну модель, придатну для використання для умов ємнісних будівельних конструкцій, які являють собою жорсткі замкнені суди, та провести свої власні експериментальні дослідження за необхідних, на думку автора, передумов. Саме ці аспекти в першу чергу знайшли відображення в представленій автором монографії. Крім цього в ній наведено отримані автором часткові теоретичні рішення для ряду важливих практичних задач, пов'язаних із проектуванням ємнісних будівельних конструкцій, а також подано деякі рекомендації із раціонального вибору основних конструктивних параметрів таких споруд.

Представлена монографія, орієнтована по задуму автора не тільки на фахівців у профільній галузі, а й на широке коло читачів, які цікавляться як проектуванням ємнісних будівельних конструкцій.

цій для сипучих матеріалів, так і механікою сипучої середи в цілому.

Оскільки монографія представлена на державній мові, офіційно прийнятій в Україні, автор визнав за необхідне подати деякі ключові фрагменти роботи на російській мові – вступ, зміст та анотації до кожного з розділів. Це зроблено виключно для можливості первісного ознайомлення із сутністю монографії російськомовними читачами.

Автор виражає свою нескінчену подяку та пошану своєму науковому консультанту та вчителю, який на протязі багатьох років уважно та кваліфіковано допомагав авторові в його науковій діяльності – доктору технічних наук, професору, Заслуженому діячу науки і техніки України **Казакевичу Михайлу Ісааковичу**.

*“Хорошо воспринимаются лишь те модели,  
которые попадают в резонанс  
с интуитивными представлениями читателя  
о природе рассматриваемой системы”*

*(В. В. Налимов. Теория эксперимента.)*

## **Вступ**

Багато сучасних технологічних процесів в різних сферах промисловості та сільського господарства пов'язані із використанням різноманітних сипучих матеріалів. Для їх тимчасового або тривалого зберігання використовуються спеціальні ємнісні конструкції. Вони, переважно, виготовляються зі сталі та залізобетону і відрізняються досить значним розмаїттям як зовнішніх форм, так і геометричних розмірів.

У конструктивному відношенні відповідно до своєї основної технологічної функції всі ємнісні конструкції являють собою замкнені сосуди. Вони складаються з двох основних складових частин – відкритої верхньої частини для можливості завантаження сипучої речовини та її зберігання й спеціальної форми нижньої частини, обладнаної пристроєм для періодичного вивантаження цієї речовини в необхідній кількості. Різноманітність властивостей та фізико-механічних характеристик сипучих речовин не дуже сильно впливає на особливості конструкції ємнісних споруд, адже загальна схема їх побудови зберігається в переважній більшості випадків досить чітко.

На жаль, в процесі експлуатації ємнісні будівельні конструкції не вважаються досить надійними та довговічними спорудами. Як свідчить накопичений досвід, різноманітні аварійні ситуації не є рідкісним явищем для ємнісних конструкцій, а рівень їх зносу під

час роботи є достатньо високим. Це підтверджується як фахівцями, пов'язаними із безпосереднім проектуванням та обслуговуванням таких конструкцій, так і науковцями вітчизняними та закордонними.

Однією з причин такої ситуації, на думку автора, є недостатня обґрунтованість теоретичних засад щодо визначення основного технологічного навантаження на елементи ємнісних конструкцій – тиску сипучого матеріалу. Ця проблема є надзвичайно багатогранною та містить у собі значну кількість аспектів, що впливають на кінцеві значення тиску сипучого матеріалу та ефекти, що його супроводжують.

По-перше, слід розрізняти поведінку сипучого матеріалу у замкненому сосуді та умовно нескінченному просторі. В обох випадках необхідно застосовувати різні підходи, оскільки ефекти, що їх супроводжують, виявляються доволі різними.

По-друге, принциповим завданням є необхідність окремо аналізувати статичну та динамічну поведінку сипучого матеріалу. Адже, це є два досить різних за своєю суттю явища, які пов'язані із різною структурованістю сипучого матеріалу і тому потребують розробки різних теоретичних моделей. При цьому в кожному випадку виявляються справедливими зовсім різні початкові припущення і, як результат, кінцеві математичні залежності нерідко ведуть до явних суперечностей із експериментальними даними.

По-третє, сипучий матеріал за своєю природою є дуальним. В ньому відстежуються властивості притаманні з одного боку континуальним середовищам (наприклад, здатність чинити тиск на стінки сосуду), а з іншого боку – дискретним середовищам (наприклад, залежність тиску від структурованості матеріалу). Також дуальність сипучої речовини проявляються і в іншому відношенні. Сипуча середа має властивості, з однієї сторони, твердих тіл (наприклад, можливість чинити опір зовнішнім зусиллям) і в той же час, з іншої сторони, властивості рідини (наприклад, здатність текти або заповнювати наданий об'єм).

Така виключна складність сипучої речовини як такої призвела до появи величезної кількості гіпотез, підходів, досліджень та теорій, які створювались ще з давніших часів та продовжують створюватись сьогодні. Не дивно тому, що відшукуванням різноманітних закономірностей, пов'язаних із сипучими матеріалами, займалася

досить значна кількість достатньо відомих та менш відомих науковців.

Не менш цікавою та складною є дослідження практичної поведінки сипучої речовини. Адже перелічені вище її особливості ведуть до необхідності врахування досить багатьох різноманітних факторів при плануванні та проведенні різноманітних спостережень та експериментів. Серед них можна відзначити і належний вибір зовнішньої форми експериментальної установки, і добір необхідного співвідношення її геометричних розмірів із зерновим складом досліджуваної сипучої речовини, і вибір самої сипучої речовини. Нерідко неврахування або невірне врахування, яке до речі досить часто впливає із побудованої теоретичної моделі, призводять до отримання протирічливих результатів, які в кінці кінців викликають ще більше питань, ніж дають відповідей.

Таким чином, проблема побудови адекватної та сучасної теоретичної моделі сипучої середи, яка знаходиться в замкненій ємнісній конструкції, залишається досить складною та, багато в чому, на жаль, не вирішеною. Її розробка та експериментальне підтвердження потребують проведення глибоких теоретичних і експериментальних досліджень.

*“Хорошо воспринимаются лишь те модели,  
которые попадают в резонанс  
с интуитивными представлениями читателя  
о природе рассматриваемой системы”*

*(В. В. Налимов. Теория эксперимента.)*

## **Введение**

Многие современные технологические процессы в разных сферах промышленности и сельского хозяйства связаны с использованием разнообразных сыпучих материалов. Для их временного или длительного хранения используются специальные емкостные конструкции. Они, преимущественно, изготавливаются из стали и железобетона и отличаются достаточно значительным разнообразием как во внешних формах, так и в геометрических размерах.

В конструктивном отношении в соответствии со своей основной технологической функцией все емкостные конструкции представляют собой замкнутые сосуды. Они состоят из двух основных составных частей – открытой верхней части для возможности загрузки сыпучего вещества и ее хранения и специальной формы нижней части, оборудованной устройством для периодической выгрузки этого вещества в необходимом количестве. Разнообразие свойств и физико-механических характеристик сыпучих веществ не очень сильно влияет на особенности конструкции емкостных сооружений, поскольку общая схема их построения сохраняется в подавляющем большинстве случаев достаточно четко.

К сожалению, в процессе эксплуатации емкостные строительные конструкции не считаются достаточно надежными и долговечными сооружениями. Как свидетельствует накопленный опыт, разнообразные аварийные ситуации не являются редким явлением для

емкостных конструкций, а уровень их износа во время работы достаточно высок. Это подтверждается как специалистами, связанными с непосредственным проектированием и обслуживанием таких конструкций, так и учеными отечественными и зарубежными.

Одной из причин такой ситуации, по мнению автора, является недостаточная обоснованность теоретических принципов относительно определения основной технологической нагрузки на элементы емкостных конструкций – давления сыпучего материала. Эта проблема является чрезвычайно многогранной и включает в себя значительное количество аспектов, которые влияют на конечные значения давления сыпучего материала и эффекты, его сопровождающие.

Во-первых, следует различать поведение сыпучего материала в замкнутом сосуде и условно бесконечном пространстве. В обоих случаях необходимо применять различные подходы, поскольку эффекты, их сопровождающие, оказываются достаточно разными.

Во-вторых, принципиальным заданием является необходимость отдельно анализировать статическое и динамическое поведение сыпучего материала. В сущности, это есть два достаточно разных по своей сути явления, которые связаны с разной структурированностью сыпучего материала и потому требуют разработки разных теоретических моделей. При этом в каждом случае оказываются справедливыми совсем различные начальные допущения и, как результат, конечные математические зависимости нередко ведут к явным противоречиям с экспериментальными данными.

В-третьих, сыпучий материал по своей природе является дуальным. В нем отслеживаются свойства присущие с одной стороны континуальным средам (например, способность оказывать давление на стенки сосуда), а с другой стороны – дискретным средам (например, зависимость давления от структурированности материала). Также дуальность сыпучего вещества проявляются и в другом отношении. Сыпучая среда имеет свойства, с одной стороны, твердых тел (например, возможность оказывать сопротивление внешним усилиям) и в то же время, с другой стороны, свойства жидкости (например, способность течь или заполнять предоставленный объем).

Такая исключительная сложность сыпучего вещества как такового привела к появлению огромного количества гипотез, подходов, исследований и теорий, которые создавались еще с давних

времен и продолжают создаваться сегодня. Не удивительно потому, что отыскиванием разнообразных закономерностей, связанных с сыпучими материалами, занималось достаточно значительное количество довольно известных и менее известных ученых.

Не менее интересным и сложным является исследование практического поведения сыпучего вещества. Ведь перечисленные выше его особенности ведут к необходимости учета значительного количества разнообразных факторов при планировании и проведении различных наблюдений и экспериментов. Среди них можно отметить и надлежащий выбор внешней формы экспериментальной установки, и подбор необходимого соотношения ее геометрических размеров с зерновым составом исследуемого сыпучего вещества, и выбор самого сыпучего вещества. Нередко неучет или неверный учет, который кстати достаточно часто выплывает из построенной теоретической модели, приводят к получению противоречивых результатов, которые в конце концов вызывают еще больше вопросов, чем дают ответов.

Таким образом, проблема построения адекватной и современной теоретической модели сыпучей среды, которая находится в замкнутой емкостной конструкции, остается достаточно сложной и, во многом, к сожалению, не решенной. Ее разработка и экспериментальное подтверждение нуждаются в проведении глубоких теоретических и экспериментальных исследований.

## **Розділ 1.**

### **Ємнісні конструкції і сипучі матеріали**

В даному розділі наведено загальні відомості стосовно основних існуючих різновидів сучасних ємнісних будівельних конструкцій для сипучих матеріалів. Показано їх конструктивні та зовнішні відмінності.

Також в розділі приведено деякі відомості щодо номенклатури та видів використовуваних сипучих матеріалів та їх основних властивостей. Розглянуті основні існуючі концепції, які описують поведінку сипучої середи за різноманітних умов.

## **Раздел 1.**

### **Емкостные конструкции и сыпучие материалы**

В данном разделе приведены общие сведения относительно основных существующих разновидностей современных емкостных строительных конструкций для сыпучих материалов. Показаны их конструктивные и внешние отличия.

Также в разделе приведены некоторые сведения относительно номенклатуры и видов используемых сыпучих материалов и их основных свойств. Рассмотрены основные существующие концепции, которые описывают поведение сыпучей среды в различных условиях.

## **1.1. Ємнісні конструкції для сипучих матеріалів**

### **1.1.1. Функціональне призначення та області застосування**

Одним з сучасних видів будівельних конструкцій, які призначені для тимчасового або довготривалого зберігання різноманітних видів сипучих матеріалів, є ємнісні конструкції. Разом з іншими видами споруд, які використовуються для цього, такими, як наприклад, закрома або склади [1], ємнісні споруди дозволяють накопичувати певні обсяги сипучої речовини, яка через деякий час, що сягає іноді десятків років, може бути використана за своїм призначенням. Проте ємнісні конструкції є найбільш зручними та розповсюдженим видом таких споруд для відносно короткочасного накопичення сипучих матеріалів, оскільки за своїми конструктивними особливостями дозволяють оперативну та якісно проводити самотічне вивантаження збіраємих сипучих матеріалів в необхідній кількості.

Як підкреслено в роботі [2], основна технологічна ідея застосування ємнісних будівельних конструкцій полягає в необхідності компенсувати нерівномірність надходження сипучого матеріалу від попередньої ланки технологічного процесу до подальшої, з деяким рознесенням в часі. При цьому весь цей час матеріал поступово накопичується всередині споруди і передається на наступний етап, також, певними порціями, об'єм яких може не співпадати з об'ємом завантажень. У багатьох випадках саме відмінність у розмірі цих обсягів й визначає необхідність влаштування спеціальної допоміжної акумулюючої ланки у вигляді ємнісної споруди.

Загалом ємнісні конструкції для сипучих матеріалів застосовуються практично в усіх сучасних галузях промисловості, сільськогосподарства та транспорту. Це й металургійні підприємства [3, 4], шахти [5 - 7] і підприємства добувної галузі [8 – 12], заводи будівельної індустрії [13] і хімічні підприємства [14, 15], енергетична галузь [16] і сільське господарство [17, 18]. Кількість використовуваних сипучих матеріалів при цьому сягає декількох сот.

Безсумнівно, що транспортування з одного регіону до іншого таких обсягів сипучих вантажів призвело до необхідності розробки

та використання окремих пересувних ємностей. Частіше за все їх розташовують на залізничних платформах, отримуючи при цьому вагони спеціального призначення, такі як вагони-бункери, хопери та думпкари [19 - 22]. Однак, нерідко для цього використовують і морський транспорт [23, 24].

Географія використання ємнісних конструкцій, також, є достатньо широкою. Такі споруди застосовуються і в закритих приміщеннях, і на відкритому повітрі. При цьому експлуатація може проходити як при звичайних умовах, так і при високих [25] або низьких температурах [26].

Таким чином, розповсюдженість ємнісних конструкцій є досить значної, і вказати галузь, в якій би такі конструкції не застосовувались, виявляється важко. Тому проблема дослідження їх дійсної роботи та підвищення експлуатаційних якостей була та залишається достатньо важливою та актуальною.

### **1.1.2. Основні конструктивні різновиди**

Ємнісні будівельні конструкції для сипучих матеріалів прийнято розрізняти в теперішній час за двома основними ознаками – матеріалом, з якого виготовляються їх основні несучі конструктивні елементи та зовнішньою формою. За обома з цих ознак існує досить багато різновидів ємностей, однак єдиного систематизованого підходу до їх класифікації, на жаль, поки не існує. Кожна з вказаних ознак є, в значному ступені, незалежною від іншою, і тому зустрічаються різні комбінації їх у практиці.

Стосовно першої ознаки – матеріалу конструкції – слід зазначити, що в теперішній час ємнісні будівельні конструкції для сипучих матеріалів виготовляють, переважно, з двох видів будівельних матеріалів – залізобетону та сталі. Значно рідше зустрічаються дерев'яні ємності, які практично вже не будуються [27].

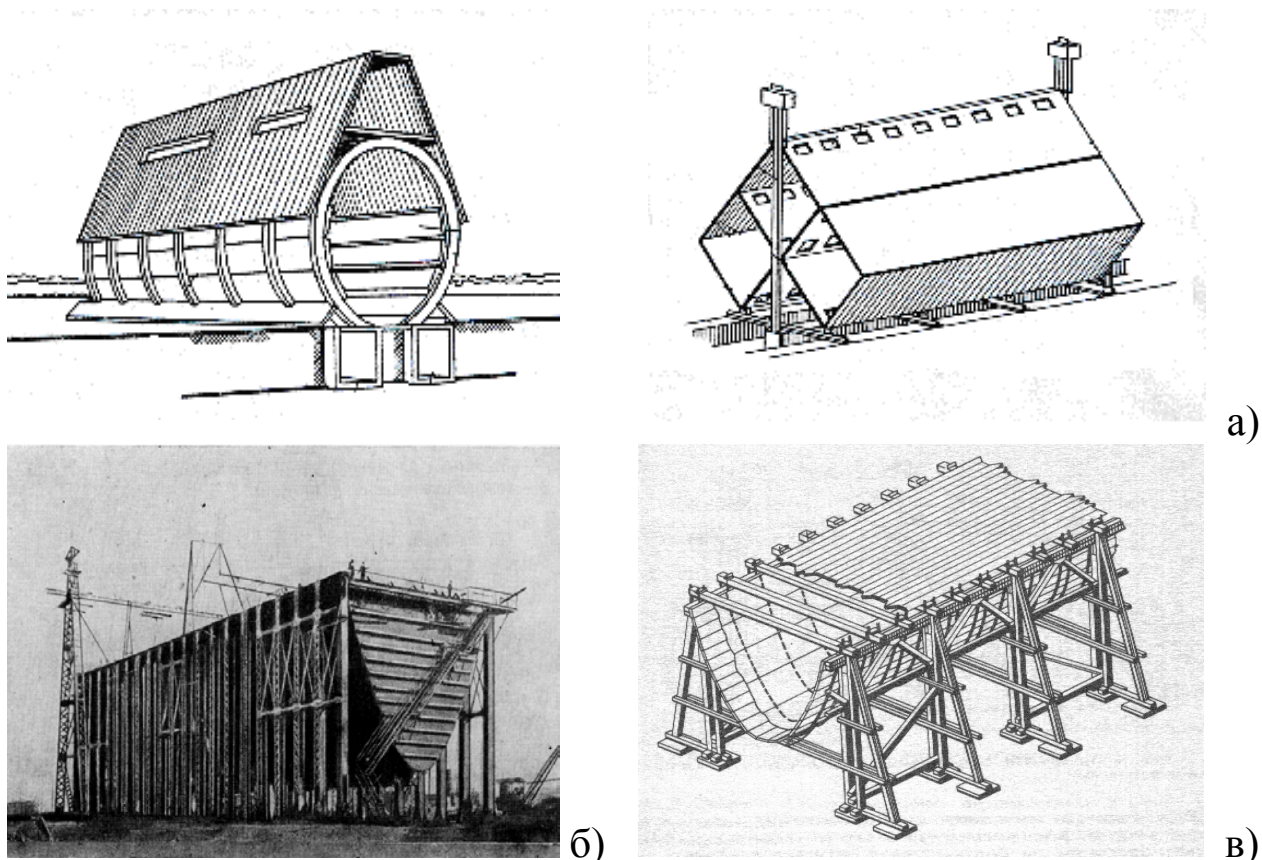
Залізобетонні ємності активно досліджувались в середині минулого сторіччя [28 - 30], коли дуже гостро стояло питання щодо заощадження витрат сталі, адже вони потребують в 2 - 4 рази її меншу кількість [31, 32]. Сталеві ємності набули приблизно такого самого розповсюдження, як і залізобетонні і в теперішній час завдяки своїй прості виготовлення та монтажу, навіть, перевищують останні за обсягами використання [33].

Стосовно другої ознаки – форми конструкції – ситуація є набагато більш складною.

За своїм просторовим положенням ємності для сипучих матеріалів бувають горизонтального та вертикального типів. У першому випадку конструкції мають форму, витягнуту по горизонталі, в другому випадку – по вертикалі.

Зовнішній вигляд сучасних горизонтальних ємностей для сипучих матеріалів приведений на рис. 1.1. Конструктивно вони сформовані із просторових оболонкових елементів різної кривизни та товщини та в залежності від обраного матеріалу можуть мати доволі різну зовнішню форму.

Основним недоліком споруд такого типу є утворення при розвантаженні так званих “мертвих зон”, з яких зберігає мий сипучий матеріал не вивантажується, що знижує ефективність їх роботи. Завдяки цьому горизонтальні ємності можуть використовуватись раціонально тільки при значних обсягах збереження матеріалів – понад 1000 м<sup>3</sup>. Дослідженню роботи ємнісних конструкцій такого типу присвячено ряд робіт відомих науковців [34 – 36].



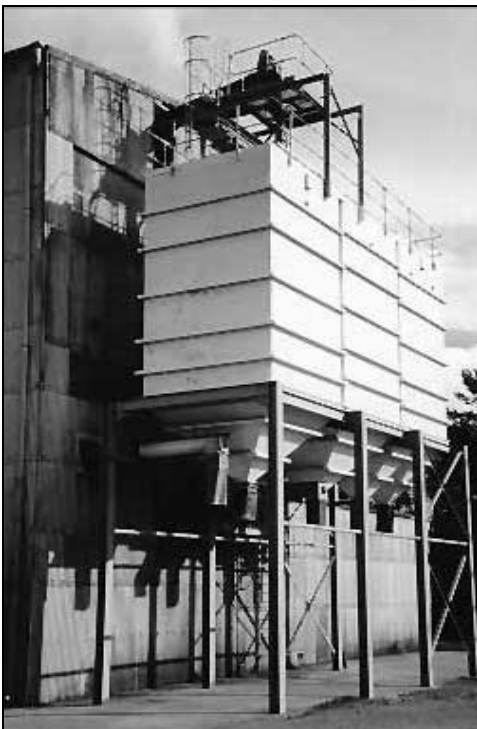
**Рис. 1.1. Горизонтальні ємності для сипучих матеріалів:**  
а) виконані із залізобетону; б) виконані із сталі;

### в) виконані із деревини

В даній монографії горизонтальні ємнісні споруди не розглядаються. Основну увагу автор приділяє дослідженню вертикальних ємнісних споруд.

На відміну від горизонтальних ємнісних конструкцій вертикальні ємнісні конструкції використовують при необхідності в зберіганні порівняно невеликих об'ємів сипучих матеріалів (приблизно до 1000 м<sup>3</sup>). Вони являють собою витягнуті по висоті сосуди і конструктивно сформовані із оболонкових елементів, які для підвищення їх міцності та жорсткості можуть підкріплюватись спеціальними ребрами жорсткості.

Найбільш поширеними є двоступінчасті ємнісні конструкції, які складаються з двох жорстко поєднаних між собою частин (ступіней). Найчастіше верхня частина є вертикальною. Якщо при цьому в плані обидві частини являють собою квадрат або прямокутник із невеликим співвідношенням розмірів сторін, то такі ємності називають пірамідально-призматичними (рис. 1.2, 1.3), якщо ж обидві частини в плані являють собою коло, то ємності такого типу називають конусно-циліндричними (рис. 1.4, 1.5).



**Рис. 1.2. Сталеві ємнісні конструкції пірамідально-призматичного типу**



**Рис. 1.3. Залізобетонні ємнісні конструкції  
пірамідально-призматичного типу**

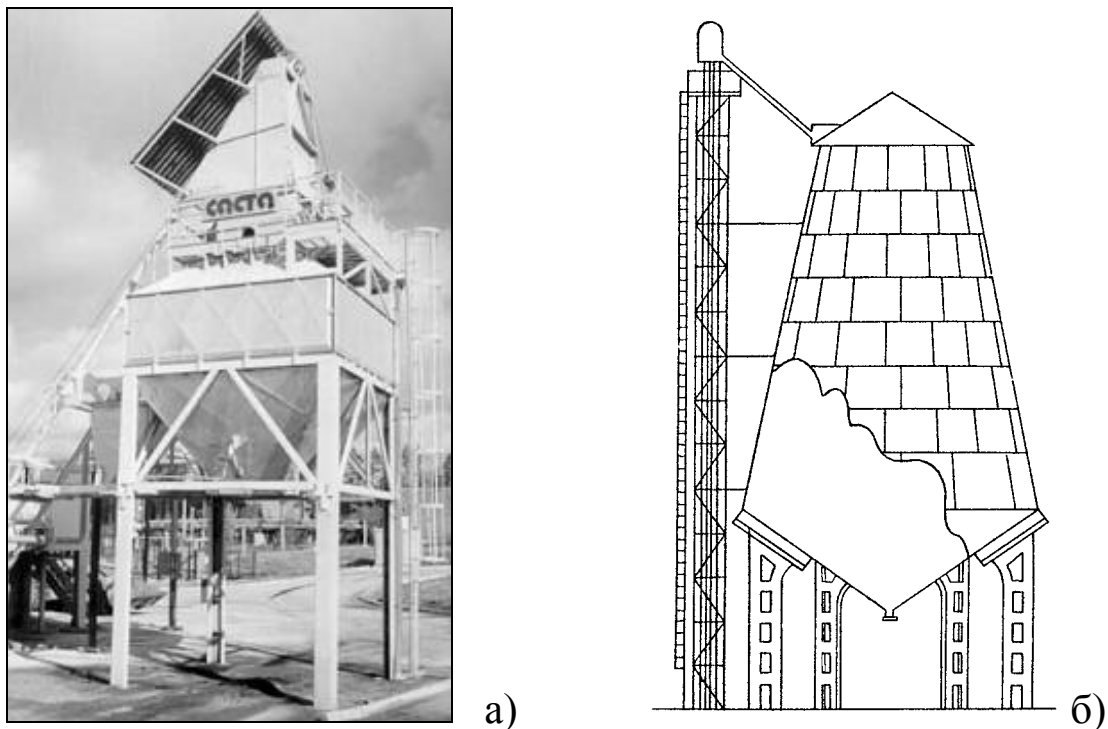


**Рис. 1.4. Сталеві ємнісні конструкції  
конусно-циліндричного типу**



**Рис. 1.5. Залізобетонні ємнісні конструкції  
конусно-циліндричного типу**

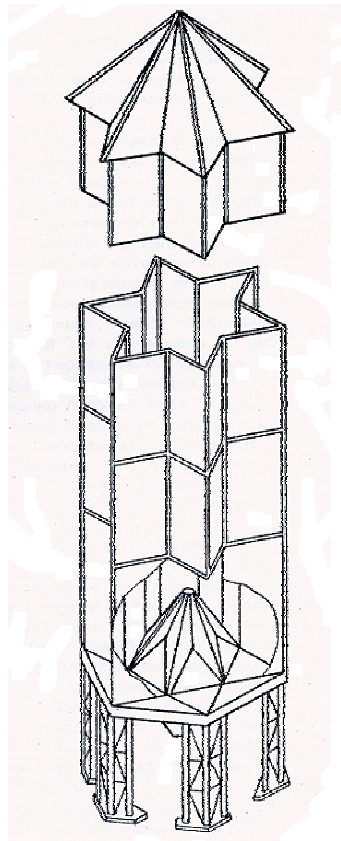
Проте верхня частина двоступінчастих ємностей зовсім не обов'язково має бути вертикальною, вона може бути нахилена під певним кутом до горизонту. Тоді утворюються ємності, які б дотримуючись наведеного вище принципу надання назв, можна було б назвати “пірамідально-пірамідальними” (рис. 1.6,а) або “конусно-конусними” (рис. 1.6,б). Проте такі назви не зустрічаються в спеціальній нормативній, фаховій та довідковій літературі.



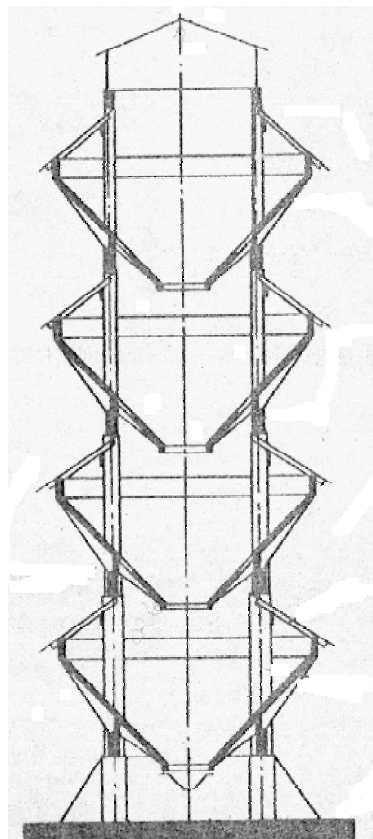
**Рис. 1.6. Ємнісна конструкція  
“пірамідально-пірамідального” типу (а)  
і “конусно-конусного” типу (б)**

Окрему групу ємнісних споруд складають споруди багатогранні в плані. Причому розташування граней може бути виконано як за схемою випуклого багатограннику, так і вогнутого. В останньому випадку утворюється ємнісна конструкція зовсім екзотичної зовнішньої форми у вигляді зірочки (рис. 1.7).

Досить цікавими виявляються, також, зовнішні форми багаторівневих ємнісних конструкцій. Кожна з частин (ступенів) такої ємності має відносно нескладну геометричну форму у вигляді циліндра, багатогранної призми, усіченого конуса або усіченої багатогранної піраміди. Поєднуючи їх між собою, отримують достатньо високі споруди (рис. 1.8).



**Рис. 1.7. Ємнісна конструкція “зірчастого” типу**



**Рис. 1.8. Ємнісна конструкція багатоступінчастого типу**

Дослідженню роботи ємнісних конструкцій вертикального типу присвячено досить значна кількість робіт відомих науковців. Більшість отриманих при цьому результатів досить докладно й детально представлені у відповідній нормативній [17, 37, 38] та довідковій літературі [39 – 44].

Крім перелічених різновидів симетричних ємностей, зустрічаються такі самі різновиди тільки несиметричні відносно вертикальної вісі. Як свідчить досвід їх створення і експлуатації, вони відрізняються підвищеною матеріаломісткістю і зниженою надійністю і тому використовуються виключно в тих випадках, коли неможливо спроектувати симетричну ємність. В даній монографії несиметричні ємності не розглядаються. Основну увагу приділено тільки симетричним ємнісним спорудам.

Наскільки різноманітною є зовнішня форма ємнісних споруд, настільки ж різноманітною є і їх розміри. Зустрічаються як ємності із розміром сторони в плані (діаметром) 0,5 – 0,6 м, які переважно використовуються в хімічній і будівельній галузях, так і ємності із розміром сторони 30 м і більше, які переважно використовуються для зберігання сільськогосподарської продукції. При цьому висота споруди може коливатись від 0,5 - 1 м до 35 – 40 м. Об'єм ємнісних конструкцій, відповідно, може перевищувати 2 500 м<sup>3</sup>.

Окремими важливим питанням, яке досить часто фігурує в спеціалізованій нормативній, фаховій та довідковій літературі є питання стосовно необхідності розрізняти силосні ємнісні конструкції (силоси) та бункерні ємнісні конструкції (бункери).

Традиційно до силосів і бункерів відносять лише двоступінчасті ємності, в яких верхня частина є вертикально. Вся відмінність між силосом і бункером полягає у висоті цієї вертикальної частини. Загальною є тенденція вважати силосами споруди із більш високою вертикальною частиною, а бункерами – із менш високою. В цьому всі фахівці виявляються єдині. Проте у кількісному відношенні ця границя за різними джерелами має визначатись по-різному:

- $1,5 \cdot A$  (де  $A$  – площа горизонтального перерізу) відповідно до чинного нормативного документу [17]<sup>1</sup>;
- $1,5 \cdot \sqrt{A}$  відповідно до рекомендацій з проектування [39];

---

<sup>1</sup> Автор монографії не зовсім розуміє як треба користуватись цим виразом, адже висота і площа мають різні несумісні одиниці виміру. Проте саме в такій формі цей вираз наведений у нормах [17, с.6].

-  $a$  (де  $a$  – найменший розмір в плані) відповідно до роботи [40].

Не слід бути досвідченим математиком, щоб по вищенаведених залежностях обчислити кількісну межу між силосом і бункером і переконатися в тому, що в кожному випадку результат виходить різним. До того ж, як наприклад, класифікувати ємності багатогранні в плані, або такі, як представлені на рис. 1.7 і 1.8?

Ряд сучасних довідкових видань (як, наприклад, [44]) взагалі не наводить ніякої кількісної межі. Так само вона відсутня і в досить популярній навчальній літературі [45, 46].

Можливо питанню про те, як назвати спроектовану конструкцію, і не слід було б приділяти окрему увагу, якщо б не одна принципова обставина. Як досить вірно підмічено в роботі [47, с. 5]: “Однако формальное отличие приводит к принципиальной разнице в расчетных схемах бункера и силоса: в бункере пренебрегают силами трения сыпучего материала о стенки”. Більше того, різними виявляються і методика подальшого визначення зусиль в елементах споруди, і навіть, рекомендації з конструювання.

Приблизно така сама ситуація спостерігається і в закордонних підходах до проектування сталевих ємнісних конструкцій. Відповідно до нормативної [48], довідкової [49] і навчальної [50] літератури, всі ємності для сипучих матеріалів (які до того ж мають окремий термін – “bins”), так само поділяють на бункери - “bunkers” і силоси – “silos”. Кількісна границя при цьому між ними дорівнює подвійному діаметру ємності. Тому в деяких випадках, намагаючись підкреслити зовнішню відмінність між ними, використовують, також, терміни “приємисті” (“squat”) і “стройні” (“slender”), які, на думку автора роботи, є скоріше художніми, ніж інженерними.

Таким чином, із наведених даних стає зрозумілим, що сучасні ємнісні будівельні конструкції для сипучих матеріалів відрізняються надзвичайно високим розмаїттям як у зовнішніх формах, так і у геометричних розмірах. На практиці це досить часто результується у відмінності, іноді досить принципові, при визначення як діючих на конструкцію навантажень і впливів, так і подальшому розрахунку та конструюванні цих споруд.

## 1.2. Використовувані сипучі матеріали

### 1.2.1. Номенклатура та основні властивості

В теперішній час існує досить велике розмаїття видів сипучих матеріалів, для зберігання яких можуть використовуватись ємнісні будівельні конструкції. Їх загальна кількість сягає декількох тисяч. Проте “найбільш поширеними” (якщо така термінологія може бути використана) є їх відносно незначна кількість, що не перевищує сотні одиниць.

Визначенню та дослідженню властивостей сипучих матеріалів присвячено досить багато робіт. Варто лише зазначити, що існує окремий самостійний напрямок – механіка сипучої середовища. Тому автор вважає за непотрібне повторювати та дублювати досить відомі речі, пов’язані із описом властивостей та характеристик сипучих матеріалів. Їх можна знайти практично у кожній науковій монографії, присвяченій даній тематиці, не кажучи вже про підручники для навчання студентів у вищих навчальних закладах. Тому в даному підрозділі автор вважає за потрібне навести тільки ті відомості, які, по-перше, необхідні для розуміння подальшого викладення матеріалу, і по-друге, мають різне трактування в різних джерелах.

Спершу необхідно чітко визначитись про основний об’єкт досліджень в даній монографії – сипучий матеріал, адже деякі відмінності і його розуміння серед фахівців все ж таки спостерігаються. Автор даної роботи вкладає в сипучий матеріал наступний зміст:

***Сипучий матеріал – матеріал, який має виражену зернову структуру, із розмірами зерна, що забезпечують можливість текти матеріалу в замкненому просторі.***

При цьому слід ввести одне уточнення. В чистому розумінні сипучий матеріал є незв’язною речовиною. Це означає, що між його окремими зернами повністю відсутні (або практично відсутні) сили зчеплення, що перешкоджають взаємному переміщенню цих зерен відносно одне одного. Якщо ж подібні сили зчеплення є, то такий матеріал вже перетворюється у зв’язну речовину, яка наближається за своїми властивостями до ґрунтової маси.

В додатку А наведені найбільш поширені види сучасних сипучих матеріалів, для яких розробляються та проектуються ємнісні будівельні конструкції. Там же приведено відповідні фізико-механічними характеристика цих матеріалів. При цьому слід заважити, що останні можуть значно варіюватись, та за даними як вітчизняних, так і закордонних фахівців нерідко один і той самий матеріал має різні характеристики. Тому в таблицях наведені узагальнені дані, зібрані автором за різними джерелами. Найбільшу довіру в нього викликали роботи [39, 43, 44], на які і спирається автор.

Наведені в таблицях фізико-механічні характеристики являють собою параметри, що використовуються в більшості сучасних концепцій, які описують поведінку сипучого матеріалу. Проте, як буде видно з подальших викладень цього буває замало та для адекватного опису поведінки сипучої речовини потрібні інші додаткові показники. На жаль, їх розробкою займається досить незначна частина дослідників, тому навести скільки-небудь правдиві відомості не представляється можливим. Однак, на протязі викладення подальшого матеріалу автор, при необхідності, буде використовувати такі поодинокі дані, отримані провідними фахівцями, посилаючись на відповідні джерела.

### **1.2.2. Історичні аспекти досліджень основних властивостей**

Зупинимось далі на основних історичних аспектах розвитку поглядів як на властивості сипучих матеріалів в цілому, так і на дослідження його поведінки за різних умов. Однак, на відміну від значної кількості існуючих робіт, що наводять детальну історичну ретроспективу, автор вважає за необхідне зупинитися лише на ключових моментах та надати свій узагальнюючий погляд на ці події, вважаючи за непотрібне дублювати інших авторів. Більш детальні відомості при необхідності можуть бути почерпнуті із відповідних джерел, на які зроблені посилання в подальшому викладенні, в тому числі й достатньо новітніх робіт.

Насамперед слід заважити, що в цілому аналіз властивостей та поведінки сипучої речовини являє собою доволі складну задачу. Це обумовлено природною дуальністю сипучої речовини як такої. Дана проблема є надзвичайно багатогранною та містить у собі зна-

чну кількість аспектів, що ведуть до виникнення ряду специфічних ефектів при взаємодії сипучої речовини із елементами будівельних конструкцій.

По-перше, слід розрізняти поведінку сипучої речовини у замкненому сосуді та умовно нескінченому просторі, тобто, як кажуть фахівці, в необмеженому ґрунтовому масиві. До того ж, часткове обмеження деформацій сипучої речовини, як наприклад у випадку встановлення підпірної стінки, також виявляється підпорядкованим зовсім іншим закономірностям. Тому домінуюча на сьогодні концепція дослідження сипучої середи передбачає окремий незалежний розгляд кожної із можливих задач - вивчення особливостей фізико-механічних характеристик сипучих матеріалів, їх залежності від впливу різноманітних зовнішніх факторів, напружено-деформованого стану всередині та на поверхні сипучої речовини, її тиску на підпірну стіну, опору сипучої основи елементам фундаменту і т.д. Задача вивчення поведінки сипучої речовини в замкненому просторі, який обумовлений формою ємнісної конструкції, також виявляється окремим напрямком досліджень, який нерідко оперує своїми власними термінами та припущеннями.

По-друге, принциповим завданням є необхідність окремо аналізувати статичну та динамічну поведінку сипучої речовини. Адже, це є два досить різних за своєю суттю явища, які пов'язані із різною структурованістю сипучого матеріалу і тому потребують розробки різних теоретичних моделей. При цьому в кожному випадку виявляються справедливими зовсім різні початкові припущення і, як результат, кінцеві математичні залежності нерідко ведуть до явних суперечностей із експериментальними даними.

По-третє, сипуча речовина має властивості притаманні з одного боку континуальним середовищам (наприклад, здатність чинити тиск на стінки сосуду), а з іншого боку – дискретним середовищам (наприклад, залежність тиску від структурованості матеріалу). Також дуальність сипучої речовини проявляються і в іншому відношенні. Сипуча середа має властивості, з однієї сторони, твердих тіл (наприклад, можливість чинити опір зовнішнім зусиллям) і в той же час, з іншої сторони, властивості рідини (наприклад, здатність текти або заповнювати наданий об'єм).

Така виключна складність властивостей та поведінки сипучої речовини призвела до появи величезної кількості гіпотез, підходів, досліджень та теорій, які створювались ще з давніших часів та

продовжують створюватись сьогодні. Не дивно тому, що відшуканням різноманітних закономірностей, пов'язаних із сипучими матеріалами займалася досить значна кількість достатньо відомих та менш відомих науковців.

Дослідження цього питання із самого початку пішло двома різними напрямками – теоретичним і експериментальним. Вони проводились відносно незалежно один від одного, але надаючи друг другу нові дані для уточнень та коректувань.

Історично першими дослідженнями були експериментальні. Саме на основі емпіричного досвіду ще на початку нашої ери був винайдений та почав застосовуватись пісочний годинник, побудований на закономірності о постійності швидкості витікання сипучої речовини із отвору фіксованого розміру.

Перша наукова експериментальна робота, присвячена питанню дослідження витіку сипучого матеріалу із сосуду, була виконана у 1882 р. І. Робертсом. З тих пір було проведено чимало досліджень цього питання, в яких варіювались розміри сосуду, його випускного отвору, тип сипучого матеріалу та умови течії. Паралельно досліджувався й тиск сипучого матеріалу як на підпірні стінки, так і на елементи ємнісних споруд. Найбільш відомі роботи належать М. С. Бернштейну, М. Г. Бескіну, Ю. А. Березіну, Б. В. Бобрикову, В. Т. Бугайову, К. О. Бугрову, М. А. Бурмістрову, В. Н. Биковському, М. Н. Варгіну, Г. А. Генієву, Г. І. Глушкову, М. М. Гольдштейну, В. Х. Гольцману, С. С. Григоряну, В. Б. Гуревичу, Є. М. Гут'яру, Л. В. Єршову, В. С. Зеленському, Р. Л. Зенкову, М. Є. Кагану, І. І. Кандаурову, Г. К. Клейну, А. П. Ковтуну, І. І. Кочанову, В. С. Кунакові, І. П. Лінчевському, П. І. Лук'янову, І. П. Мерзлякові, В. Н. Михайличенко, М. М. Новикову, А. О. Овчинникову, П. Н. Платонову, Г. І. Покровському, В. В. Світличному, М. В. Сорокіну, С. Г. Тахтамишеву, М. І. Хаймовичу, Д. В. Шумському, Н. Н. Ященко та ішим фахівцям. Із закордонних фахівців слід відмітити Дж. Біареза, А. Є. Делакруа, Г. Ф. Дженкіна, Р. Кванілу, Г. Келлера, Н. С. Кетчума, М. Ремберта, Х. Таубманну. Результати цих робіт зібрані та проаналізовані в ряді монографій [51 – 57]. Проте вони виявляються досить суперечливими, особливо в частині експериментальних даних.

Зважаючи на це, найперша теоретична модель, запропонована в 1895 р. Г. А. Янсеним [58], виявилась настільки простою та вдалою, що без принципів змін використовується й дотепер. Вона

стала вже майже класичною, адже широко використовується як у вітчизняній, так і закордонній проектній практиці. Проведені експериментальні дослідження неодноразово свідчили про її неточність і неповну адекватність дійсній картині. Однак, ця неадекватність проявлялася лише у деяких випадках, а в інших – теоретичні й експериментальні дані майже збігалися.

Закордонними фахівцями було запропоновано ряд інших теоретичних моделей, найбільш відомі та вдалі з яких наведено в роботах [59 – 61], проте всі вони давали майже таку саму картину відповідності наявним експериментальним результатам, як і модель Г. А. Янсена. Тому до сих пір цю модель вважають в якості основної, доповнюючи її різноманітними емпіричними поправочними коефіцієнтами які призначаються в залежності від типу сипучого матеріалу та умов його зберігання.

Результатом такої величезної кількості праць стало чітке усвідомлення того факту, що треба розрізняти поведінку сипучого матеріалу у замкненому сосуді та умовно нескінченному просторі, як наприклад, при дії на підпірну стінку. В обох випадках необхідно застосовувати різні підходи, оскільки ефекти, що їх супроводжують, виявляються доволі різними.

І дослідження розпочалися з новою силою.

В результаті на тепер сформувались три основні напрямки розгляду задачі тиску сипучої речовини на стінки замкненої ємнісної конструкції.

Перший напрямок пов'язаний із розглядом сипучої речовини як сплошної континуальної середи і залученням математичного апарату класичної теорії пружності, засновником якого можна по праву вважати Г. А. Янсена. До сучасних робіт цього напрямку належать праці [62 – 65], присвячені питанням вивантаження сипучих матеріалів, також роботи [66 – 68]. Досить цікавою є робота В. Лончного, в якій запропоновано принцип порційного потоку сипучого матеріалу [69].

Проте в цілому цей напрямок виявляється, в значному сенсі, тупиковим, оскільки дуальність сипучої середи просто не приймається до уваги – дискретні властивості не фігурують ні при виводі рівнянь рівноваги, ні при визначенні потрібних коефіцієнтів. Досить переконливо це доводить вираз отриманий Ф. С. Ясинським, який вказує на ступінь точності  $T$  визначення напружень на основі при-

пущення о сплошності середовища [56]. Вона дорівнює  $\frac{1}{T} \sqrt{\frac{a}{A}}$ , де  $a$  – порядок лінійних розмірів тіла, який все ще зберігає його властивості,  $A$  – порядок лінійних розмірів тіла, в якому визначаються напруження. З неї випливає, що наприклад, якщо розміри зерна сипучого матеріалу дорівнюють всього 5 мм, то тільки на діаметрі ємності 5 м вдається досягти точності визначення напружень в 10 %. Неврахування цього факту призводить до суттєвих погрешностей при визначенні тиску сипучого матеріалу на елементи ємнісних конструкцій, а також інших закономірностей його поведінки.

Зазначимо, також, що з позицій сполошної сипучої середи ряд фахівців намагається вирішити, навіть, задачу про утворення сводів в ємнісних конструкціях [70 – 74]. Цікавою за своєю постановкою є робота [75], в якій під час досліджень використовувалась кінозйомка. В результаті було встановлено, що процес утворення та руйнування мікросводів при вивантаженні є близьким до стаціонарного Марковського процесу.

Між тим відомо, що своди самоутворюються в нижній частині випускної частини ємності, біля її отвору. Його розміри є досить незначними, і як правило не перевищують 10 – 15 розмірів зерна сипучого матеріалу. Це означає, що ефективність таких досліджень виявляється достатньо спірною.

Тому, природно, що почав активно розроблятися інший, другий напрямок вирішення задачі тиску сипучої речовини на стінки замкненої ємнісної конструкції. Він пов'язаний із розглядом сипучої речовини як дискретної зернистої структури і залученням в цьому випадку вже інших методів для опису його поведінки - статистичних. Засновниками цього напрямку можна вважати М. С. Бернштейна, І. І. Кандаурова, Г. І. Покровського.

Серед сучасних розробок науковців слід відзначити роботи [76, 77]. Проте цей напрямок, також, не можна вважати перспективним, оскільки, як і в попередньому випадку, до уваги приймається лише одна сторона природи сипучого матеріалу. Зрозумілим стає, що необхідно враховувати одночасно і сплошність, і дискретність сипучої середи.

Саме цьому присвячений третій напрямок. Він є відносно новим, тому поки що не має на своєму рахунку значної кількості досліджень. В числі перших робіт, в яких наголошувалось на існуючий зв'язок між типом структури сипучого матеріалу та його здат-

ністю розподіляти зусилля необхідно відмітити роботи [78, 79]. Проте основу досліджень заклав проф. В. О. Богомягких, який в роботі [80] ввів поняття кут укладки зерен сипучого матеріалу та відзначив певні випадки структури матеріалу, для яких цей кут можна визначити.

Суттєвим проривом в цьому напрямку є робота Л. В. Гячева [81]. В ній Л. В. Гячевим побудовано повну теорію руху сипучої речовини в ємнісній конструкції, а статична задача визначається як частковий випадок цієї динамічної задачі.

На основі цих робіт в останній час з'явилась ціла низка розробок [82 – 87], які спрямовані на використання запропонованого підходу й отриманих теоретичних рішень для вирішення різноманітних прикладних задач.

В роботах [88, 89] дуже вдало зібрані та проаналізовані всі основні наявні підходи до визначення тиску сипучого матеріалу в ємнісних конструкціях. Як відмічають автори, більшість цих підходів враховують тільки декілька властивостей сипучої речовини і тому виявляються недосконалими.

Окрему увагу приділено й теорії проф. В. О. Богомягких та Л. В. Гячева. Вказується на безсумнівні переваги використаного цими авторами дуального підходу до визначення властивостей сипучого матеріалу. Проте зазначається, що наявні експериментальні дані повністю не підтверджують ці моделі. Адже, наприклад, з моделей випливає, що при зменшенні розмірів зерна сипучої речовини тиск від неї на стінки сосуду збільшується аж до нескінченності.

Під час уважного аналізу роботи Л. В. Гячева [81] автором даної монографії були встановлені деякі спрощення, прийняті в теорії. Так, наприклад, коефіцієнт опору руху сипучого матеріалу визначається, як і слід за логічною побудовою, із врахуванням його дискретної структури, однак аналогічний за змістом коефіцієнт нормального тиску – вже без такого врахування.

Далі, в основу моделі покладено рівномірний рух елементарного шару сипучого матеріалу, проте під час руху в ємності із стінками, які звужуються, остання обставина не приймається до уваги. Як сам зазначає автор моделі, сипучий матеріал стискаються в точку. Однак це суперечить, навіть, простим фізичним уявленням.

До того ж як свідчать наявні експериментальні дані, структура матеріалу під час руху суттєво відрізняється від структури матеріалу в стані спокою – відбувається його розрихлення в зоні навко-

ло випускного отвору. Тому розглядати статичну задачу як частковий випадок динамічної принципово некоректно, адже структура сипучого матеріалу виявляється доволі різною.

Таким чином, проблема побудови адекватної та сучасної теоретичної моделі сипучої середи, яка знаходиться в замкненій ємнісній конструкції, залишається невирішеною. Її розробка та експериментальне підтвердження потребують проведення подальших досліджень.

Зазначимо далі, що коректна побудова такої теоретичної моделі виявляється неможливою без спеціального визначення коефіцієнту бокового тиску сипучого матеріалу  $K$ . Він визначає співвідношення вертикального  $P_v$  та горизонтального тиску  $P_h$  в сипучій речовині за виразом (1.1):

$$P_h = K \cdot P_v. \quad (1.1)$$

Для більшості типів рідин цей коефіцієнт дорівнює 1, що було науково доведено досить давно. Для твердих ізотропних матеріалів цей коефіцієнт може бути знайдено за нескладними виразами теорії пружності. Для випадку вертикального симетричного навантаження коефіцієнт  $K$  може бути визначений за виразом (1.2), де він залежить від коефіцієнту Пуасона  $\mu$ :

$$K = \frac{\mu}{1 - \mu}. \quad (1.2)$$

Для сипучої речовини питання щодо визначення коефіцієнту бокового тиску залишається відкритим й досі.

Одним з перших вираз для його знаходження отримав В. Ренкін, розглядаючи рівновагу сипучого клину у необмеженому просторі та вважаючи сипучий матеріал континуальним (табл. 1.1). Цей вираз виявився достатньо простим та придатним для практичного використання, тому швидко увійшов у різноманітні теоретичні моделі. Для замкнених посудів силосного типу вираз В. Ренкіна вперше використав Г. А. Янсен. Отримане рішення виявилось настільки простим, що швидко стало складовою частиною багатьох рекомендацій щодо проектування силосних ємностей. Коефіцієнт боко-

вого тиску, навіть, іноді помилково називають коефіцієнтом Янсена, настільки природно він вписався в його теорію.

Таблиця 1.1

**Вирази для визначення коефіцієнту бокового тиску  
сипучої речовини**

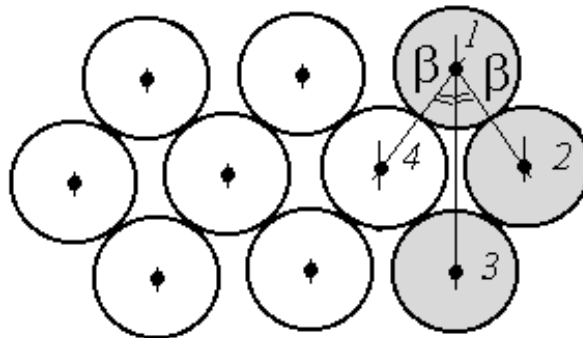
Речовина, автор	Вираз	Значення
рідина	$K=1$	1,00
тверде тіло, сипуче тіло <i>Е. М. Гут'яр</i>	$K = \frac{\mu}{1-\mu}$	$\mu = 0,1$ 0,11 $\mu = 0,3$ 0,43 $\mu = 0,5$ 1,00
сипуче тіло <i>В. Ренкін</i>	$K = \frac{1-\sin\psi}{1+\sin\psi}$	$\psi = 15^\circ$ 0,59 $\psi = 25^\circ$ 0,41 $\psi = 35^\circ$ 0,27
сипуче тіло <i>М. Жакі</i>	$K = 1 - \sin\psi$	$\psi = 15^\circ$ 0,74 $\psi = 25^\circ$ 0,58 $\psi = 35^\circ$ 0,43
сипуче тіло <i>Ж. Біарез</i>	$K = \frac{1-\sin\psi}{\cos\psi}$	$\psi = 15^\circ$ 0,77 $\psi = 25^\circ$ 0,64 $\psi = 35^\circ$ 0,52
сипуче тіло <i>Г. І. Покровський</i>	$K = 1 - 0,74 \cdot \text{tg}\psi$	$\psi = 15^\circ$ 0,80 $\psi = 25^\circ$ 0,66 $\psi = 35^\circ$ 0,48

Згодом було запропоновано ряд інших виразів для визначення цього коефіцієнту. За даними робіт [49, 51 – 56, 90] найбільш поширені з них зібрані в табл. 1.1. Там же наведені кількісні значення, які може приймати цей коефіцієнт в залежності від основної, як вважається, визначальної фізико-механічної характеристики сипучої речовини – кута внутрішнього тертя  $\psi$ .

Слід зауважити, що всі наведені вирази були отримані при розгляді сипучої речовини як континуального масиву. На цей недолік було звернуто увагу проф. В. А. Богомягких в його роботі [80], де він запропонував враховувати дискретні властивості сипучого матеріалу, зокрема ввів поняття кута укладки його зерен  $\beta$ .

Під цим параметром розуміється кут, що утворюється вертикальною віссю і віссю, що сполучає центри двох сусідніх зерен-

куль сипучого матеріалу (рис. 1.9). При цьому необхідно окремо розглядати поняття укладки зерен сипучого матеріалу, що передбачає характер взаємного розташування окремих зерен в матеріалі.

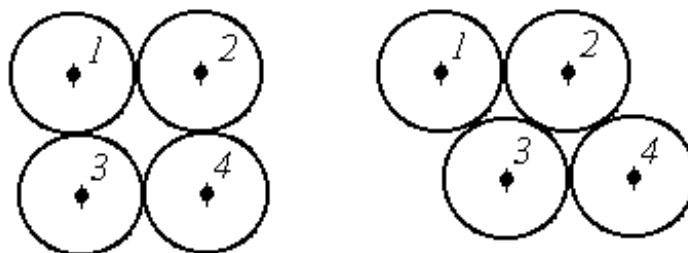


**Рис. 1.9. Кут укладки зерен сипучого матеріалу**

Щоправда різні автори вказують на різний можливий характер укладки зерен сипучого матеріалу та, відповідно, різні можливі діапазони його зміни.

Так, згідно В. А. Богомягих [80] кут укладки не є постійним, а залежить від кута витікання і його діапазон зміни тому може бути довільним. Що розуміється при цьому під кутом витікання та як його визначати залишається при цьому не зовсім зрозумілим.

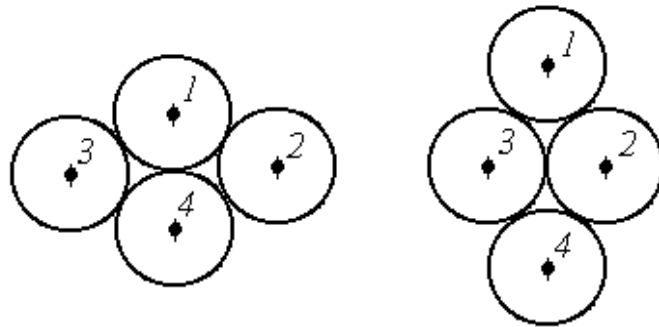
Т. Б. Денисова в роботі [79] приводить два можливі граничні плоскі випадки розташування зерен сипучого матеріалу (рис. 1.10). Відповідний діапазон зміни кута укладання складає при цьому  $0 - 30^\circ$ .



**Рис. 1.10. Кут укладання зерен сипучого матеріалу за Т. Б. Денисовій**

Згідно Л. В. Гячеву [81] для плоского випадку граничне укладання зерен сипучого матеріалу має вигляд зображений на рис. 1.11. При цьому діапазон можливої зміни кута укладки складає  $30$

– 60°. У випадку просторового розташування зерен реального сипучого матеріалу (не форми кулі та різних за розміром) вказується на можливість зміни кута укладки від 0 до 90°.



**Рис. 1.11. Кут укладки зерен сипучого матеріалу за Л. В. Гячевим**

З кутом укладки зерен сипучого матеріалу послідовники дискретно-континуального підходу зв'язують вирази для знаходження коефіцієнту бокового тиску

Л. В. Гячевим в його роботі [122] був отриманий наступний вираз (1.3) для його знаходження:

$$K = \frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{2 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg} \beta}. \quad (1.3)$$

За даними автора значення цього коефіцієнту змінюються в діапазоні 0 - 1,5.

Наступним важливим моментом, на який слід неодмінно звернути увагу є можливість виникнення ряду специфічних динамічних ефектів. Їх поява відмічалась фахівцями як при проведенні експериментальних досліджень, так і під час експлуатації ємнісних конструкцій.

Узагальнюючи отримані при цьому дані представляється можливим виділити чотири подібних ефекти:

- 1) ударна дія при падінні глиби сипучого матеріалу на стінку ємності (в режимі завантаження);
- 2) вібраційна пульсація споруди при вивантаженні сипучого матеріалу (в режимі вивантаження);
- 3) ефект підвищення тиску (в момент початку вивантаження сипучого матеріалу);

4) ефект типу “гідравлічний удар” при швидкому припиненні вивантаження сипучого матеріалу (в момент закінчення режиму вивантаження).

Перший ефект – ударна дія – відомий досить давно. Він є, безумовно, досить небезпечним явищем. Проте за характером своєї дії він нічим не відрізняється від інших ударних дій, які властиві, наприклад, більшості транспортних машин. Відповідно, його вивченню присвячені не тільки роботи у галузі ємнісних будівельних конструкцій, а й наприклад, в галузі будівництва вагонів для сипучих матеріалів на залізничному транспорті [91, 92].

За своїми наслідками такий ефект є досить небезпечним. Проте, це справедливо по відношенню до незахищених конструкцій і їх елементів. Адже для конструкцій ємностей вже достатньо давно розроблені дуже ефективні засоби, що нівелюють цей ефект. Вони умовно можуть бути поділені на декілька типів.

До першого типу відноситься установка спеціальних протиударних футерувальних плит. Так, наприклад, в роботі [39] приведений понад десяток їх конструктивних різновидів з достатньо докладними і точними рекомендаціями щодо умов їх застосування, місця і способу установки на стінки ємності. При цьому в подальших розрахунках конструкцій використовується квазістатичний підхід і вводиться спеціальний коефіцієнт динамічності.

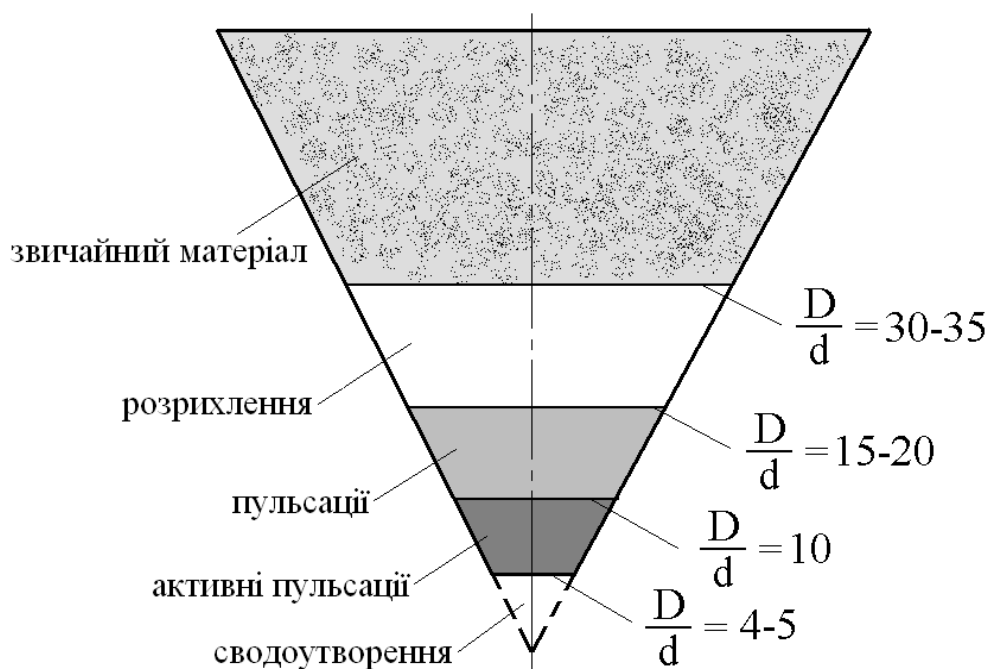
До другого типу відносяться засоби попереднього подрібнення сипучої речовини на окремі фрагменти з масою, що дозволяє використовувати футерувальні плити першого типу. Безсумнівно, це дещо здорожує весь технологічний цикл, однак цілком зіставно з втратами від постійного ремонту і заміни пошкоджених частин експлуатованих конструкцій ємностей. При цьому слід пам’ятати, що завантажуваний в ємнісну конструкцію сипучий матеріал має бути сипучим, але ніяк не глибовим або кусковим.

До третього типу відноситься встановлення спеціальної захисної решітки на вході споруди, як рекомендовано в роботах [31, 32, 39, 42 – 46].

Окрім цього для високих ємнісних конструкцій відомі різноманітні, так звані, завантажувальні вертушки, що дозволяють не скидати сипучий матеріал всередину ємності, а плавно його засипати. Здебільшого такі пристрої використовують у спорудах сільськогосподарського призначення.

Відносно дії вібраційної пульсації картина також виявляється достатньо зрозумілою. Згідно багатьох досліджень встановлено чіткі умови, при яких розпочинається та триває цей процес. Вони узагальнені в роботі [81] і зводяться до проектування ємнісної конструкції таким чином, щоб максимально звузити наявні небезпечні зони.

На рис. 1.12, складеному автором даної монографії, наведено їх розташування, яке залежить від параметру  $D/d$  ( $D$  – характерний розмір поперечного перерізу ємності,  $d$  - розмір зерна сипучого). Причому виявляється неважливим, за яким законом відбувається зміна горизонтального перерізу ємності.



**Рис. 1.12. Зони розташування сипучого матеріалу в ємнісній конструкції**

Згідно дослідних даних при русі сипучого матеріалу відбувається якісна зміна його структури, в першу чергу, характеру укладки зерен. Так, якщо значення параметру  $D/d$  перевищує число 35, то рух зерен сипучого матеріалу відбувається достатньо вільно і ніяких небажаних ефектів, у тому числі і динамічних, не відбувається. Як тільки зерна сипучого матеріалу переходять цю умовну межу, то в масі сипучого починається процес утворення невеликих сводів. Вони є дуже нестійкими і в процесі руху маси матеріалу швидко руйнуються завдяки взаємодії із навколишніми зернами.

Проте в цілому це приводить до розрихлення маси сипучого з огляду на те, що своди, що утворюються, встигають до свого руйнування “загальмувати” рух вище розташованих зерен. При подальшому зменшенні значення параметру  $D/d$  (подальшому звуженні ємності) своди стають все більш стійкими за рахунок все зростаючій жорсткості опорних ділянок, розташованих у стінок ємності. При цьому вони починають руйнуватися вже не так легко, як в зоні розрихлення, а з деяким зусиллям і «стрибкоподібно», що й приводить до виникнення інтегрального ефекту пульсації в масі сипучого матеріалу. Даний ефект постійно посилюється, досягаючи свого максимуму при величині параметру  $D/d$  в діапазоні 5 – 10. При подальшому ж зменшенні поперечного перерізу ємності відбувається утворення стійкого своду і рух матеріалу повністю припиняється.

Таким чином, щоб уникнути розвитку пульсаційного ефекту необхідно й достатньо зменшити довжину зони пульсацій. Конструктивно це може бути реалізовано або за рахунок зменшення кута нахилу стінок випускної частини ємності до горизонталі, або за рахунок збільшення розмірів випускного отвору, а також комбінацією цих двох прийомів. У випадку, якщо й вони виявляються неможливими, слід виконувати відповідне підсилення нижньої частини конструкції за допомогою кільцеподібних діафрагм жорсткості.

Щодо ефекту підвищення тиску від сипучого матеріалу на елементи ємності, то наявного пояснення йому у фаховій літературі поки немає. Багато дослідників констатують лише його появу [49, 53 – 57], намагаючись його відстежити в штучно створених умовах [93], проте придатна теоретична модель для цього випадку, на жаль, поки автору даної монографії не відома.

В роботі [88, с. 22] з цього приводу справедливо відмічається: «Промзернопроект, Гидрониисельстрой и другие организации проводили обширные исследования деформаций и аварий железобетонных силосов в стране. Одна из основных причин преждевременного разрушения силосов – наличие давлений, значительно превосходящих расчетные формулы Янсена. Было отмечено: 1. Разрушение обычно имело место в момент выпуска сыпучего материала... До сих пор нет ясного представления причин появления избыточных давлений...». Тому існує необхідність в окремому дослідженні цього питання.

Останній динамічний ефект типу “гідравлічний удар” належить до найменше вивчених. Автор зустрів в спеціальній літературі тільки згадку про можливість його виникнення [88] з обмовкою, що ефект виявляється тільки у разі швидкого закриття випускного отвору ємності. Нормативна ж література про нього повністю умовчує. У зв'язку з цим автор на смілюється викласти свою суб'єктивну точку зору на природу даного явища, жодною мірою не претендуючи на підміну нею реальної картини речей.

Саме формулювання явища – “гідравлічний удар” - не випадково узятая автором в лапки, оскільки описуване явище відрізняється від добре відомого явища в рідких середовищах. В них при швидкій зупинці рідини виникає додатковий інерційний тиск, що й створює вказаний ефект. При цьому рідина практично не стискається.

Відносно ж сипучого середовища цього сказати не можна. Зона розрихлення, що утворюється в нижній частині “поток”, дозволяє при його різкій зупинці сипучому матеріалу стиснутися, рухаючись за інерцією. Тому даний ефект, в значному ступені, нівелюється. Проте, також, існує необхідність в окремому дослідженні цього питання.

Таким чином, перших двох вказаних динамічних ефекти можна повністю уникнути завдяки вірному та грамотному проектуванню ємнісної конструкції. Останні два ефекти потребують проведення більш серйозних досліджень та розробки спеціальних математичних моделей. Хоча на його думку, й їх при грамотному та теоретично обґрунтованому підході можна буде повністю уникнути.

### **1.2.3. Офіційні підходи до опису поведінки сипучого матеріалу**

Основним діючим на тепер нормативним документом, який регламентує в тому числі й питання проектування сталевих ємнісних будівельних конструкцій в Україні, є чинний дотепер СНиП II-23-81\* [94]. Розділ 8 “Расчет листовых конструкций” цього документу містить загальні рекомендації з питань оцінки міцності та стійкості оболонок обертання, які є фрагментами різних видів листових конструкцій. Проте, наведені лише критеріальні умови щодо рівня напружень в таких оболонках, а питання їх визначення залишаються поза межами уваги.

Найявні рекомендації щодо конструювання наведені в розділі 13 “Дополнительные требования по проектированию производственных зданий и сооружений” і в цілому мають загальний характер.

Всі питання, пов’язані із класифікацією ємнісних конструкцій, визначенням навантажень та зусиль в їх елементах наведені в спеціалізованому нормативному документі ДБН В.2.2-8-98 [17], який замінив на території України старі норми СНиП 2.10.05-85 [37]. За своїм змістом обидва ці нормативні документи достатньо тотожні і в концептуальному відношенні нові норми повністю дублюють принципові основи старого документу.

Додатково в іншому діючому нормативному документі СНиП 2.09.03-85 [38] наводяться ще ряд конструктивних рекомендацій, спрямованих, переважно, на організацію захисту внутрішніх поверхонь ємностей від негативного впливу сипучої середи під час експлуатації (абразивний знос, дія підвищених температур, тощо). Рекомендації цих чинних нормативних документів не протирічать між собою, а скоріше, навпаки, доповнюють один одного.

Розрахунок конструктивних елементів ємнісних споруд рекомендується виконувати з урахуванням постійних навантажень від власної ваги елементів самої конструкції та перекриття над ємністю. Основним навантаженням вважається статичний тиск від сипучого матеріалу на стінки ємності.

Для силосних ємностей цей тиск рекомендується визначати за теорією Г. А. Янсена, з урахуванням тертя між сипучим матеріалом та стінками конструкції. Оскільки накопичений досвід експлуатації свідчить про недостатню точність цієї теорії, то використовується система спеціальних емпіричних поправочних коефіцієнтів, які призначаються диференційовано для різних зон по висоті ємності і на які треба множити отримані значення тиску сипучого матеріалу. Величина цих коефіцієнтів сягає значення 2,0. Зазначена епюра має асимптотичний нелінійний вигляд.

Динамічні ефекти, які можуть супроводжувати процес вивантаження сипучого матеріалу з ємності, враховують прикладанням спеціальних додаткових локального та полосового тисків. Цікаво, що місце їх прикладання точно не визначено – передбачається можливість їх дії довільно по висоті споруди.

Для бункерних ємностей тиск від сипучого матеріалу на стінки рекомендується визначати за гідростатичним законом, як для

звичайної рідини, без урахування сил тертя між сипучим матеріалом та елементами конструкції. Епюра тиску сипучого матеріалу на стінки ємнісної конструкції при цьому має лінійний вигляд.

Проблема переходу від вертикального тиску сипучого матеріалу до горизонтального для обох типів ємностей вирішується за допомогою використання коефіцієнту бокового тиску  $K$ , що визначається відповідно до теорії В. Ренкіна за виразом (1.4):

$$K = \frac{1 - \sin \psi}{1 + \sin \psi} = \operatorname{tg}^2 \left( 45^\circ - \frac{\psi}{2} \right). \quad (1.4)$$

Приклади практичного розрахунку тиску сипучого матеріалу можна знайти в багатьох спеціалізованих виданнях, як наприклад [39, 95, 96].

Щодо закордонних підходів до опису сипучого матеріалу, то як відомо, в країнах Європейської Співдружності в теперішній час розробляється Єдина європейська система нормативних документів в будівництві. По відношенню до ємнісних споруд документом, який регламентує питання визначення навантажень, є prEN 1991-4 [97].

В ньому концептуально перевага віддається більш детальному врахуванню властивостей сипучого матеріалу, ніж у вітчизняних документах. Так, наявні рекомендації щодо врахування таких ефектів, як консолідація, сегрегація і деградація сипучого матеріалу під час його тривалого зберігання. Вказується на зв'язок виникнення небажаних динамічних ефектів із цими явищами.

Для визначення тиску від сипучого матеріалу на стінки ємності використовуються відразу декілька підходів, вибір яких залежить від самого інженера. Перевага надається теорії Г. А. Янсена, звісно, із додатковими поправочними коефіцієнтами. Однак їх величина суттєво різниться і коливається в межах 1,3 – 2,5 в залежності від типу сипучого матеріалу. Іншим розповсюдженим підходом є теорія М. Ремберта, як багато в чому виявляється близькою до теорії Г. А. Янсена і тому теж потребує відповідних поправочних коефіцієнтів.

Досить цікавим є факт, на який окремо звертається увага: при вивантаженні сипучого матеріалу його тиск збільшується. Цей ефект намагаються врахувати знов за допомогою ще одного попра-

вочного коефіцієнту, значення якого також залежить від виду сипучого матеріалу.

Можливі динамічні ефекти, як і у вітчизняному підході, враховують прикладанням спеціальних додаткових локального та полюсового тисків на стінки ємності.

Окремо слід визначати коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу, для якого використовують як залежність (1.4), так і інші залежності (1.5):

$$K=1-\sin\psi, \quad K = \frac{1 - \sin\psi}{\cos\psi}. \quad (1.5)$$

Рекомендується, навіть, приймати для кожного з видів сипучого матеріалу своє емпірично встановлене значення, замість його визначення за одним з аналітичних виразів.

Для зручності користування розрахункові вирази за переліченими офіційними теоріями представлені в табл. 1.4. Деякі з наведених в ній умовних позначень вже згадувались в попередньому тексті даної монографії, але з міркувань зручності користування наведемо їх ще раз:

$P_v(y)$  – вертикальний тиск сипучого матеріалу;

$P_h(y)$  – горизонтальний тиск сипучого матеріалу;

$y$  – глибина, на якій визначається тиск сипучого матеріалу;

$A$  – площа горизонтального поперечного перерізу ємнісної конструкції, в місці визначення тиску сипучого матеріалу (на глибині  $y$ );

$U$  – периметр (довжина кола) горизонтального поперечного перерізу ємнісної конструкції, в місці визначення тиску сипучого матеріалу (на глибині  $y$ );

$\psi$  – кут внутрішнього тертя між зернами сипучого матеріалу;

$\varphi$  – кут зовнішнього тертя о матеріал стінок конструкції;

$\alpha$  – кут нахилу стінок конструкції до горизонту;

$\gamma$  – об'ємна вага сипучого матеріалу;

$g$  – прискорення вільного падіння ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ );

$K$  – коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу;

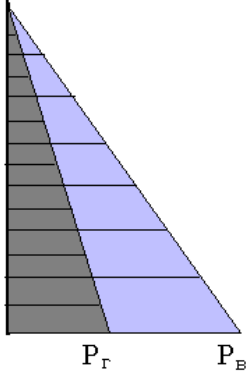
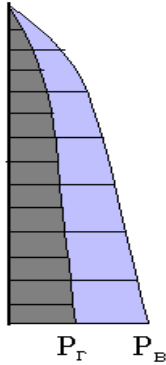
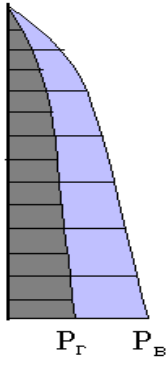
$m_0$  – коефіцієнт передачі тиску сипучого матеріалу;

$a$  – поправочний статичний коефіцієнт;

$k^d$  – поправочний динамічний коефіцієнт.

Таблиця 1.4

**Статичний тиск сипкого матеріалу  
згідно прийнятим нормативним підходам**

Розрахункові залежності для визначення тиску	Епюра тиску
<p align="center">Вітчизняна школа (бункерні ємності) - гідростатичний тиск</p> $P_{\epsilon}(y) = \gamma \cdot g \cdot y$ $P_z(y) = K \cdot P_{\epsilon}(y) \quad K = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \psi/2)$ $P_n(y) = m_0 \cdot P_{\epsilon}(y) \quad m_0 = \cos^2 \alpha + k \cdot \sin^2 \alpha$	
<p align="center">Вітчизняна школа (силосні ємності) - формула Г. А. Янсена</p> $P_{\epsilon}(y) = a \cdot \frac{\gamma \cdot g \cdot A}{K \cdot U \cdot \operatorname{tg} \varphi} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot U \cdot \operatorname{tg} \varphi}{A} \cdot y}\right) \quad a = 1,03 - 2,25$ $P_z(y) = K \cdot P_{\epsilon}(y) \quad K = \operatorname{tg}^2(45^\circ - \psi/2)$	
<p align="center">Західна школа (всі типи ємностей) - формули Г. А. Янсена або М. Ремберта</p> $P_{\epsilon}(y) = k^d \cdot a \cdot \frac{\gamma \cdot g \cdot A}{K \cdot U \cdot \operatorname{tg} \varphi} \cdot \left(1 - e^{-\frac{K \cdot U \cdot \operatorname{tg} \varphi}{A} \cdot y}\right)$ $P_{\epsilon}(y) = k^d \cdot a \cdot \gamma \cdot g \cdot (1 + y)^{-1} \cdot y$ $a = 1,2 - 2,4 \quad k^d = 1,1 - 1,2 \quad K = \frac{1 - \sin \psi}{1 + \sin \psi}$ $P_z(y) = K \cdot P_{\epsilon}(y)$	

Цікаво відзначити також, що згідно вітчизняній нормативно-довідковій літературі тиск на дно ємностей не визначається, хоча теоретично він цілком може бути обчислений; зарубіжна ж нормативна література в обов'язковому порядку передбачає його врахування. Мабуть, дана обставина обумовлена тим, що максимальне значення тиску за теорією В. Ренкіна виходить достатньо завищеним. Тому тиск на дно, що має до того ж незначну площу, у вітчизняній проектній практиці просто не приймається до уваги.

## **Розділ 2.**

### **Авторська концепція поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції**

Даний розділ присвячено викладенню розробленої теоретичної авторської моделі, яка описує поведінку сипучої середи в замкненому посуді, що являє собою ємнісна будівельна конструкція.

Наведено основні передумови та припущення, прийняті при розробці моделі. Подано загальне рішення, яке може бути використано для конструкцій різної зовнішньої форми та геометричних розмірів. Також отримано ряд часткових рішень для найбільш розповсюджених в практиці проектування типів ємнісних споруд.

## **Раздел 2.**

### **Авторская концепция поведения сыпучего материала в емкостной конструкции**

Данный раздел посвящен изложению разработанной теоретической авторской модели, описывающей поведение сыпучей среды в замкнутом сосуде, который представляет собой емкостная строительная конструкция.

Приведены основные предпосылки и допущения, принятые при разработке модели. Представлено общее решение, которое может быть использовано для конструкций различной внешней формы и геометрических размеров. Также получены ряд частных решений для наиболее распространенных в практике проектирования типов емкостных сооружений.

## 2.1. Передумови розробки концепції

В основі представленої автором концепції поведінки сипучого матеріалу в ємнісній будівельній конструкції знаходиться розроблена модель взаємодії сипучого матеріалу із елементами жорсткого замкненого сосуду. При цьому до уваги були прийняті всі перелічені в підрозділі 1.2 монографії особливості побудови такої моделі.

По-перше, модель розроблялась спеціально для умов знаходження сипучого матеріалу в жорсткому замкненому сосуді, тобто просторі обмеженому абсолютно жорсткими стінками.

По-друге, модель спрямована на опис статичної поведінки сипучого матеріалу. Аналіз динамічної поведінки потребує розробки зовсім іншої моделі, яка б враховувала зміну зернової структури матеріалу при його русі в сосуді. Проте деякі умовно динамічні ефекти, як наприклад, ефект підвищення тиску матеріалу в момент початку його вивантаження, як виявляється, можуть бути повністю описані за допомогою статичної моделі.

По-третє, модель будується на врахуванні спершу континуальних властивостей сипучого матеріалу. Це дає змогу використовувати співвідношення механіки сплошної середи та скласти диференціальне рівняння рівноваги елементарного горизонтального шару такої середи. Дискретні властивості включаються в таку модель далі за допомогою спеціального коефіцієнту.

По-четверте, сипучий матеріал розглядається як специфічний різновид матеріалів, який не є своєрідним частковим випадком ані твердих тіл, ані рідин. Він має явно виражену зернову структуру, і складається з окремих абсолютно жорстких зерен, між якими виникають тільки сили тертя. Сили зчеплення при цьому передбачаються настільки малими, що ними можна нехтувати.

І останнє, по-п'яте, в моделі не передбачається будь-яких обмежень за зовнішньої формою, геометричними розмірами або видом та фракційним составом сипучого матеріалу. В цьому розуміння вона є досить універсальною, і задумувалась та розроблялась автором саме такою.

## 2.2. Дискретно-континуальна модель

### 2.2.1. Континуальна модель

В якості континуальної моделі сипучого середовища приймемо наступну фізичну модель (рис. 2.1).

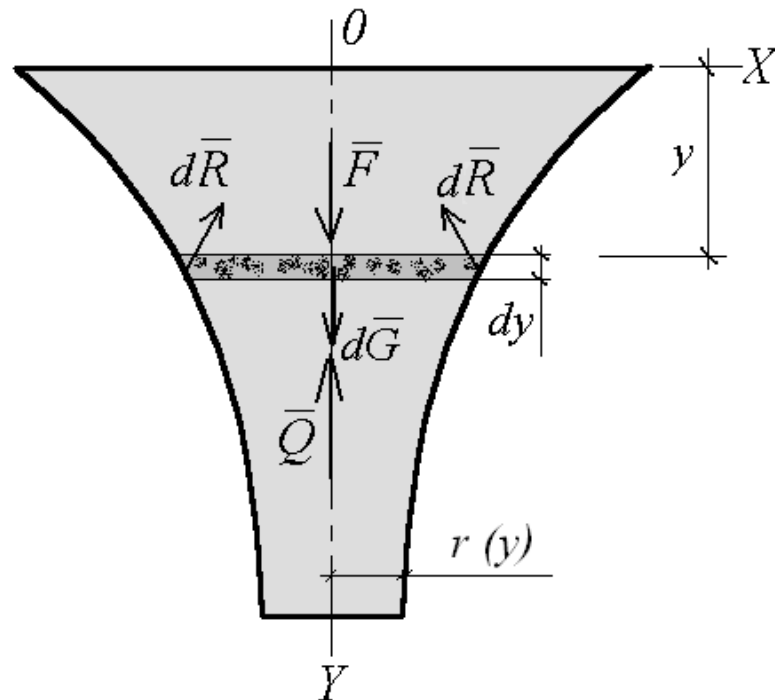
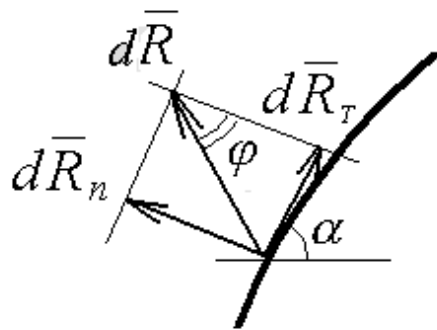


Рис. 2.1. Континуальна модель сипучого середовища

Модель являє собою сипучу речовину, розташовану у ємнісній конструкції. Координатні вісі спрямовані так, як зображено на рис. 2.1. На відміну від моделі Г. А. Янсена стінки ємності не є вертикальними, а мають довільну форму, яка визначається залежністю  $R(y)$ . Із масиву сипучої речовини двома горизонтальними паралельними площинами виділяється елементарний шар завтовшки  $dy$ . На відміну від моделі Л. В. Гячева, де сипучий матеріал рівноприскорено рухається, в даній моделі елементарний шар сипучого матеріалу знаходиться у статичній рівновазі разом із усією масою сипучої речовини.

Розглянемо сили, що діють на елементарний шар. Зверху вертикально вниз спрямоване зусилля від ваги вищерозташованої маси сипучої речовини, позначене як  $F$ . Знизу на елементарний шар діє

реакція від нижчерозташованого сипучого матеріалу –  $Q$ . Сам шар має власну вагу  $dG$ , спрямовану вертикально вниз. З боку стінок ємності на елементарний шар діє реакція  $dR$ , спрямована під довільним кутом. Вона може бути представлена у вигляді векторної суми нормальної  $dR_n$  та дотичної  $dR_\tau$  складових реакції, відповідно до рис. 2.2.



**Рис. 2.2. Реакції стінки ємнісної конструкції**

В довільній точці стінка має кут нахилу до горизонту  $\alpha$ , який є функцією від форми стінки  $R(y)$ . Кут  $\varphi$  є кутом зовнішнього тертя сипучого матеріалу о матеріал стінки ємності.

Спроекуємо всі діючі сили на вертикальну вісь  $OY$ . Оскільки елементарний шар знаходиться в рівновазі, то сума проєкцій цих сил має дорівнювати нулю. Отримаємо вираз (2.1):

$$\sum Y = F + dG - \sum dR_{ny} - \sum dR_{\tau y} - Q = 0. \quad (2.1)$$

Розглянемо кожен із складових, що входять до цього виразу, більш детально. Реакція від нижче розташованої маси сипучого матеріалу може бути записана у вигляді виразу (2.2), а вага елементарного шару у вигляді виразу (2.3):

$$Q = F + dF, \quad (2.2)$$

$$dG = g \cdot dm = g \cdot \gamma \cdot A \cdot dy, \quad (2.3)$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння,

$dm$  – маса елементарного шару сипучого матеріалу завтовшки  $dy$ ,

$\gamma$  - щільність сипучого матеріалу,

$A$  – площа елементарного шару сипучого матеріалу.

Найбільш невизначеними складовими рівняння (2.1) є проєкції реакцій стінки. Їх виникнення обумовлено передачею частини ваги від вищерозташованої маси сипучого матеріалу  $F$  на стінки ємності. Тому логічно припустити, що кожна з реакцій пропорційна цій масі. Тому вони можуть бути записані у вигляді виразів (2.4) і (2.5), в яких використано поки що невідомі коефіцієнти пропорційності  $k_n$  і  $k_\tau$ , запропоновані автором даної дисертаційної роботи:

$$\sum dR_n = k_n \cdot F \cdot dy, \quad (2.4)$$

$$\sum dR_\tau = k_\tau \cdot F \cdot dy. \quad (2.5)$$

Знак суми необхідно вводити для того, щоб показати, що реакції стінок мають бути зібрані по периметру ємності (елементарного шару). Якщо далі використати відому залежність Кулона, то вираз (2.5) може бути записаний у вигляді (2.6):

$$\sum dR_\tau = \operatorname{tg} \varphi \cdot \sum dR_n = k_n \cdot F \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot dy. \quad (2.6)$$

Отримані вирази (2.2) – (2.4) і (2.6) підставимо в рівняння (2.1). Воно прийме вигляд виразу (2.7):

$$F + g \cdot \gamma \cdot A \cdot dy - k_n \cdot F \cdot dy \cdot \cos \alpha - k_n \cdot F \cdot dy \cdot \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi - F - dF = 0. \quad (2.7)$$

Після алгебраїчних перетворень рівняння може бути записано у вигляді (2.8):

$$\frac{dF}{dy} + F \cdot k_n (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) - \gamma \cdot g \cdot A = 0. \quad (2.8)$$

Тепер виконаємо перехід від зусиль до тиску сипучого матеріалу. Вертикальне зусилля  $F$  може бути представлено через вертикальний тиск  $P_g$  згідно з виразом (2.9):

$$F = P_{\epsilon} \cdot A. \quad (2.9)$$

Тоді похідна може бути записана у вигляді виразу (2.10):

$$\frac{dF}{dy} = \frac{\partial P_{\epsilon}}{\partial y} \cdot A + P_{\epsilon} \cdot \frac{\partial A}{\partial y}. \quad (2.10)$$

Відповідне співвідношення, які зв'язує між собою площу горизонтального перерізу  $A$  ємності із функцією форми її бічної поверхні для симетричної в плані ємності із кількістю сторін  $n$  в плані та шириною випускного отвору  $a_0$  має вигляд виразу (2.11):

$$A = n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot C^2(y) = n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot (a_0 + R(y))^2. \quad (2.11)$$

Тоді часткова похідна від нього буде мати вигляд виразу (2.12):

$$\frac{\partial A}{\partial y} = 2 \cdot n \cdot \operatorname{tg}(\pi/n) \cdot (a_0 + R(y)) \cdot \frac{dR(y)}{dy}. \quad (2.12)$$

Оскільки функція тиску сипучого матеріалу  $P_{\epsilon}$  залежить тільки від змінної  $y$  (глибини розташування від поверхні), то достатньо виправданим буде перехід від часткових похідних до повних відповідно до (2.13):

$$\frac{\partial P_{\epsilon}}{\partial y} = \frac{dP_{\epsilon}}{dy}. \quad (2.13)$$

Підставимо вирази (2.9) – (2.13) в рівняння (2.8). Після відповідних алгебраїчних перетворень воно може бути записано у вигляді виразу (2.14):

$$\frac{dP_{\epsilon}}{dy} + P_{\epsilon} \left( k_n \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{2 \cdot \frac{dR(y)}{dy}}{a_0 + R(y)} \right) - \gamma \cdot g = 0. \quad (2.14)$$

Отримане рівняння є основним диференціальним рівнянням рівноваги сипучого матеріалу, що знаходиться в замкненій ємності із довільною геометричною формою бічної поверхні. Рівняння є достатньо універсальним в плані можливості врахування форми ємності, адже будь-яка з них може бути представлена у вигляді неперервної або, принаймні, кусково-неперервної функції. Єдиним обмеженням є можливість його застосування тільки для двоякоциметричної в плані ємності. Будь-яка асиметрія потребує внесення коректив у вираз (2.11).

Диференціальне рівняння може бути записано у більш компактній формі (2.15), якщо замість виразу в дужках використати додаткову допоміжну функцію  $f(y)$ :

$$\frac{dP_e}{dy} + P_e \cdot f(y) - \gamma \cdot g = 0. \quad (2.15)$$

З математичної точки зору рівняння (2.15) є лінійним неоднорідним диференціальним рівнянням першого порядку. Відомо його загальне рішення [98], яке в даному випадку буде мати вигляд виразу (2.16), а інтеграл від допоміжної функції - вигляд (2.17):

$$P_e(y) = e^{-\int f(y) \cdot dy} \cdot (\gamma \cdot g \cdot \int e^{\int f(y) \cdot dy} \cdot dy + C), \quad (2.16)$$

$$\int f(y) \cdot dy = \int k_n \cdot \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} \cdot dy + 2 \cdot \int \frac{dy}{a_0 + R(y)} \cdot dy. \quad (2.17)$$

В ці обидва вирази входить єдиний невідомий параметр – коефіцієнт пропорційності  $k_n$ . Існують декілька різних підходів щодо його визначення. В першому наближенні він може бути прийнятий із теорії В. Ренкіна, але більш точно має враховувати дискретні властивості матеріалу і буде визначений далі, при розгляді дискретних властивостей сипучого середовища.

## 2.2.2. Дискретна модель

Для розгляду дискретних властивостей, притаманних сипучому середовищу, було використано модель укладки зерен сипучого середовища рівномірними горизонтальними рядками.

Як буде показано в наступному розділі даної монографії, така укладка зерен повністю підтверджується експериментальними спостереженнями як самого автора роботи, так і інших авторів. Звісно, що ця модель передбачає однаковість розмірів зерен сипучого матеріалу, проте для врахування реальних неоднорідностей в його структурі може бути використаних спеціальних фізико-механічний параметр, запропонований проф. В. А. Богомягких – кут укладки зерен  $\beta$  (див. розділ 1). Він інтегрально враховує не тільки реально можливу неоднаковість розмірів зерен сипучого матеріалу, а й відхилення їх зовнішньої форми від сферичної.

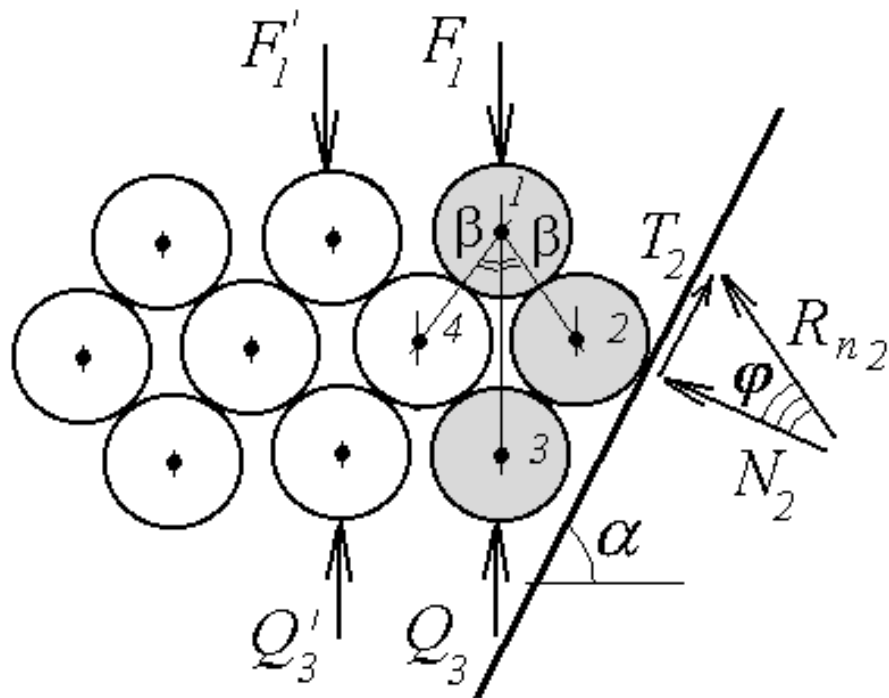
Розгляд моделі зручно починати з плоского випадку укладки зерен сипучого матеріалу. Елементарний дискретний елемент у замкненому сосуді зображено на рис. 2.3. Модель складається з трьох шарів сипучого матеріалу із зернами однакового діаметру, розташованих під кутом укладки  $\beta$  один по відношенню до одного.

Розглянутий дискретний елемент знаходиться у стані рівноваги під дією наступних сил: ваги вищележачої частини сипучої речовини, яка прикладена до кожного із зерен верхнього шару у вигляді зосереджених сил  $F_1, F_1'$  і т.д.; реакції нижчележачої частини сипучої речовини, яка прикладена до кожного із зерен нижнього шару у вигляді зосереджених сил  $Q_3, Q_3'$  і т.д.; реакції стінки ємності  $R_{n3}$ , яка може бути розкладена на нормальну складову  $N_2$  та дотичну складову  $T_3$ . Індекси вказують номери зерен, на які діють відповідні сили.

Оскільки зазначений дискретний елемент знаходиться у стані рівноваги, то для кожного з його зерен будуть виконуватись статичні умови рівноваги. Для отримання потрібного значення коефіцієнта бокового тиску необхідно і достатньо розглянути рівноваги тільки трьох зерен дискретного сипучого елемента, які на рис. 2.3 виділені більш темним кольором.

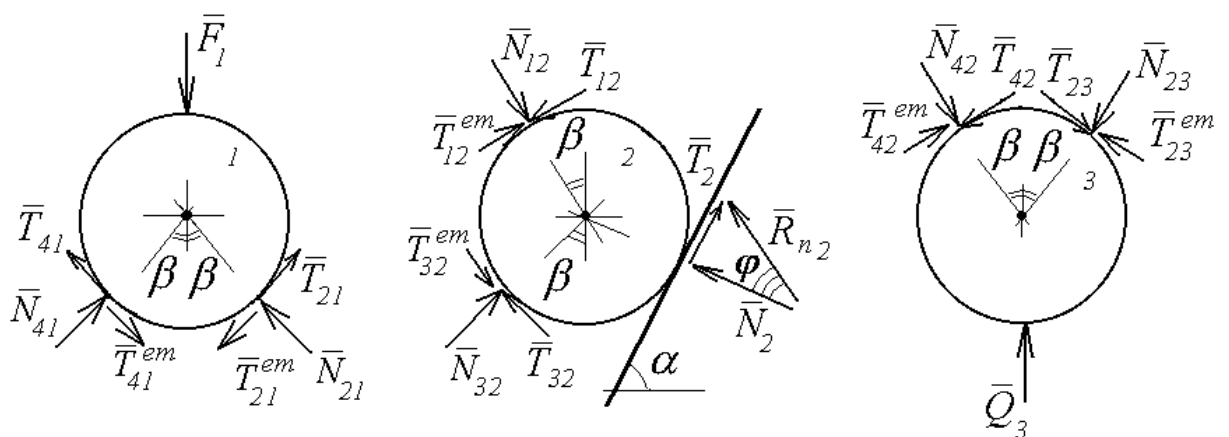
Передбачається, що сили зчеплення між зернами сипучої речовини повністю відсутні. Тоді взаємодія окремих зерен між собою може бути описана за допомогою нормальних реакції  $N_{ij}$  та сил тертя  $T_{ij}$ . Позначення індексів в окремих реакціях прийнята за наступ-

пним правилом: перший індекс вказує причину її виникнення (номер зерна, що діє), а другий індекс вказує місце дії (номер зерна, на який спрямована дія).



**Рис. 2.3. Дискретна плоска модель сипучої речовини**

Відповідно до рис. 2.3 схема реакцій, які виникають між зернами 1, 2 та 3 зображена на рис. 2.4.



**Рис. 2.4. Реакції між зернами плоского дискретного елемента**

Слід зауважити, що при проведених автором експериментальних спостереженнях (див. розділ 3 монографії) було виявлено ціка-

вий ефект. Він полягає у миттєвій зміні структурованості сипучої речовини в момент початку її розвантаження із сосуду. Так, під час статичного стану окремі зерна сипучої речовини намагаються зайняти таке положення, щоб центр їх ваги був розташований якомога нижче. Цьому стану відповідають напрями реакцій, наведені на рис. 2.4. В момент початку розвантаження напрям сил тертя змінюється на протилежний за рахунок того, що стінки сосуду починають стискати масу сипучого, виштовхуючи окремі зерна доверху. Цьому стану відповідають напрями реакцій із позначенням індексом  $em$ , що було обрано автором дисертаційної роботи від скорочення англійського слова *emptying* – розвантаження, спорожнення.

Розмірковуючи далі, спроектуємо для кожного із зерен елементу сипучої речовини прикладені до них сили на горизонтальну вісь  $X$ , спрямовану праворуч, і вертикальну вісь  $Y$ , спрямовану доверху. Отримаємо систему рівнянь рівноваги (2.21) – (2.26). В цих рівняннях зміну напрямку сил тертя враховано зміною знаку відповідної проекції.

$$\Sigma X_1 = N_{41} \cdot \sin \beta - N_{21} \cdot \sin \beta - (+)T_{41} \cdot \cos \beta + (-)T_{21} \cdot \sin \beta = 0, \quad (2.21)$$

$$\Sigma Y_1 = -F_1 + N_{41} \cdot \cos \beta + N_{21} \cdot \cos \beta + (-)T_{41} \cdot \sin \beta + (-)T_{21} \cdot \sin \beta = 0, \quad (2.22)$$

$$\Sigma X_2 = (N_{12} + N_{32}) \cdot \sin \beta - (+)(T_{12} + T_{32}) \cdot \cos \beta - N_2 \cdot \sin \alpha + T_2 \cdot \cos \alpha = 0, \quad (2.23)$$

$$\Sigma Y_2 = (-N_{12} + N_{32}) \cdot \cos \beta - (+)(T_{12} - T_{32}) \cdot \sin \beta + N_2 \cdot \cos \alpha + T_2 \cdot \sin \alpha = 0, \quad (2.24)$$

$$\Sigma X_3 = N_{42} \cdot \sin \beta - N_{23} \cdot \sin \beta - (+)T_{42} \cdot \cos \beta + (-)T_{23} \cdot \cos \beta = 0, \quad (2.25)$$

$$\Sigma Y_3 = Q_3 - N_{42} \cdot \cos \beta - N_{23} \cdot \cos \beta - (+)T_{42} \cdot \sin \beta - (+)T_{23} \cdot \sin \beta = 0. \quad (2.26)$$

Для подальших перетворень будемо вважати, що сили тертя між окремими зернами сипучої речовини можуть бути записані у вигляді (2.27), а між стінкою сосуду та зернами сипучого матеріалу – у вигляді (2.28):

$$T_{ij} = N_{ij} \cdot \operatorname{tg} \psi, \quad (2.27)$$

$$T_2 = N_2 \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.28)$$

З рівнянь (2.21) та (2.25) тепер можна отримати рівність нормальних реакцій  $N_{41} = N_{21}$  і  $N_{42} = N_{23}$ . Таким чином, рівняння (2.22) –

(2.24) й (2.26) можуть бути переписані у вигляді рівнянь (2.29) – (2.32), відповідно:

$$\Sigma Y_1 = F_1 - 2 \cdot N_{21} \cdot \cos \beta - (+) 2 \cdot T_{21} \cdot \sin \beta = 0, \quad (2.29)$$

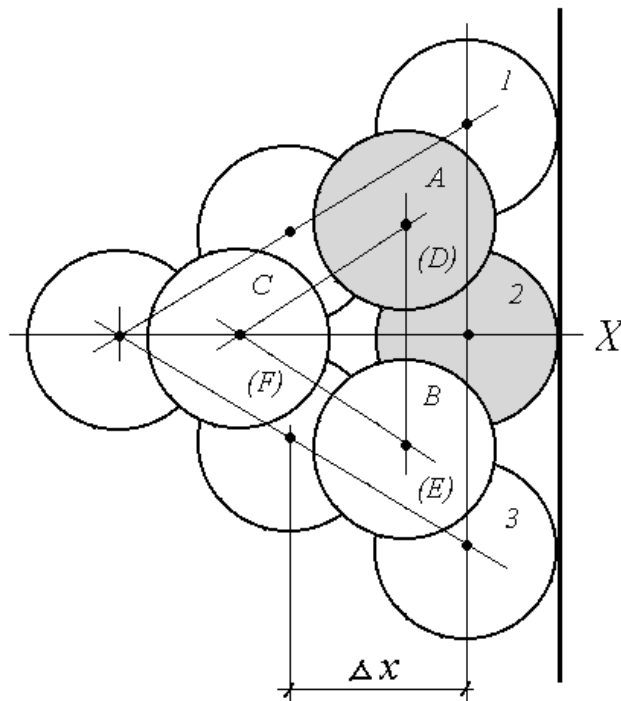
$$\Sigma X_2 = (N_{12} + N_{32}) \cdot \sin \beta - (+) (T_{12} + T_{32}) \cdot \cos \beta - N_2 \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) = 0, \quad (2.30)$$

$$\Sigma Y_2 = (-N_{12} + N_{32}) \cdot \cos \beta - (+) (T_{12} - T_{32}) \cdot \sin \beta + N_2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) = 0, \quad (2.31)$$

$$\Sigma Y_3 = Q_3 - 2 \cdot N_{23} \cdot \cos \beta - (+) 2 \cdot T_{23} \cdot \sin \beta = 0. \quad (2.32)$$

Тепер розглянемо просторову модель елементарного дискретного елемента сипучої речовини (рис. 2.5 – вигляд зверху). Вона, як і у випадку плоского елемента, складається із трьох шарів.

Аналогічно випадку плоского елемента розглянемо його рівновагу. Запишемо рівняння рівноваги для зерна верхнього шару  $A$ , зерна середнього шару  $2$  і зерна нижнього шару  $1$ , розташованого точно під зерном  $A$ . Вони будуть мати вигляд рівнянь (2.29) – (2.32), але відрізнятись коефіцієнтами, оскільки у випадку просторової моделі відповідні зерна сипучого матеріалу будуть взаємодіяти з більшою кількістю сусідніх зерен.



**Рис. 2.5.** Дискретна просторова модель сипучої речовини  
В результаті отримаємо рівняння (2.33) – (2.36):

$$\Sigma Y_A = F_A - 3 \cdot N_{2A} \cdot \cos \beta - (+) 3 \cdot T_{2A} \cdot \sin \beta = 0, \quad (2.33)$$

$$\Sigma X_2 = 2 \cdot (N_{A2} + N_{I2}) \cdot \sin \beta \cdot \cos 60^\circ - (+) 2 \cdot (T_{12} + T_{32}) \cdot \cos \beta \cdot \cos 60^\circ - N_2 \cdot (\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) = 0, \quad (2.34)$$

$$\Sigma Y_2 = 2 \cdot (-N_{A2} + N_{I2}) \cdot \cos \beta - (+) (T_{A2} - T_{I2}) \cdot \sin \beta + N_2 \cdot (\cos \alpha + \sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \varphi) = 0, \quad (2.35)$$

$$\Sigma Y_I = Q_I - 3 \cdot N_{2A} \cdot \cos \beta - (+) 3 \cdot T_{2A} \cdot \sin \beta = 0. \quad (2.36)$$

Для подальших перетворень будемо використовувати наступні положення:

- третій закон Ньютона, з якого випиває рівність нормальних реакцій  $N_{A2} = N_{2A}$ ,  $N_{D2} = N_{2D}$ ;
- гіпотеза о рівномірності розподілу вертикального тиску сипучої речовини по горизонтальному перерізу, з якої випливає рівність вертикальних реакцій, прикладених до всіх зерен верхнього та нижнього шарів, відповідно;
- гіпотеза о рівномірності передачі тиску на стінку сосуду в межах дискретного елемента, з якої випливає рівність нормальних реакцій, прикладених до всіх кінцевих елементів середнього шару.

Завважимо, що останні два положення насправді потребують більш точної експериментальної перевірки, але за відсутності такої та відсутності взагалі будь-яких відомостей щодо реальної картини розподілу тиску сипучої речовини по горизонтальному перерізу, прийнемо їх як найбільш прості.

Після ряду алгебраїчних перетворень з урахуванням наведених положень чотири рівняння (2.33) – (2.36) можуть бути зведені до одного рівняння (2.37):

$$N_2 \cdot \left( \frac{\sin(\alpha - \varphi)}{\cos \varphi} + \frac{\cos(\alpha - \varphi)}{2 \cdot \cos \varphi} \cdot \operatorname{tg}(\beta - (+)\psi) \right) = \frac{2}{3} \cdot \operatorname{tg}(\beta - (+)\psi) \cdot F_A. \quad (2.37)$$

Враховуючи товщину елементарного дискретного елемента, що дорівнює  $2 \cdot d \cdot \cos \beta$  ( $d$  – діаметр зерна сипучої речовини), а також розрахувавши кількість зерен середнього та верхнього шарів, можна отримати остаточний вираз, який буде зв'язувати вертикальний тиск  $P_s$  із нормальним тиском на стінку сосуду  $P_n$  у вигляді (2.38):

$$P_n = \frac{\operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - (+)\psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta - (+)\psi))} \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)} \cdot P_s. \quad (2.38)$$

Порівнюючи цей вираз із виразом (2.20) можна заключити, що коефіцієнт нормального тиску на стінку ємності визначиться виразом (2.39) для випадку стану статичного спокою сипучої речовини і виразом (2.40) для випадку початку її вивантаження із сосу-ду:

$$k_n = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta - \psi))} \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (2.39)$$

$$k_n^{em} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi)}{(a_0 + R) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta + \psi))} \cdot \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}. \quad (2.40)$$

Як видно, з отриманих виразів коефіцієнт нормального тиску залежить не тільки від параметрів сипучої речовини, а ще й від параметрів сосу-ду, в якому вона знаходиться. Причому, враховується розмір випускного отвору сосу-ду  $a_0$  і розмір поперечного перерізу сосу-ду  $R$ . Таким чином, значення коефіцієнту змінюється в залежності від глибини розташування відповідного шару сипучої речовини та параметрів сосу-ду, що принципово відрізняє отримане рішення від інших.

### 2.2.3. Коефіцієнт бокового тиску

Коефіцієнт бокового тиску сипучої речовини на стінки замкненого сосу-ду може бути легко отриманий із виразів для коефіцієнту нормального тиску як його частковий випадок. Так, прийнявши кут нахилу стінок сосу-ду  $\alpha$  рівним 0, та вважаючи, що  $a_0 = R$ , можна отримати вирази (2.41) та (2.42) для визначення коефіцієнту бокового тиску у стані спокою та початку розвантаження, відповідно:

$$k_{90} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi)}{a_0 \cdot (2 + \operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}(\beta - \psi))}, \quad (2.41)$$

$$k_{90}^{em} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi)}{a_0 \cdot (2 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi))}. \quad (2.42)$$

Кількісні значення отриманих коефіцієнтів наведені табл. 2.1 і 2.2, в яких представлені значення обох коефіцієнтів при різних параметрах сипучої речовини та сосуду.

З аналізу таблиць можна констатувати, що значення коефіцієнту нормального тиску суттєво залежать від параметрів сипучої речовини та сосуду і для найбільш розповсюджених їх сполучень може змінюватись у діапазоні приблизно 0 – 1,5.

Значення ж коефіцієнту для моменту початку розвантаження сосуду для всіх розглянутих випадків перевищує значення коефіцієнту для статичного стану сипучої речовини. Кількісно ця величина може сягати 10 та більше разів. Фізично це означає, що на практиці під час початку розвантаження сосудів тиск сипучої речовини на її стінки має збільшуватись.

Таким чином, явище підвищення тиску від сипучого матеріалу на стінки замкненої ємності, відмічене в розділі 1 даної монографії, може бути теоретично обґрунтовано - зміна структури сипучого матеріалу в момент початку його руху при вивантаженні з ємнісної конструкції і є тою причиною появи підвищеного тиску в цей момент.

### 2.3. Основні часткові рішення

Розглянемо приклади практичного застосування отриманого загального рішення для найбільш розповсюджених в проектній практиці випадків ємнісних будівельних конструкцій. Почнемо з більш простих випадків одноступінчастих ємностей із різним кутом нахилу бокових стінок до горизонту, а потім перейдемо до більш складних двоступінчастих споруд, в яких як нижня частина (перша ступінь), так і верхня частина (друга ступінь) мають різний кут нахилу бокових стінок до горизонту.

Таблиця 2.1

## Значення коефіцієнту бокового тиску

$R = 1 \text{ м}, \varphi = 17^\circ (f \approx 0,3)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	$k_{90} = 0,365$	$k_{90}^{em} = 0,984$
	$\psi = 25^\circ$	0,216	1,355
	$\psi = 35^\circ$	0,072	1,994
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,754	1,925
	$\psi = 25^\circ$	0,519	2,832
	$\psi = 35^\circ$	0,307	4,958
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	1,502	4,116
	$\psi = 25^\circ$	1,096	7,206
	$\psi = 35^\circ$	0,754	26,493
$R = 3 \text{ м}, \varphi = 17^\circ (f \approx 0,3)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,122	0,328
	$\psi = 25^\circ$	0,072	0,452
	$\psi = 35^\circ$	0,024	0,665
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,251	0,642
	$\psi = 25^\circ$	0,173	0,944
	$\psi = 35^\circ$	0,102	1,653
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,501	1,372
	$\psi = 25^\circ$	0,365	2,402
	$\psi = 35^\circ$	0,251	8,831
$R = 6 \text{ м}, \varphi = 17^\circ (f \approx 0,3)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,061	0,164
	$\psi = 25^\circ$	0,036	0,226
	$\psi = 35^\circ$	0,012	0,332
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,126	0,321
	$\psi = 25^\circ$	0,086	0,472
	$\psi = 35^\circ$	0,051	0,826
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,250	0,686
	$\psi = 25^\circ$	0,183	1,201
	$\psi = 35^\circ$	0,126	4,416

Таблиця 2.2

## Значення коефіцієнту бокового тиску

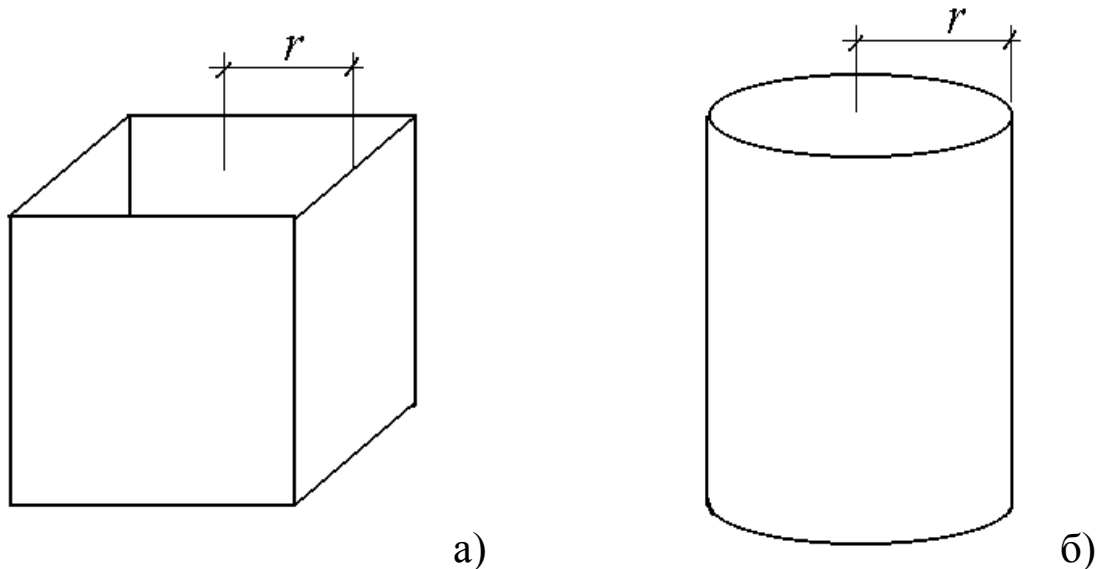
$R = 1 \text{ м}, \varphi = 27^\circ (f \approx 0,5)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	$k_{90} = 0,350$	$k_{90}^{em} = 0,879$
	$\psi = 25^\circ$	0,210	1,164
	$\psi = 35^\circ$	0,072	1,605
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,708	1,653
	$\psi = 25^\circ$	0,497	2,280
	$\psi = 35^\circ$	0,299	3,482
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	1,380	3,314
	$\psi = 25^\circ$	1,029	5,061
	$\psi = 35^\circ$	0,722	10,355
$R = 3 \text{ м}, \varphi = 27^\circ (f \approx 0,5)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,117	0,293
	$\psi = 25^\circ$	0,070	0,388
	$\psi = 35^\circ$	0,024	0,535
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,236	0,551
	$\psi = 25^\circ$	0,166	0,760
	$\psi = 35^\circ$	0,100	1,161
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,460	1,105
	$\psi = 25^\circ$	0,343	1,687
	$\psi = 35^\circ$	0,241	3,452
$R = 6 \text{ м}, \varphi = 27^\circ (f \approx 0,5)$			
$\beta = 40^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,058	0,146
	$\psi = 25^\circ$	0,035	0,194
	$\psi = 35^\circ$	0,012	0,268
$\beta = 50^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,118	0,275
	$\psi = 25^\circ$	0,083	0,380
	$\psi = 35^\circ$	0,050	0,580
$\beta = 60^\circ$	$\psi = 15^\circ$	0,230	0,552
	$\psi = 25^\circ$	0,172	0,843
	$\psi = 35^\circ$	0,120	1,726

### 2.3.1. Одноступінчаста конструкція

#### 2.3.1.1. Конструкція з вертикальними стінками

Таку ємність можна умовно вважати ємністю силосного типу. Вона має зовнішній вигляд, зображений на рис. 2.6 і сформована вертикально розташованими боковими стінками. Завдяки використанню під час виведення записаних вище виразів припущенню стосовно рівномірності розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу по горизонтальному перерізу ємності отримані рішення мають однакову форму незалежно від форми споруди в плані.

Основні геометричні параметри ємностей такого типу можуть бути представлені наступним чином:  $\alpha = 0$ ,  $R(y) = 0$ ,  $r = a_0$ .



**Рис. 2.6. Одноступінчаста ємність силосного типу**

а) квадратна в плані, б) кругла в плані

Тоді коефіцієнт нормального тиску (вирази (2.41) і (2.42)) після відповідних перетворень та запису із подвійним знаком може бути представлений у вигляді виразу (2.43) та, фактично, за своїм фізичним змістом перетвориться на коефіцієнт бокового тиску сипучого матеріалу:

$$k_n = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{a_0 \cdot (2 + \operatorname{tg} \varphi \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))}. \quad (2.43)$$

Диференційне рівняння рівноваги при цьому набуде вигляду (2.44):

$$\frac{dP_{\epsilon}}{dy} + P_{\epsilon} \cdot k_n \cdot \operatorname{tg} \varphi - \gamma \cdot g = 0. \quad (2.44)$$

Вводячи кінцевий коефіцієнт  $k = k_n \cdot \operatorname{tg} \varphi$  загальний вираз для отримання рішення буде мати вигляд (2.45):

$$P_{\epsilon}(y) = e^{-ky} \cdot (C + \gamma \cdot g \cdot \int e^{ky} dy). \quad (2.45)$$

Після проведення інтегрування може бути знайдено параметр  $C$  за допомогою початкових умов  $y = 0$ ,  $P_{\epsilon} = 0$ . Вони фізично означають відсутність тиску сипучого матеріалу на його верхній поверхні (вісь  $OY$  спрямовано донизу). Тоді остаточно рішення може бути записано у вигляді (2.46):

$$P_{\epsilon}(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k} \cdot (1 - e^{-k \cdot y}). \quad (2.46)$$

Його графічна ілюстрація на прикладі зерна проса із фізико-механічними характеристиками  $\gamma = 743 \text{ кг/м}^3$ ,  $\psi = 14^\circ$ ,  $\beta = 49,75^\circ$ ,  $\varphi = 13,17^\circ$ ,  $a_0 = 3,5 \text{ м}$  за роботою [81], наведена на рис. 2.7. На цих графіках по горизонтальній вісі відкладено значення тиску сипучого матеріалу в кПа, а по вертикальній вісі – глибина, починаючи з верхнього обрізу ємності, у метрах.

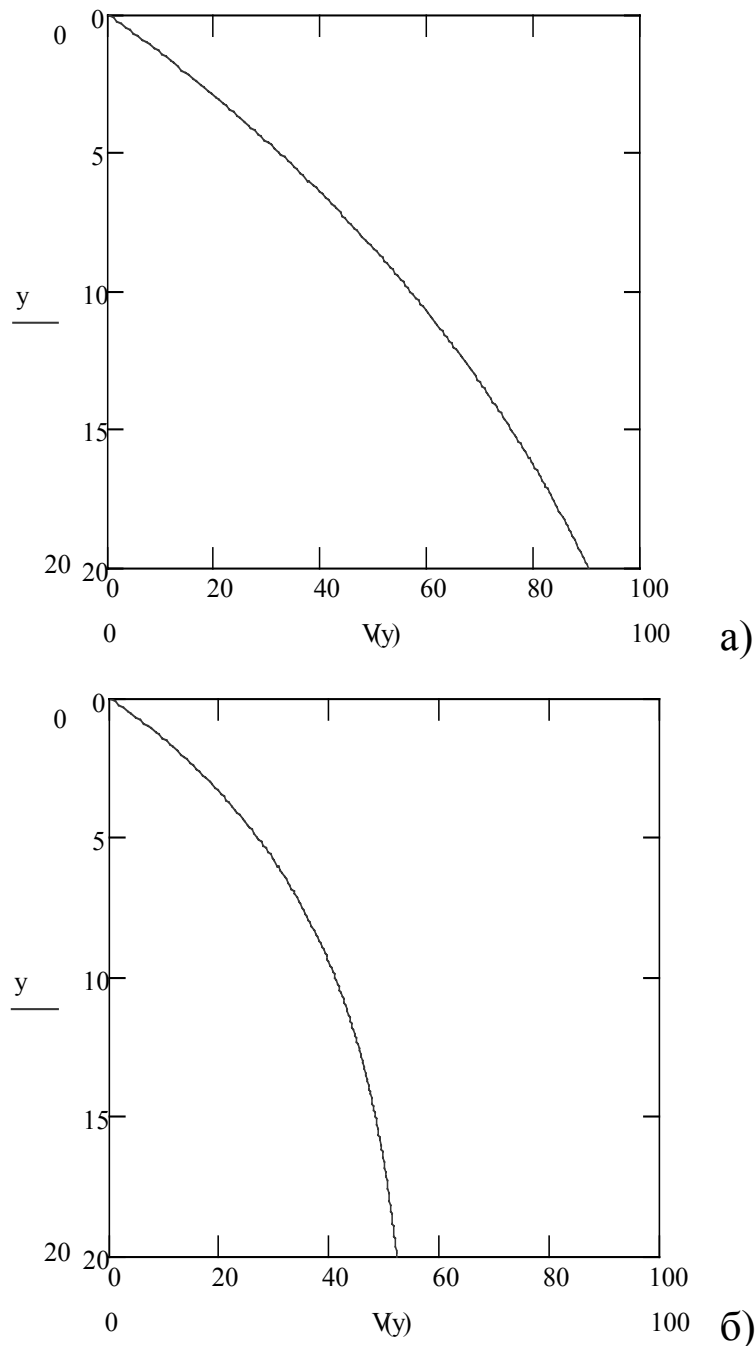
З точки зору проектування ємнісних конструкцій більш важливим є визначення нормального до поверхні стінок тиску сипучого матеріалу. В даному випадку він може бути розрахований за виразом (2.47):

$$P_n(y) = k_n \cdot P_{\epsilon}(y). \quad (2.47)$$

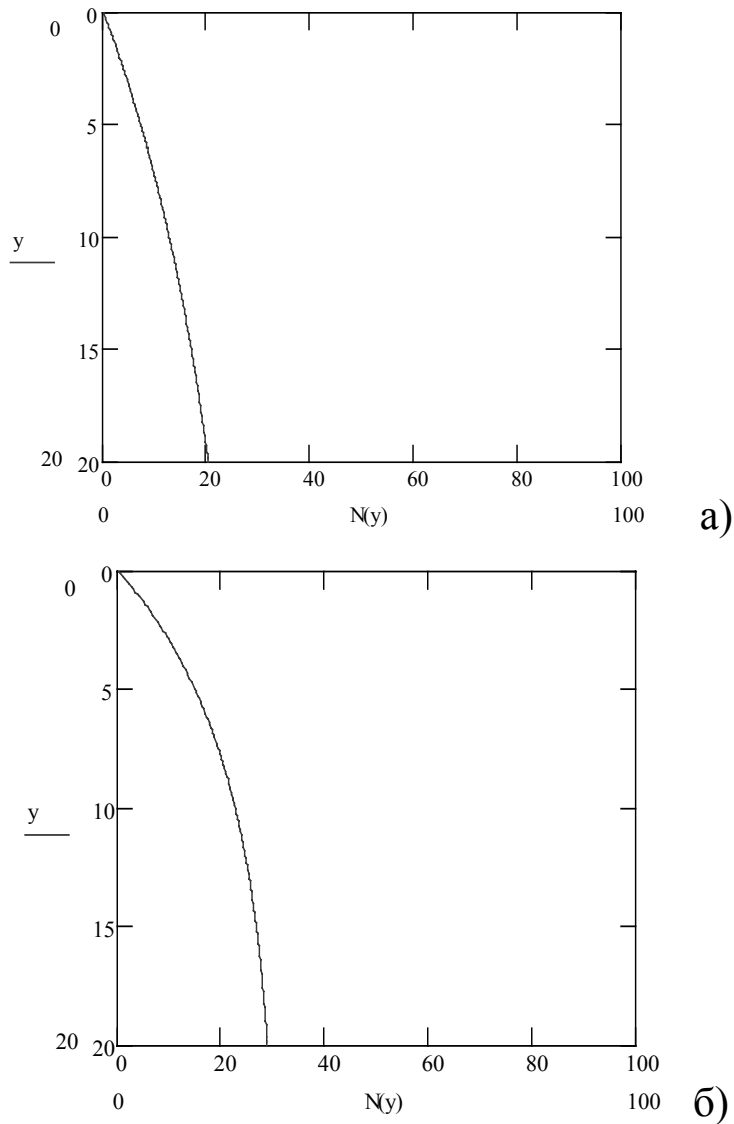
Графічне представлення розподілу нормального тиску сипучого матеріалу для силосних ємностей для зазначеного вище зерна проса наведено на рис. 2.8.

За даними чинного нормативного документу [17] без урахування поправочного коефіцієнту для даного випадку відповідні графіки вертикального та нормального тисків сипучого матеріалу (зерно проса) будуть мати вигляд, зображений на рис. 2.9.

Графіки побудовані в одному з сучасних спеціалізованих математичних пакетів прикладних програм.



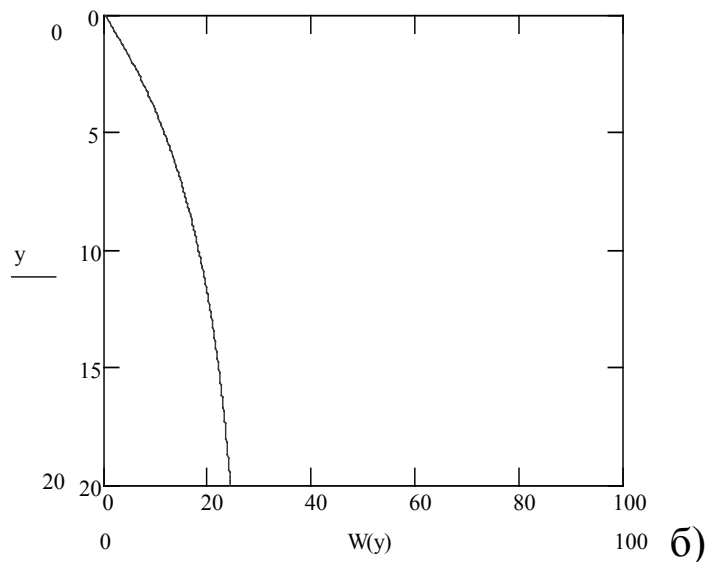
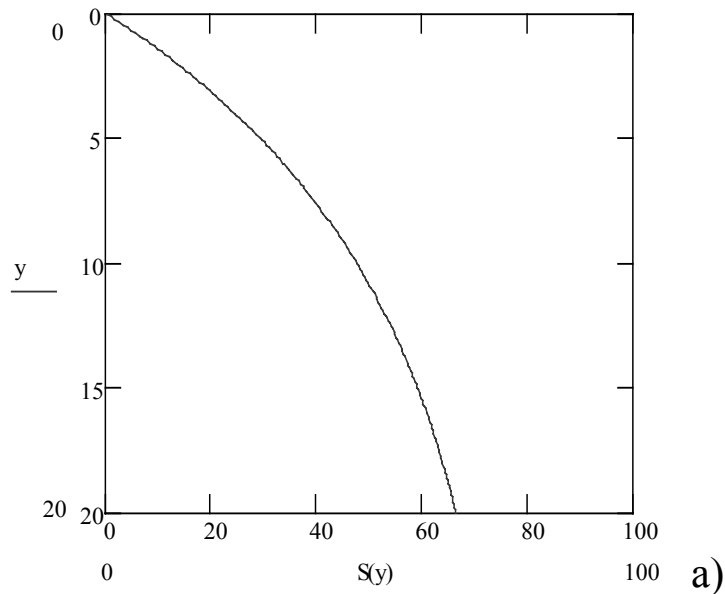
**Рис. 2.7. Вертикальний тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності силосного типу:**  
а) в стані статичного спокою, б) в стані початку розвантаження



**Рис. 2.8. Нормальний тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності силосного типу:**

а) в стані статичного спокою, б) в стані початку розвантаження

З наведених графіків видно, що вертикальний тиск сипучого матеріалу в стані спокою виявляється вищим, ніж передбачено нормами, але в момент початку розвантаження він знижується. Проте нормальний тиск, який фактично і є вирішальним з точки зору міцності конструкції, в цей момент підвищується приблизно в 1,5 рази. Це збігається із рекомендацією нормативного документу використовувати підвищуючий поправочний коефіцієнт, отриманий за результатами експериментальних досліджень, що дорівнює 1,5.



**Рис. 2.9. Тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності силосного типу за даними чинного нормативного документу [17]:**  
 а) вертикальний тиск, б) нормальний тиск

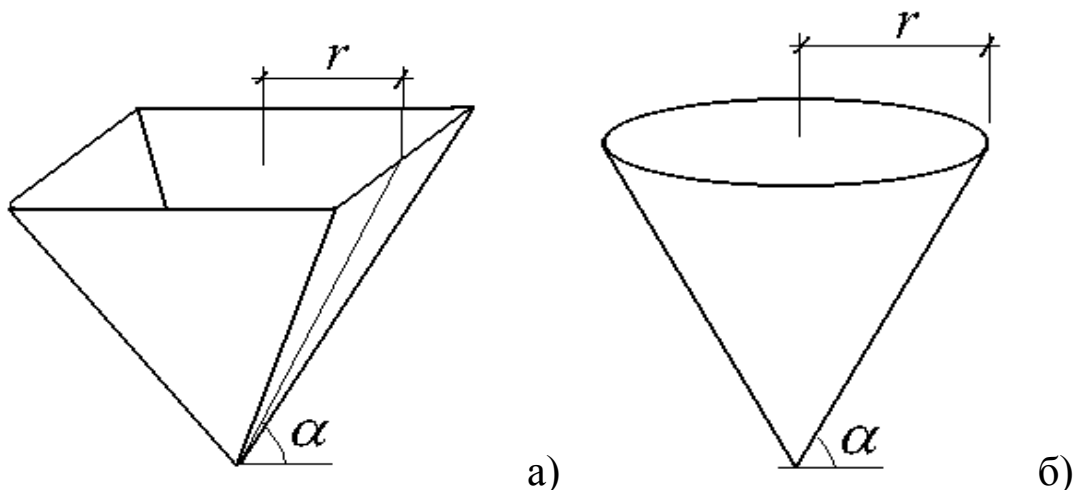
В цілому в обох випадках графіки зміну тиску сипучого матеріалу на стінки ємнісної конструкції мають вигляд кривої, яка нагадує отриману за теорією Г. А. Янсена. І це не дивно, якщо згадати, що фактично запропонована модель є більш загальним випадком цієї теорії.

### **2.3.1.2. Конструкція з похилим стінками**

Таку ємність можна умовно вважати ємністю бункерного типу. Вона має зовнішній вигляд, зображений на рис. 2.10 і сформована розташованими під кутом  $\alpha$  до горизонту боковими стінками.

Завдяки використаному під час виведення записаних вище виразів припущенню стосовно рівномірності розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу по горизонтальному перерізу ємності отримані рішення мають однакову форму незалежно від форми споруди в плані.

Ємність бункерного типу в термінах запропонованої моделі тиску сипучого матеріалу може бути описана за допомогою наступних параметрів:  $\alpha \neq 0$ ,  $R(y) = r - y/\text{tg } \alpha$ .



**Рис. 2.10. Одноступінчаста ємність бункерного типу:**  
а) квадратна в плані, б) кругла в плані.

Тоді загальний вигляд коефіцієнту нормального тиску після відповідних математичних перетворень буде мати вид (2.48), додатковий кінцевий коефіцієнт вид (2.49), а загальний вираз для отримання рішення вид (2.50):

$$k_n = \frac{2 \cdot \text{tg} \beta \cdot \text{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\text{tg} \alpha}\right) \cdot (2 \cdot \text{tg}(\alpha - \varphi) + \text{tg}(\beta \mp \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (2.48)$$

$$k_0 = \frac{2 \cdot \text{tg} \beta \cdot \text{tg}(\beta \mp \psi)}{2 \cdot \text{tg}(\alpha - \varphi) + \text{tg}(\beta \mp \psi)}, \quad (2.49)$$

$$P_e(y) = \gamma \cdot g \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right) \cdot \frac{1}{k_0 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} + C \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right)^{k_0 - 2}. \quad (2.50)$$

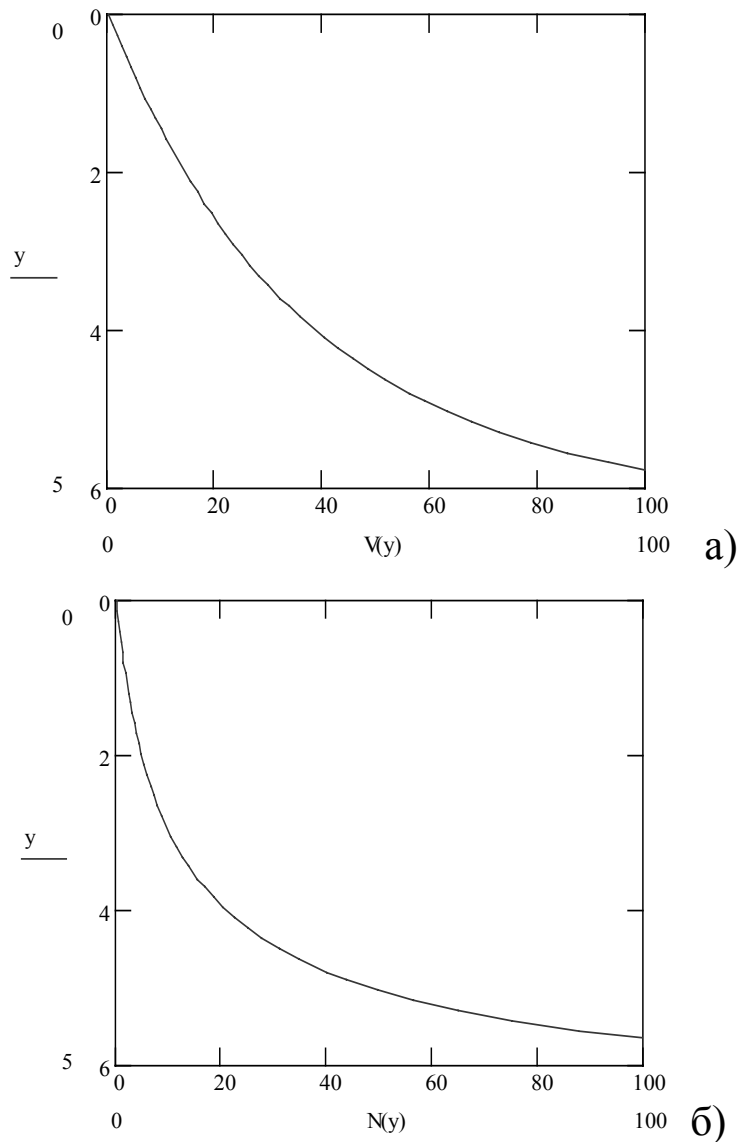
Далі, отримане із початкових умов значення коефіцієнту інтегрування буде мати вигляд (2.51), а загальне рішення диференційного рівняння, що описує розподіл тиску сипучого матеріалу з глибиною, вигляд (2.52), який виявляється більш складним, ніж у попередньому випадку:

$$C = -\frac{\gamma \cdot g}{3} \cdot r^{3-k}, \quad (2.51)$$

$$k - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}$$

$$P_e(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k_0 - \frac{3}{\operatorname{tg}\alpha}} \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha} \right) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{r \cdot \operatorname{tg}\alpha} \right)^{k_0 \cdot \operatorname{tg}\alpha - 3} \right). \quad (2.52)$$

Щодо графічного представлення отриманого рішення, то його аналіз вказує на необхідність розрізнити три окремі випадки в залежності від співвідношення параметрів  $k_0$  і  $2/\operatorname{tg}\alpha$ . В першому випадку при  $k_0 < 2/\operatorname{tg}\alpha$  графіки як вертикального, так і нормального тиску мають вигін праворуч. В другому випадку при  $k_0 \approx 2/\operatorname{tg}\alpha$  графіки наближаються до похилих прямих ліній. В третьому випадку при  $k_0 > 2/\operatorname{tg}\alpha$  графіки мають вигін ліворуч. На рис. 2.11 – 2.13 наведені ці випадки для різної комбінації параметрів. Таким чином, на практиці конкретний вигляд графіків буде залежати як від фізико-механічних характеристик сипучого матеріалу, так і від геометричних параметрів конструкції ємності.



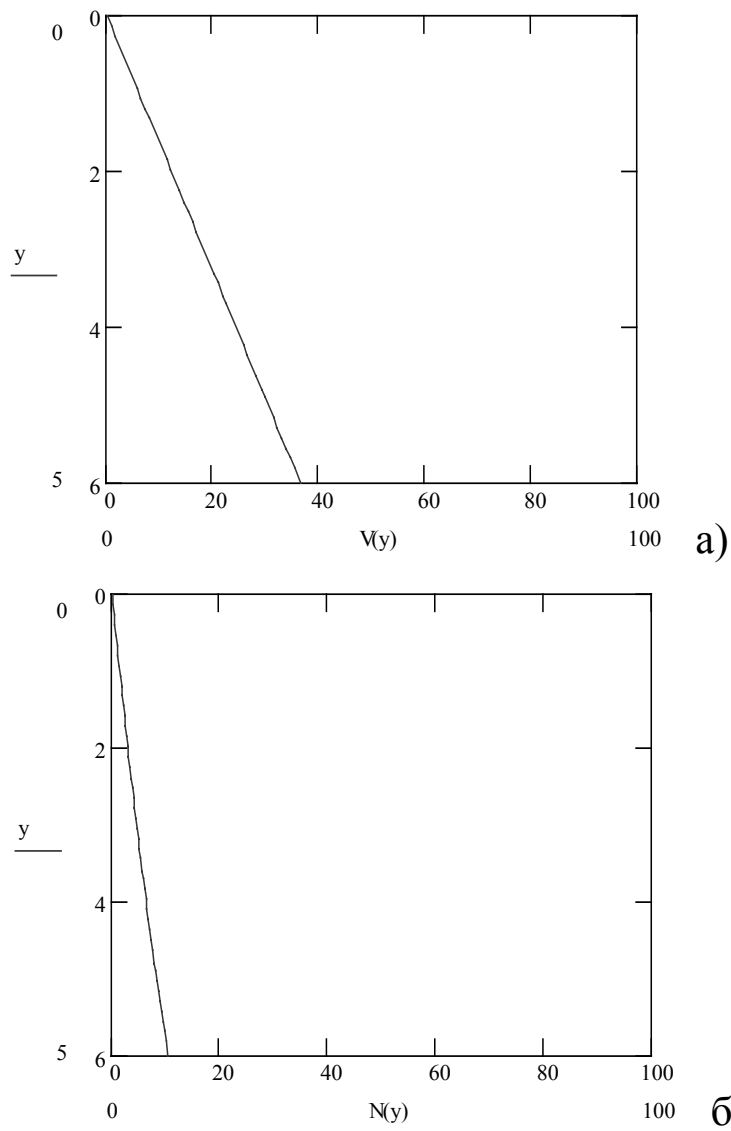
**Рис. 2.11. Тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності бункерного типу для випадку 1:**  
 а) вертикальний тиск, б) нормальний тиск

Графіки, як і у випадку ємності силосного типу, розташовані в осях тиск-глибина. Значення тиску приведені в кПа, глибина – у метрах. Для їх побудови використовувався один з сучасних спеціалізованих математичних пакетів прикладних програм.

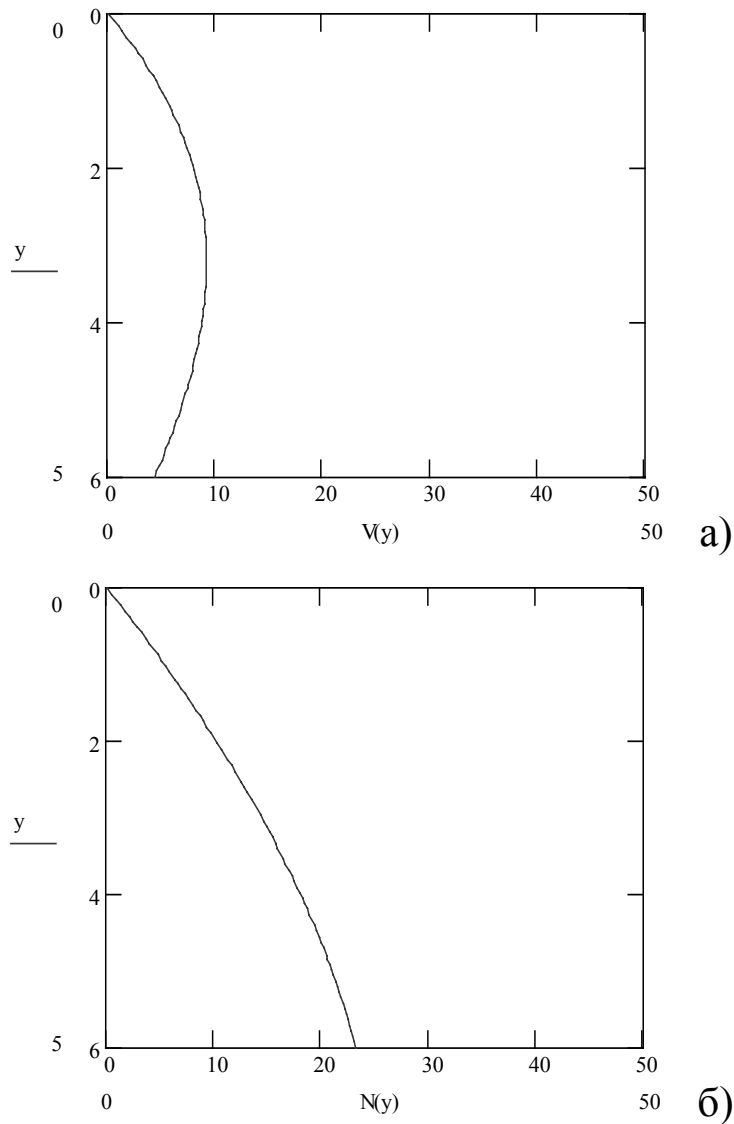
Слід відмітити, також, що діючий нормативний підхід передбачає лише один можливий розподіл тиску сипучого матеріалу для ємності бункерного типу – за гідростатичним законом, вважаючи цей випадок за математичною термінологією “граничним наближенням зверху” (див. розділ 1 даної монографії). З точки зору запасів, які при цьому закладаються в будівельну конструкцію це зда-

ється повністю виправданим. Між тим, як впливає із проведених досліджень отримані значення тиску можуть виявлятися не тільки меншими, ніж передбачено нормами, а й більшими за величиною, що є, звісно, дуже небезпечним з точки зору роботи конструкції.

Таким чином, сучасна методика визначення тиску від сипучих матеріалів, яка закладена в офіційні чинні нормативні документи, може давати некоректну картину, яка в свою чергу може результуватись у аварійні відмови споруди під час її експлуатації.



**Рис. 2.12. Тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності бункерного типу для випадку 2:**  
а) вертикальний тиск, б) нормальний тиск



**Рис. 2.13. Тиск сипучого матеріалу в одноступінчастій ємності бункерного типу для випадку 3:**  
 а) вертикальний тиск, б) нормальний тиск

Перейдемо тепер до більш складного випадку – двоступінчастої ємнісної конструкції. Така конструкція складається із двох частин (ступіней) – верхньої та нижньої. Нижня частина завжди має похилі стінки, які утворюють кут  $0 < \alpha < 90^\circ$  до горизонталі. Верхня частина може мати як вертикальні стінки ( $\alpha = 90^\circ$ ), так і похилі, які в свою чергу утворюють різні кути до горизонталі: в одному випадку -  $0 < \alpha < 90^\circ$ , в іншому -  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$ . В кожному з цих випадків рішення виявляються різними.

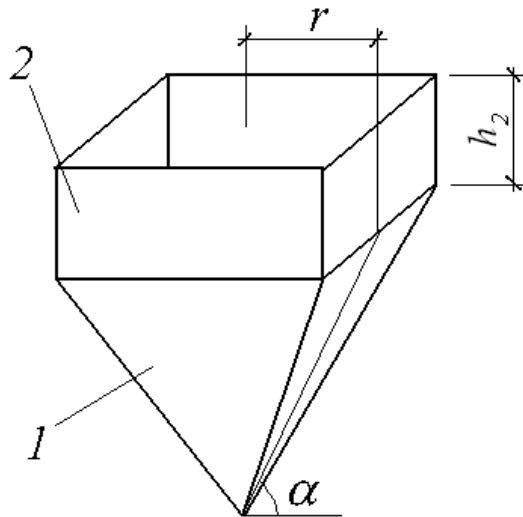
## 2.3.2. Двоступінчаста конструкція

### 2.3.2.1. Конструкція з вертикальною верхньою частиною

Розглянемо спочатку більш простий випадок вертикального розташування бокових стінок верхньої частини ємнісної конструкції.

Завдяки використаному під час виведення записаних вище виразів припущенню стосовно рівномірності розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу по горизонтальному перерізу ємності отримані рішення, як і в попередніх випадках, мають однакову форму незалежно від форми споруди в плані.

Розглянемо спрощену ємність, яка не має випускного отвору, тобто параметр  $a_0 = 0$ . Це несуттєво вплине на остаточний результат, але дозволить більш наочно продемонструвати загальні особливості, притаманні даному випадку. Схематично ємність зображено на рис. 2.14. Вона сформована двома різними за формою частинами: нижньою пірамідоподібною з кутом нахилу  $\alpha$  грані до горизонтальної поверхні і верхньою призматичною із вертикальними гранями висотою  $h_2$ .



**Рис. 2.14. Двоступінчаста ємність**

**з вертикальною верхньою частиною:**

1 – нижня похила частина, 2 – верхня вертикальна частина

Розташуємо систему координат таким чином, щоб її центр знаходився у площині верхньої уявної основи призматичної части-

ни, а вісь ОУ була спрямована вертикально вниз. Оскільки розглядається повністю симетрична конструкція, то розташування двох інших осей для нас не буде мати принципового значення, але для визначеності нехай вони будуть спрямовані вздовж двох довільних взаємно перпендикулярних граней верхньої частини.

В термінах запропонованої вище математичної моделі геометрична форма обох частин може бути записана за допомогою відповідних функцій форми. Для нижньої частини вона буде мати вигляд виразу (2.53), а для верхньої – (2.54):

$$R_1(y) = r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha}, \quad (2.53)$$

$$R_2(y) = 0. \quad (2.54)$$

Вирази для коефіцієнта нормального тиску для нижньої та верхньої частин ємності будуть мати вигляд (2.55) і (2.56), відповідно:

$$k_{n1} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha}\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}, \quad (2.55)$$

$$k_{n2} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{r \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha - \varphi)}. \quad (2.56)$$

В кожному з цих виразів для аргументу другого тангенсу введено подвійний знак. В чисельнику він відповідає знакові із виразу (2.39), тобто випадку статичного спокою сипучої середи, а в знаменнику – знакові виразу (2.40), тобто випадку початку вивантаження сипучої середи. Така форма запису може бути використана для підвищення компактності викладок.

Також з цією метою введемо ще два допоміжних коефіцієнта, які не мають самостійного фізичного змісту, але полегшать виконання тотожних перетворень. Коефіцієнти запишуться виразами (2.57) і (2.58):

$$k_1 = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}, \quad (2.57)$$

$$k_2 = k_{n2} \cdot \operatorname{tg} \varphi. \quad (2.58)$$

З урахуванням цього вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу на бокові стінки ємності для верхньої частини буде мати вигляд виразу (2.59):

$$P_{e2}(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k_2} \cdot (1 - e^{-k_2 \cdot y}). \quad (2.59)$$

При його виводі було використано граничну умову: при  $y = 0$ ,  $P_e = 0$ , а стала інтегрування мала вигляд виразу (2.60):

$$C = -\frac{\gamma \cdot g}{k}. \quad (2.60)$$

Для нижньої частини вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу буде мати більш складний вигляд та попередньо може бути записаний у формі (2.61):

$$P_{e1}(y) = \gamma \cdot g \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha} \right) \cdot \frac{1}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha}} + C \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^{k_1 - 2}. \quad (2.61)$$

До нього входить невідома інтегрування  $C$ . Однак, вона може бути легко знайдена, якщо використати той факт, що вертикальний тиск в нижній точці верхньої вертикальної частини і верхній точці нижньої похилої частини рівні між собою або, говорячи математичною мовою, функція розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу з глибиною є неперервною.

Ця умова може бути записана таким чином: при  $y = h_2$ ,  $P_{e1} = P_{e2}$ . Тоді стала інтегрування для нижньої частини ємності буде мати вигляд виразу (2.62):

$$C = \frac{\gamma \cdot g \cdot \frac{(1 - e^{-k_2 \cdot h_2})}{k_2} - \frac{\gamma \cdot g \cdot r}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha}}}{r^{k_1 - 2}}. \quad (2.62)$$

Остаточно вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу для нижньої частини ємності може бути записаний у вигляді (2.63). Вираз є дещо громіздким, але його використання при сучасному рівні розвитку комп'ютерної техніки та відповідних пакетів математичних програм не представляє серйозних утруднень.

Таким чином, вертикальний тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастої ємності може бути обчислено для верхньої частини за виразом (2.59), а для нижньої – (2.63):

$$P_{\text{el}}(y) = \gamma \cdot g \cdot \frac{r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha}}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha}} + \frac{\gamma \cdot g \cdot \frac{(1 - e^{-k_2 \cdot h_2})}{k_2} - \frac{\gamma \cdot g \cdot r}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha}}}{r^{k_1 - 2}} \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha} \right)^{k_1 - 2}. \quad (2.63)$$

Проте, в практиці проектування ємнісних споруд для вибору конструкції та розмірів перерізу бокових стінок потрібно знати не вертикальний, а нормальний до поверхні стінки тиск. Адже його розподіл виявляється дещо іншим за розподіл вертикального тиску.

Відповідно до розробленої авторської моделі нормальний тиск може бути знайдений множенням виразу для вертикального тиску на коефіцієнт нормального тиску. Для розглядуваного випадку такі вирази будуть мати вигляд для верхньої частини (2.64), а для нижньої – (2.65).

$$P_{n1}(y) = k_{n1} \cdot P_{\text{el}}(y), \quad (2.64)$$

$$P_{n2}(y) = k_{n2} \cdot P_{\text{el}}(y), \quad (2.65)$$

де  $P_{n1}$  і  $P_{n2}$  - нормальний тиск в верхній та нижній частинах ємнісної споруди, відповідно.

Графічне представлення наведених залежностей може бути легко отримано, як і в попередніх випадках, за допомогою одного з сучасних спеціалізованих математичних пакетів прикладних програм.

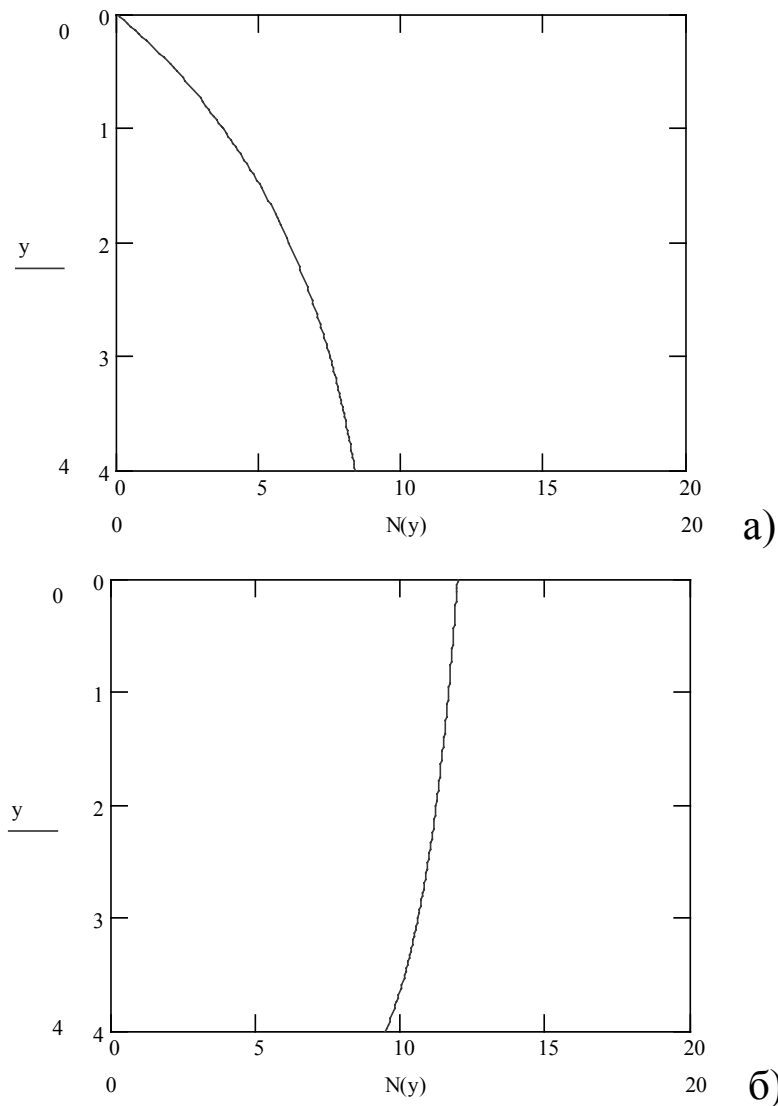
В якості прикладу розглянемо ємність із наступними геометричними параметрами:  $r = 3$  м,  $h_2 = 4$  м,  $\alpha = 60^\circ$ . Прийmemo, що вона заповнена деяким сипучим матеріалом із наступними фізико-механічними характеристиками:  $\gamma = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\beta = 65^\circ$ ,  $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 21^\circ$ . Такі параметри приблизно відповідають вугіллю, якщо стінки ємності сталеві [80, 81].

Якщо сипучий матеріал знаходиться у стані статичного спокою, тобто під час тимчасового або довготривалого зберігання, то графіки будуть мати вигляд, представлений на рис. 2.15. Для випадку початку розвантаження ємності графіки будуть мати вигляд, представлений на рис. 2.16. На кожному з графіків по горизонтальній вісі відкладено тиск в кПа, а по вертикальній вісі – глибину в м. Для верхньої та нижньої частин ємності прийнято свої нульові точки.

Аналізуючи наведені залежності слід вказати на ряд наступних важливих їх особливостей.

По-перше, для верхньої частини графік має нелінійний вигляд, який із глибиною ємності асимптотично прямує до сталої величини.

По друге, для нижньої частини ємності графік має вигляд, який дуже наближається до лінійного. Це означає, що в практичних розрахунках з невеликою погрішністю можна його вважати таким. При цьому в залежності від стану сипучої середи кут нахилу цієї прямої до горизонталі буде дещо іншим. З цього впливає ще одна цікава особливість – на практиці можливим виявляється підібрати певний кут нахилу стінок нижньої частини таким чином, щоб нормальний тиск на стінки виявився або якомога меншим, або максимально наближався до сталого. Це дасть змогу суттєво спростити виконання розрахунково-конструкторських робіт.

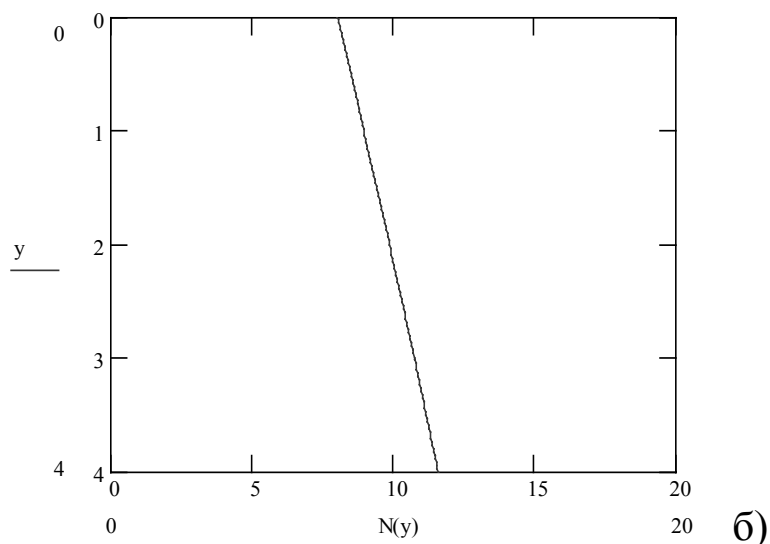
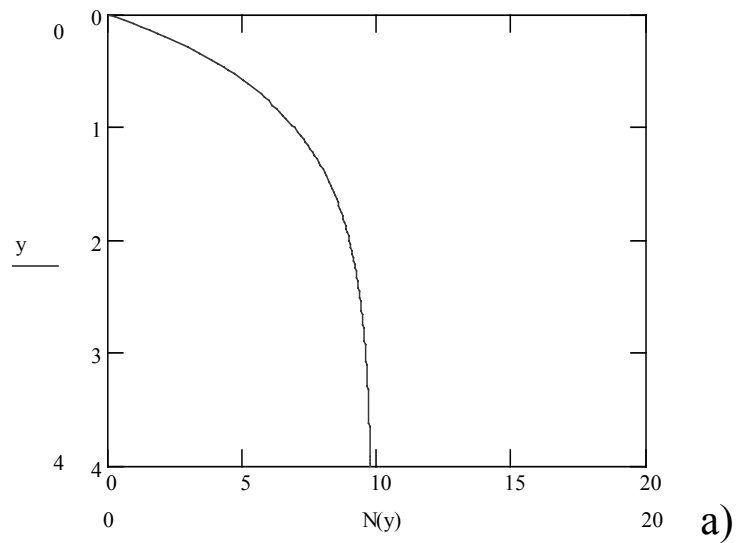


**Рис. 2.15. Нормальний тиск сипучого матеріалу в двоступінчастій ємності у випадку його статичного стану:**  
 а – верхня частина ємності, б – нижня частина ємності

По-третє, в місці з'єднання верхньої та нижньої частин ємності в обох наведених випадках спостерігається кількісний скачок нормального тиску. На практиці це означає, що ця зона є досить небезпечною, оскільки саме в ній можуть відбуватися певні ускладнення напружено-деформованого стану.

По-четверте, порівнюючи тиск в статичному стані та в момент початку вивантаження сипучого матеріалу з ємності можна констатувати, що в останньому випадку він виявляється вищим. Це означає, що саме цей режим є найбільш небезпечним з точки зору роботи ємнісної конструкції. Проте, як вже зазначалось в оглядовій

частині даної монографії (див. розділ 1) діюча методика проектування не приділяє цьому явищу ніякої уваги.



**Рис. 2.16. Нормальний тиск сипучого матеріалу в двоступінчастій ємності у випадку початку його вивантаження:**

а – верхня частина ємності, б – нижня частина ємності

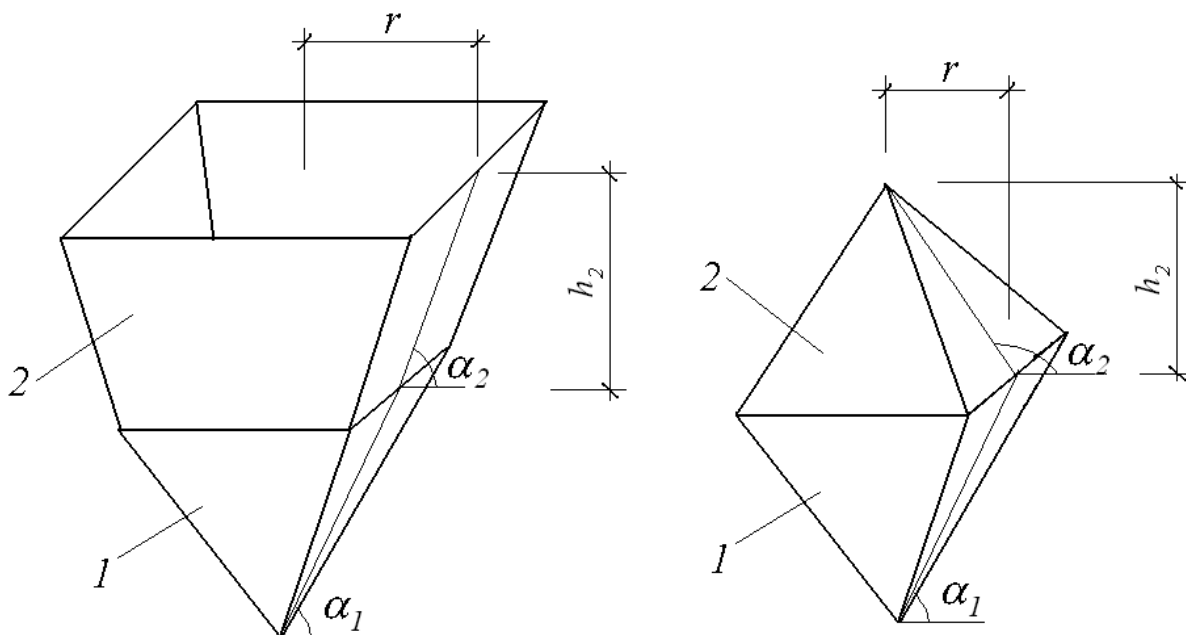
Завважмо, також, що наведені закономірності притаманні далеко не тільки розглянутому чисельному прикладу. Авторський досвід роботи свідчить, що вони справедливі для досить широкого кола геометричних параметрів ємностей та значної кількості типів сипучих матеріалів.

### 2.3.2.2. Конструкція з похилою верхньою частиною

Розглянемо тепер більш складний випадок похилого розташування бокових стінок верхньої частини ємнісної конструкції. При цьому випадки нахилу стінок верхньої частини у внутрішню частину споруди та зовнішню будуть мати однаковий вигляд, оскільки вся різниця буде полягати у значенні кута  $\alpha_2$ , який входить в ці вирази у загальному вигляді.

Завдяки використаному під час виведення загальних виразів для рівноваги елементарного шару сипучого матеріалу припущенню стосовно рівномірності розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу по горизонтальному перерізу ємності отримані рішення, як і в попередніх випадках, мають однакову форму незалежно від форми споруди в плані.

Розглянемо спрощену ємність, яка не має випускного отвору, тобто параметр  $a_0=0$ . Як і в попередніх випадках, це несуттєво вплине на остаточний результат. Схематично такі ємності зображено на рис. 2.17. Вони сформована двома різними за формою частинами: нижньою пірамідоподібною з кутом нахилу  $\alpha_1$  грані до горизонтальної поверхні і, також пірамідоподібно, з кутом нахилу  $\alpha_2$  грані до горизонтальної поверхні.



**Рис. 2.17. Двоступінчаста ємність:**

1 – нижня похила частина, 2 – верхня похила частина

Розташуємо систему координат таким чином, як і в попередньому випадку.

В термінах запропонованої вище математичної моделі геометрична форма обох частин може бути записана за допомогою відповідних функцій форми. Для нижньої та верхньої частин вона буде мати однаковий принциповий вигляд виразів (2.66) та (2.67), відповідно:

$$R_1(y) = r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha_1}, \quad (2.66)$$

$$R_2(y) = r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha_2}. \quad (2.67)$$

Вирази для коефіцієнта нормального тиску для нижньої та верхньої частин ємності, також, матимуть принципово однаковий вигляд (2.68) і (2.69), відповідно:

$$k_{n1} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha_1}\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha_1 - \varphi)}, \quad (2.68)$$

$$k_{n2} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg}\beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left(r - \frac{y}{\operatorname{tg}\alpha_2}\right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2 - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \frac{\cos\varphi}{\cos(\alpha_2 - \varphi)}. \quad (2.69)$$

Як і при попередньому викладенні, в кожному з цих виразів для аргументу другого тангенсу введено подвійний знак. В чисельнику він відповідає знакові із виразу (2.39), тобто випадку статичного спокою сипучої середи, а в знаменнику – знакові виразу (2.40), тобто випадку початку вивантаження сипучої середи. Така форма запису може бути використана для підвищення компактності викладок.

З урахуванням цього вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу на бокові стінки ємності для верхньої частини буде мати вигляд виразу (2.52) та з урахуванням введених позначень – (2.70):

$$P_{e2}(y) = \frac{\gamma \cdot g}{k_0 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha_2}} \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right) \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{r \cdot \operatorname{tg} \alpha_2} \right)^{k_{02} \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 - 3} \right). \quad (2.70)$$

Додатковий коефіцієнт  $k_{01}$  буде мати вигляд виразу (2.49) та з урахуванням введених позначень – (2.71):

$$k_{02} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2 - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}. \quad (2.71)$$

Коефіцієнт нормального тиску буде мати вид (2.48) та з урахуванням введених позначень – (2.72):

$$k_{n2} = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{\left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right) \cdot (2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_2 - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi))} \cdot \frac{\cos \varphi}{\cos(\alpha_2 - \varphi)}. \quad (2.72)$$

Для нижньої частини ємнісної конструкції вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу буде мати більш складний вигляд та попередньо може бути записаний у формі (2.73):

$$P_{e1}(y) = \gamma \cdot g \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \cdot \frac{1}{k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha_1}} + C \cdot \left( r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right)^{k_1 - 2}, \quad (2.73)$$

де коефіцієнт  $k_1$  буде мати вигляд виразу (2.57) та з урахуванням введених позначень – (2.74):

$$k_1 = \frac{2 \cdot \operatorname{tg} \beta \cdot \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}{2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_1 - \varphi) + \operatorname{tg}(\beta \mp \psi)}, \quad (2.74)$$

До виразу (2.73) входить невідома інтегрування  $C$ . Однак, вона може бути легко знайдена, якщо використати той факт, що вер-

тикальний тиск в нижній точці верхньої похилої частини і верхній точці нижньої похилої частини рівні між собою або, говорячи математичною мовою, функція розподілу вертикального тиску сипучого матеріалу з глибиною є неперервною.

Ця умова може бути записана таким чином: при  $y = h_2$ ,  $P_{e1} = P_{e2}$ . Тоді стала інтегрування для нижньої частини ємності буде мати вигляд виразу (2.75):

$$C = \gamma \cdot g \cdot r^{2-k_1} \cdot \left[ \frac{r - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_2}}{k_0 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha_2}} \cdot \left( 1 - \left( 1 - \frac{y}{\operatorname{tg} \alpha_2} \right)^{k_0 \cdot \operatorname{tg} \alpha_2 - 3} \right) - r \cdot \left( k_1 - \frac{3}{\operatorname{tg} \alpha_1} \right) \right]. \quad (2.75)$$

Остаточно вираз для вертикального тиску сипучого матеріалу для нижньої частини ємності може бути записаний у вигляді (2.76). Вираз є дещо громіздким, але його використання при сучасному рівні розвитку комп'ютерної техніки та відповідних пакетів математичних програм не представляє серйозних утруднень.

Таким чином, вертикальний тиск сипучого матеріалу на стінки двоступінчастої ємності із похилими стінками може бути обчислено для верхньої частини за виразом (2.70), а для нижньої – (2.73) з урахуванням коефіцієнту  $C$  за виразом (2.75).

Нормальний тиск на стінки нижньої  $P_{n1}$  та верхньої  $P_{n2}$  частин ємнісної конструкції може бути знайдений за виразами (2.64) і (2.65), де в якості коефіцієнтів нормального тиску слід приймати вирази (2.68) і (2.69), відповідно.

Графічне представлення наведених залежностей може бути легко отримано, як і в попередніх випадках, за допомогою одного з сучасних спеціалізованих математичних пакетів прикладних програм. У принциповому відношенні воно може мати один з виглядів, зображених на рис. 2.11 – 2.13, 2.15 і 2.16.

## 2.4. Оптимізація зовнішньої форми конструкції

Однією з ключових задач є відшукування оптимальної зовнішньої геометричної форми ємнісної будівельної конструкції з урахуванням її взаємодії із сипучим середовищем.

Для двоступінчастої ємнісної споруди з вертикальною верхньою частиною (найпоширеніший в практиці випадок) спробуємо отримати вираз для відшукування оптимальної форми нижньої частини з умови, щоб нормальний тиск залишався постійним. Для верхньої частини дана умова не може бути використана, оскільки тиск від сипучого матеріалу буде змінюватись, як показано у попередньому підрозділі від 0 до якоїсь певної величини на рівні стикування із нижньою частиною.

Для виводу необхідної залежності в вираз для загального рішення диференційного рівняння рівноваги елементарного шару сипучої середи (2.16) підставимо замість вертикального тиску в лівій частині нормальний тиск з виразу (2.47). Отримаємо вираз (2.76):

$$P_n(y) = k_n \cdot e^{-\int f(y) \cdot dy} \cdot (\gamma \cdot g \cdot \int e^{\int f(y) \cdot dy} \cdot dy + C). \quad (2.76)$$

При цьому коефіцієнт нормального тиску  $k_n$  буде визначатись виразом (2.39), який відповідає стану статичного спокою сипучої середи.

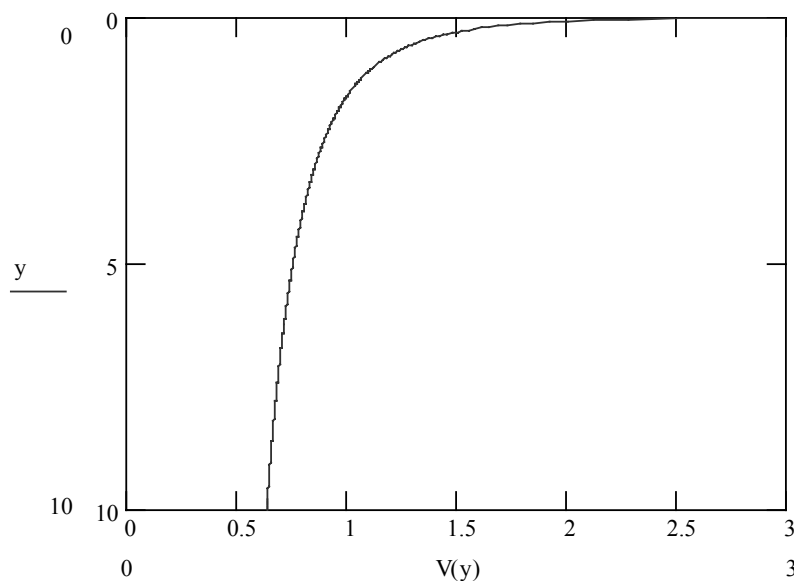
Сформульована умова постійності значення нормального тиску по всій висоті ємнісної споруди може бути математично записана, як рівність першої похідної нулю (2.77):

$$\frac{dP_n(y)}{dy} = 0. \quad (2.77)$$

Опускаючи проміжні математичні перетворення, отримаємо остаточно вираз для відшукування оптимальної форми нижньої випуклої частини двоступінчастої ємнісної будівельної конструкції у вигляді функції форми бокової поверхні  $R(y)$  (2.78):

$$R(y) = \frac{r}{\sqrt[4]{1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{r \cdot \operatorname{tg}(\beta + \psi)} \cdot y}} \quad (2.78)$$

Графічно ця залежність для випадку наступних параметрів ємності і фізико-механічних властивостей сипучого матеріалу –  $r = 3$  м,  $\gamma = 1000$  кг/м<sup>3</sup>,  $\beta = 65^\circ$ ,  $\psi = 20^\circ$ ,  $\varphi = 21^\circ$  - буде мати вигляд, представлений на рис. 2.18. По вертикалі відкладено висоту ємності, по горизонталі – її поперечний розмір.

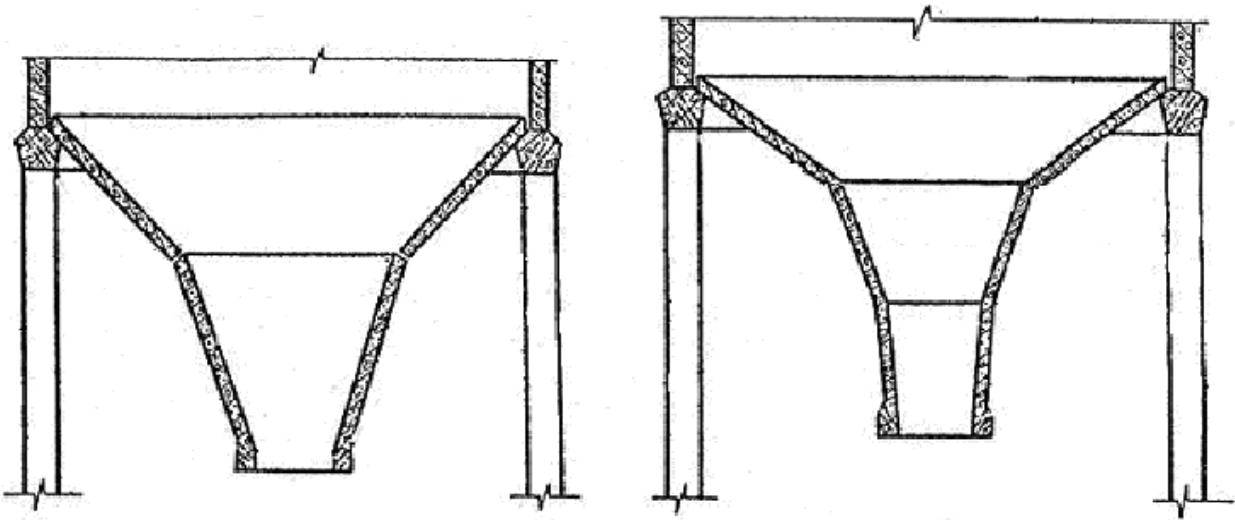


**Рис. 2.18. Форма нижньої частини двоступінчастої ємнісної конструкції з умови постійності нормального тиску**

Таким чином, форма нижньої частини має вид кривої, яка різко звужується майже відразу після зони стикування нижньої і верхньої частин конструкції. На практиці, дана зовнішня форма може бути апроксимована, наприклад, 1 – 2 прямими, які утворять ломаний контур нижньої частини ємності, наприклад, як це зображено на рис. 2.19.

Для визначення кута нахилу до горизонту дотичної в точках отриманої за виразом (2.78) кривої слід знайти похідну. Опускаючи математичні перетворення, остаточний вираз буде мати вигляд виразу (2.79):

$$\alpha(y) = 90^\circ - \operatorname{arctg} \left( \frac{a_{20} \cdot 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_{20} \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)}}{4 \cdot 4 \sqrt{\left( 1 + 2 \cdot \pi^2 \cdot \frac{\cos \varphi}{a_{20} \cdot \operatorname{tg}(\xi - \psi)} \cdot y \right)^5}} \right). \quad (2.79)$$



**Рис. 2.19. Заміна криволінійної поверхні  
випускної частини ємності  
прямолінійними конструктивними елементами**

Отримана залежність, також, має вигляд функціональної залежності.

## 2.5. Сфери застосовності отриманого рішення

Наприкінці даного розділу слід відмітити, що при виводі всіх залежностей, представлених в даному розділі монографії, автор навмисно уникав прив'язки до конкретного будівельного матеріалу, з якого може бути зроблена ємнісна конструкція. Адже запропонована фізична модель описує поведінку сипучого середовища в ємності незалежно від матеріалу, з якого він виконаний. Головною умовою при цьому є достатньо висока жорсткість стінок ємності,

оскільки всі математичні вирази в даній роботі були отримані саме за цієї передумови.

Зважаючи на це, залізобетонна ємність, навіть, може виявитися такою, що більше, ніж металева буде відповідати запропонованій дискретно-континуальній моделі сипучого середовища в ємнісній конструкції.

## **Розділ 3.**

### **Експериментальне дослідження поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції**

Даний розділ присвячено опису проведених автором експериментальних спостережень за особливостями укладки зерен сипучого матеріалу на моделях ємнісних конструкцій, а також виконаних комплексних експериментальних досліджень на малорозмірних ємнісних конструкціях.

Приведені основні завдання, поставлені та вирішені в ході досліджень, використані при цьому прилади та обладнання, обґрунтування вибору форми та розмірів експериментальних установок, а також використаних сипучих матеріалів. Подано аналіз отриманих результатів та їх співставлення із авторською теоретичною моделлю сипучої середи та офіційно прийнятим підходом.

## **Раздел 3.**

### **Экспериментальные исследования поведения сыпучего материала в емкостной конструкции**

Данный раздел посвящен описанию проведенных автором экспериментальных наблюдений за особенностями укладки зерен сыпучего материала на моделях емкостных конструкций, а также выполненных комплексных экспериментальных исследований на малоразмерных емкостных конструкциях.

Приведены основные задачи, поставленные и решенные в ходе исследований, использованные при этом приборы и оборудование, обоснование выбора формы и размеров экспериментальных установок, а также использованных сыпучих материалов. Дан анализ полученных результатов и их сопоставление с авторской теоретической моделью сыпучей среды и официально принятым подходом.

## 3.1. Спостереження на моделі ємнісної конструкції

### 3.1.1. Мета і завдання спостережень

В основі розробленої автором і представленої в попередньому розділі даної монографії моделі поведінки сипучого матеріалу в замкненому сосуді лежить гіпотетичне припущення про характер укладки зерен сипучого матеріалу з однаковими розмірами в статичному стані у вигляді горизонтальних рядків. Це обумовлено, як вже зазначалось, намаганням кожного з зерен зайняти положення, в якому б його центр ваги був розташований якомога нижче. Причому така укладка має створюватись незалежно від кута нахилу стінок бокових граней ємності. Ще одним чинником, який потенційно може впливати на тип укладки, є спосіб та швидкість завантаження сипучого матеріалу.

Другим питанням, відповідь на яке мали дати проведені спостереження, є питання про характер зміни цієї структури сипучого матеріалу під час його вивантаження: яким чином воно відбувається і чи взагалі відбувається.

Для реальних сипучих матеріалів, які мають різноманітну форму й розміри зерен, характер їх укладки обумовлюється й ще цими двома факторами. Проте, в теоретичних викладках вони можуть бути інтегрально враховані за допомогою кута укладки  $\beta$ , як це вже зазначалось вище. Тому достатнім виявляється використання в ході спостережень сипучого матеріалу з однаковим розміром і формою зерен.

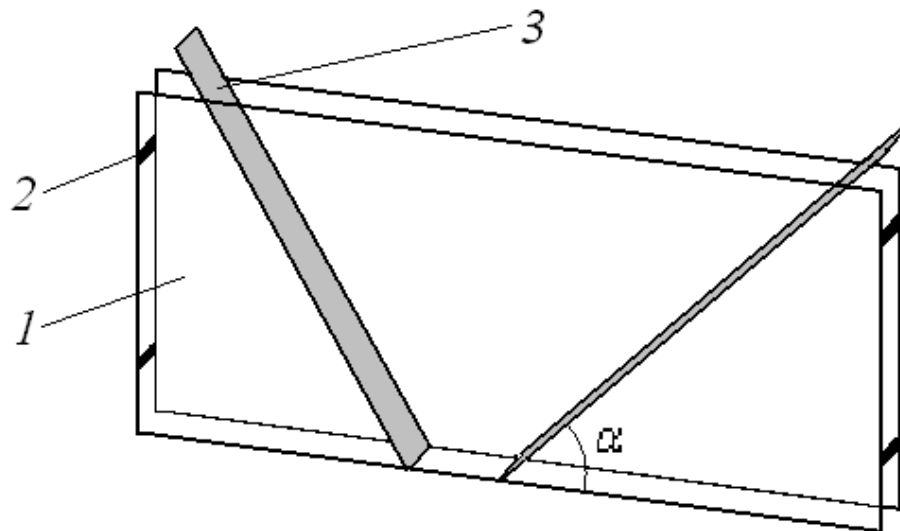
Вплив яких-небудь інших чинників, окрім чотирьох перерахованих, авторові представляється неможливим, що виходить з самого фізичного визначення поняття про укладку зерен сипучого матеріалу.

Таким чином, спостереження ставили на меті прослідкувати для сипучого матеріалу із однаковими зернами характер їх укладки в стані статичного спокою і при вивантаженні з урахуванням змін кута нахилу бокових стінок ємності і швидкості її завантаження.

### 3.1.2. Експериментальна модель і сипучий матеріал

Для вирішення сформульованого таким чином завдання автором була розроблена та виконана спеціальна експериментальна модель. Вона являла собою плоский вертикальний переріз ємності в місці її вертикальної площини симетрії.

Конструктивно модель складалася (рис. 3.1) з двох вертикальних прозорих плоских листів, що жорстко скріплюють між собою по краях. Між ними розміщувалися бічні жорсткі елементи за товшки рівними діаметру зерен сипучого матеріалу, що використовувався. Ці елементи мали можливість переміщатися між вертикальними листами таким чином, щоб було можливо змінювати їх кут нахилу по відношенню до горизонту (кут  $\alpha$ ).



**Рис. 3.1. Модель вертикального перерізу ємності:**

- 1 – плоский вертикальний прозорий лист,
- 2 – кріплення, 3 – бічний елемент

Оскільки природні сипучі матеріали мають різноманітний розмір зерен, відносно якого важко добитися однаковості, навіть, після ретельного просіювання, не кажучи вже про їх форму, то для проведення спостережень був обраний штучний сипучий матеріал. Він являв собою пластикові шарики із стандартним розміром зерна рівним 8 мм.

### **3.1.3. Прилади і обладнання**

Оскільки в ході досліджень передбачалось виконувати лише візуальні спостереження за характером укладки зерен сипучого матеріалу, то ніяких спеціальних приладів та обладнання при цьому не використовувалось.

### **3.1.4. План досліджень**

В ході експериментальних спостережень в моделі варіювався кут нахилу бічних елементів в діапазоні  $30^{\circ}$  -  $90^{\circ}$  з кроком  $10^{\circ}$ , які відповідають кутам нахилу стінок реальних ємнісних споруд. При цьому кути нахилу обох бічних елементів приймались однаковими, що відповідало симетричній ємності.

Розмір випускного отвору приймався більше 5 діаметрів зерна сипучого матеріалу для можливості запобігання утворенню сводів при вивантаженні і витримувався постійним в ході всіх досліджень.

В ході спостережень завантаження сипучим здійснювалося двома способами – по одному зерну, що відповідає низькій швидкості завантаження, і насипом всього об'єму відразу, що відповідає високій швидкості завантаження.

Всього таким чином було проаналізовано близько 30 різних комбінацій.

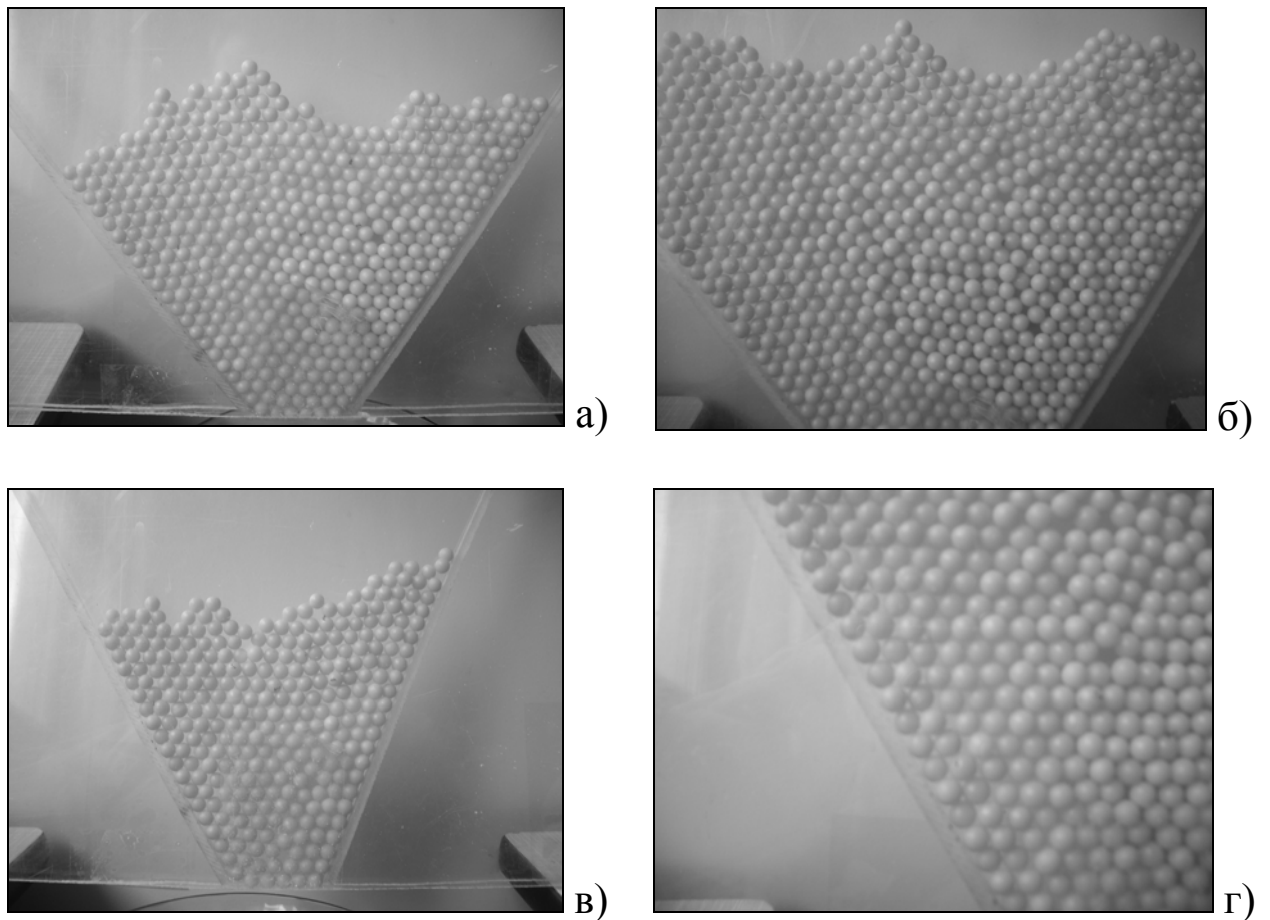
### **3.1.5. Результати досліджень та їх аналіз**

Отримані в ході досліджень характерні картини укладки зерен сипучого матеріалу в статичному стані приведені на зроблених під час спостережень фотографіях рис. 3.2.

З аналізу приведених фотографій виходить, що рядова укладка зерен сипучого матеріалу приблизно виконується тільки при кутах, близьких до  $60^{\circ}$ . У решті випадків укладка виявляється далекою від рядової.

При цьому у міру завантаження відбувалося ущільнення структури сипучого матеріалу. Так верхній шар, відповідний приблизно 5 - 10 діаметрам зерна матеріалу виявлявся достатньо рихлим, а всі нижчерозташовані шари мали щільнішу укладку, яка істотним чином не змінювалась з глибиною.

Окрім цього було встановлено достатньо слабкий вплив швидкості завантаження на характер укладки зерен сипучого матеріалу.



**Рис. 3.2. Характер укладки зерен сипучого матеріалу в статичному стані при куті нахилу бічних елементів:**

а)  $50^\circ$ , б)  $50^\circ$  (збільшено), в)  $65^\circ$ , г)  $65^\circ$  (збільшено)

Далі необхідно відзначити, що було встановлене формування доволі специфічного прикордонного шару із зерен сипучого матеріалу завтовшки приблизно 5 діаметрів зерна матеріалу, в якому укладка було достатньо правильним. У центральній частині укладка наближалась до хаотичної.

З цього виходить, що кут укладки зерен сипучого матеріалу  $\beta$  слід розглядати не тільки як такий, що враховує розмір та форму зерен сипучого матеріалу, а й як більш інтегральну характеристику, яка враховує і характер укладки зерен в залежності від зовнішньої форми ємнісної конструкції. Саме в такому сенсі розглядався

цей параметр в роботі Л. В. Гячева [81], на відміну від роботи проф. В. А. Богомягких [80].

Окремий інтерес представляє аналіз самих процесів завантаження і вивантаження сипучого матеріалу. Було встановлено, що при завантаженні зерна сипучого матеріалу розташовуються так, щоб центр їх тяжіння зайняв найбільш низьку позицію. Це підтверджує припущення, прийняте в основу авторської теоретичної моделі поведінки сипучого матеріалу.

При вивантаженні відбувається перерозподіл структури сипучого матеріалу, таким чином, що процес руху починається пошарово з нижчих шарів. Це призводить до того, що змінюється напрям сил тертя між зернами матеріалу на протилежне в порівнянні зі станом статичного спокою.

Таким чином, підсумовуючи результати проведених натурних експериментальних спостережень за характером укладки зерен сипучого матеріалу в моделі конструкції ємності, можна констатувати наступне:

1. Кут укладки зерен сипучого матеріалу має розглядатися як інтегральна характеристика самого сипучого матеріалу безвідносно до форми ємності і швидкості його завантаження.

2. Структура укладки зерен сипучого матеріалу утворена двома зонами: зовнішньою, завтовшки близько 5 діаметрів зерна сипучого, прилеглою до бічних стінок з достатньо правильною укладкою і центральною, такою, що має хаотичну безладну укладку.

3. В момент початку вивантаження сипучого матеріалу з конструкції ємності був виявлений ефект, що полягає в зміні напрямку сил тертя між окремими зернами сипучого матеріалу на протилежне в порівнянні із статичним станом. Вказаний ефект може бути причиною стрибкоподібної зміни тиску сипучого матеріалу, що передається їм на стінки конструкції ємності.

4. Зважаючи на відсутність яких-небудь фізичних параметрів, що додатково впливають на кут укладки сипучого матеріалу при просторовому його укладанні, отримані результати можуть бути індуктивно поширені на більш загальний випадок просторової конструкції ємності.

## **3.2. Натурний експеримент на малорозмірній ємнісній конструкції**

Оскільки натурні експериментальні дослідження було вирішено проводити в приміщенні для виключення можливого несприятливого впливу погодних чинників (вологість, температура і ін.) на властивості матеріалів і точність вимірювань, то його габарити визначили весь характер досліджень. Тому дослідження проводились на малорозмірній ємнісній конструкції.

Зазначимо, що незважаючи на невеликі розміри, виконані дослідження мають окреме самостійне досить важливе практичне значення. Так, ємності з геометричними розмірами такого порядку, як експериментальні моделі, як було зазначено в оглядовому розділі 1 даної дисертаційної роботи, широко використовуються на хімічних та фармацевтичних підприємствах. Завантажувані в них сипучі матеріали, як правило, є дуже кошторисними, а нерідко ще й отруйними, агресивними, радіоактивними й іншими небезпечними для людини та зовнішнього середовища компонентами тонких хімічних та фармацевтичних підприємств.

### **3.2.1. Мета і завдання досліджень**

Представлені в даному підрозділі монографії експериментальні дослідження були спрямовані на експериментальну перевірку практичної адекватності розробленої авторської теоретичної моделі поведінки сипучого середовища в замкненому сосуді.

Завдання дослідження напружено-деформованого стану (НДС) конструкції ємності від дії сипучого матеріалу в ході експериментальних досліджень напряду не ставилось. Проте через його визначення було вирішено констатувати про особливості взаємодії сипучого матеріалу із ємнісною спорудою.

Таким чином, в якості основних завдань запланованих експериментальних досліджень були сформульовані наступні:

1. Визначення характеру розподілу статичного тиску сипучого матеріалу на стінки ємності в режимі його завантаження і зберігання через визначення НДС конструкції ємності.

2. Визначення особливостей зміни тиску сипучого матеріалу на стінки ємності в режимі його повного самостійного вивантаження через контроль змін в НДС конструкції ємності порівняно із статичним станом.

3. Визначення характеру зміни динамічних властивостей конструкції ємності в режимі її завантаження сипучим матеріалом.

Вказані завдання охоплюють весь цикл роботи конструкції ємності при її експлуатації, починаючи з моменту завантаження сипучого матеріалу, його зберігання і закінчуючи розвантаженням споруди.

Оскільки заплановані дослідження являли собою достатньо серйозне завдання, то при розробці подальшої методології його проведення було необхідно використання існуючих теоретичних розробок щодо підготовки та планування експериментальних досліджень [99 – 102].

### **3.2.2. Експериментальні ємності і сипучі матеріали**

Для вирішення поставлених експериментальних завдань довелося виконати ретельний попередній теоретичний аналіз і моделювання передбачуваних в експерименті ситуацій. Це було необхідно для вірного і можливо точнішого вибору тих параметрів, якими повинні будуть характеризуватися використовувані сипучі матеріали і використані конструкції ємностей.

Для цього було вирішено обрати метод комп'ютерного моделювання на основі одного з сучасних поширених чисельних методів будівельної механіки – методу скінчених елементів (МСЕ). Такий вибір ґрунтувався на наступних аргументах. Даний метод на сьогоднішній день є вже достатньо апробованим, дослідженим та має в своєму підґрунті могутню теоретичну основу [103 – 111]. В теперішній час цей метод використовується досить широко для моделювання складних інженерних конструкцій, в тому числі й самим автором впродовж досить значного часу [2].

Моделювання за допомогою МСЕ було вирішено проводити на базі одного із сучасних проектно-обчислювальних комплексів будівельної орієнтації SCAD for Windows, який має відповідні атестаційні документи і був у розпорядженні автора [112, 113].

Загальна кількість відібраних таким чином параметрів перевищила 20. До їх числа увійшли як конструктивні розміри і форма

ємності (матеріал, товщина стінки, розміри впускного і випускного отворів, кількість і вид ступіней, висота і форма кожної ступені і т.д.), так і фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу (розмір і форма зерна, щільність, питома вага і т.д.). Основна складність при встановленні можливих діапазонів зміни кожного з параметрів полягала в необхідності правильно відтворити ті ефекти, які були необхідні для проведення вимірювань, – відповідність розмірів ємності фракційному складу сипучого матеріалу, можливість повного самостійного вивантаження матеріалу, проведення вимірювань без руйнування конструкцій для можливості їх багатократного повторення, необхідність отримання результатів на можливо більшій комбінації змінних параметрів.

Зважаючи на істотну кореляцію між властивостями сипучого матеріалу і геометричними параметрами ємнісної конструкції розробка експериментальної установки була почата з підбору сипучих матеріалів. В якості основної вимоги до них висувалась вимога про повну відсутність зчеплення між зернами матеріалу. Це дозволяє максимально наблизити випробовуваний матеріал до використовуваних в теоретичних моделях ідеальних сипучих матеріалів. Необхідною практичною умовою реалізації цієї вимоги була дуже близька до нуля (по можливості, нульова) вологість сипучого матеріалу.

Всупереч традиції, яка склалася при дослідженні сипучих матеріалів, форму їх зерен було вирішено прийняти довільною. Це відразу розширило круг тих матеріалів, які можливо було використовувати в експерименті. При цьому відпала необхідність в роботі зі штучними матеріалами, як наприклад, сталевий дріб (улюблений матеріал експериментаторів минулого століття), а з'явилась можливість використовувати реальні сипучі матеріали, що підвищує практичну цінність досліджень.

Відносно фракційного складу сипучого матеріалу вимоги також були понижені до можливості варіації розмірів його зерен в певному діапазоні, всупереч прагненню у минулому використовувати матеріали із строго однаковими зернами. Проте, використовувані діапазони вже не могли бути вибрані довільно, а повинні були бути взаємопов'язані з передбачуваними розмірами конструкції і існуючим на виробництві стандартним гранулометричним рядом.

Таким чином було прийнято три діапазони зміни розмірів зерна сипучого матеріалу – до 5 мм, що відповідало поняттю дрібно-

зернистого матеріалу в сучасних теоретичних моделях; 5 – 10 мм, що відповідало поняттю грубозернистого матеріалу в сучасних теоретичних моделях; 10 – 20 мм, що також відповідало поняттю грубозернистого матеріалу в сучасних теоретичних моделях. Необхідність використання двох видів грубозернистих матеріалів була пов'язана з бажанням автора перевірити взаємозв'язок між розміром зерна і швидкістю витікання матеріалу з ємності, точніше відсутність цього взаємозв'язку, на яку вказують наявні теоретичні розробки [81]. До того ж використання трьох різних видів сипучих матеріалів додатково підвищує достовірність експериментальних результатів, порівняно з одним або двома.

Після перебору декількох можливих варіантів (були відкинуті ряд матеріалів з надмірно низькою питомою вагою, як наприклад, гранульований шлак або керамзит), було відібрано три матеріали – пісок із розміром зерен 0,25 – 2 мм, мармурова крихта із розміром зерен 5 – 10 мм і щебінь із розміром зерен 10 – 20 мм. Всі матеріали були заздалегідь висушені і очищені від сміття й грязі. Пісок додатково просівався.

Решта фізико-механічних характеристик сипучих матеріалів (кути зовнішнього і внутрішнього тертя, кут укладки і т. п.) не мала визначального впливу на характер побудови експериментальних досліджень. Вони визначались в ході окремих спеціальних досліджень з тим, щоб закладаючи набутих значень в різні теоретичні моделі, мати можливість зіставити їх результати з отриманими експериментальними даними.

Після вибору сипучих матеріалів можливим стало визначитися з розмірами і формою експериментальної установки. Вона складалася з двох частин. Основна частина була, власне, досліджуваною конструкцією ємності, яка встановлювалася на нижню опорну частину. Остання виконувала функцію несучої конструкції, забезпечуючи необхідну висоту розташування конструкції ємності над підлогою, необхідну жорсткість і незмінність опор, а також можливість прикріплення вимірювальних приладів.

Конструктивно опорна частина була виконана у вигляді просторової рамної конструкції з труби 50×50×1,5 мм і мала діагональні розпірки в двох вертикальних площинах. Сумарне вертикальне допустиме навантаження на опорну конструкцію склало близько 25 т.

В якості експериментальної конструкції була прийнята двоступінчата симетрична ємність пірамідально-призматичного типу з

плоскими стінками. Щодо обґрунтування такого рішення можна зазначити наступне. Ємності двоступінчатого пірамідально-призматичного типу є одними з найбільш поширених типів ємностей, широко вживаними в практиці. Симетрія конструкції була необхідна для створення більш рафінованих умов в ході експерименту, з одного боку, і для можливості дублювання розташування вимірювальних приладів на сусідніх стінках, з іншого боку. Плоска форма стінок на противагу, наприклад, круглій формі була прийнята з метою підвищення точності виготовлення конструкції і можливості застосування тензодатчиків для вимірювання деформацій.

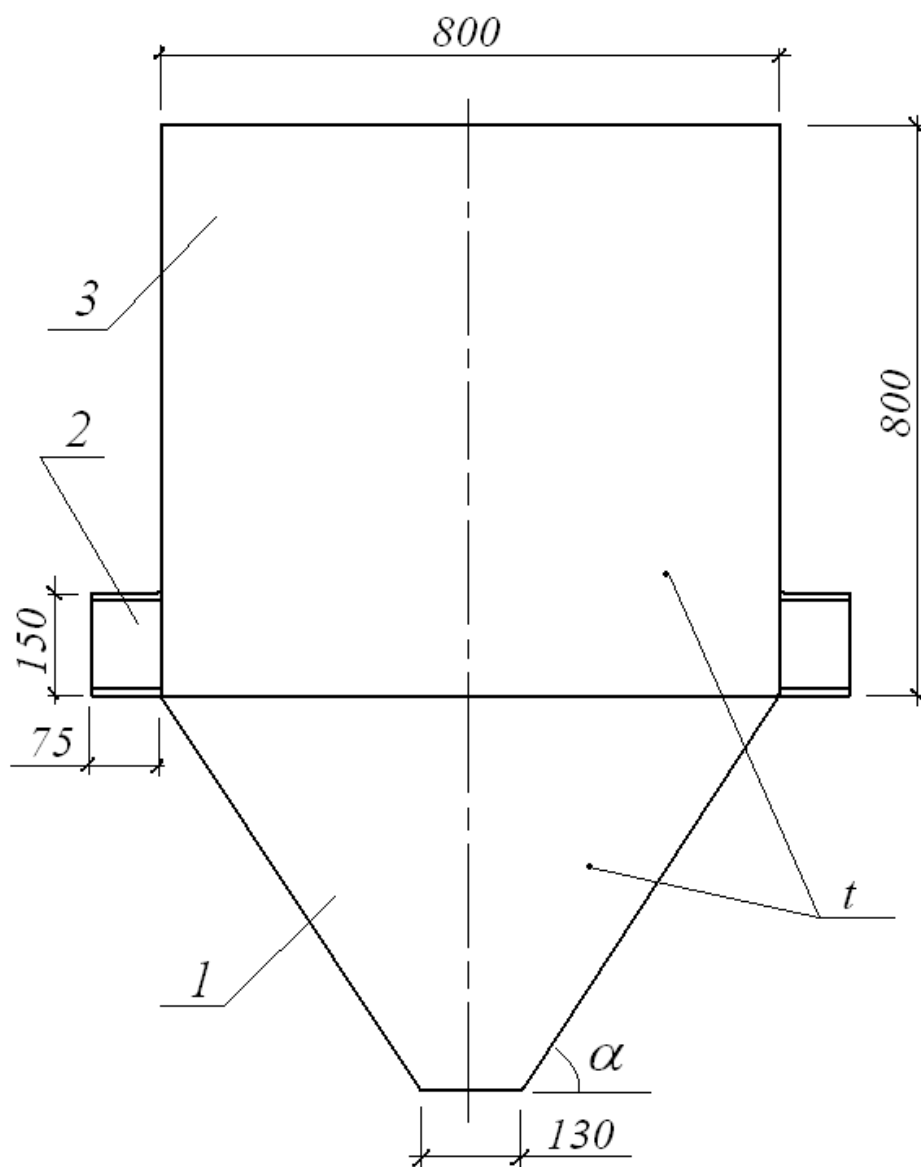
Виходячи з можливостей розташування конструкції у випробувальному приміщенні, а також забезпечення прийнятної об'єму завантаженого в неї матеріалу (завантаження виконувалося вручну, що вимагало певних витрат часу) остаточно були прийняті наступні конструктивні розміри ємності, представлені на рис. 3.3.

При цьому спеціально розраховувалися розміри випускного отвору, таким чином, щоб не відбувалося утворення небажаних сводів сипучих матеріалів при їх вивантаженні і таким чином виключити небезпеку потрапити в зону пульсуючого витіку. Підкріплюючі ребра жорсткості було вирішено не використовувати для спрощення умов експерименту і отримання більш точних даних.

В якості перемінних конструктивних параметрів були прийняті наступні:

- товщина стінки ємності ( $t$ );
- кут нахилу нижньої воронкоподібної частини ємності до горизонталі ( $\alpha$ ).

Саме вони є визначальними з точки зору особливостей поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції згідно із авторською теоретичною моделлю. Оскільки виготовити і випробувати 4 різних конструкції виявилось економічно і технологічно складним, то було виготовлено 2 ємності. Для першої були прийняті наступні параметри:  $t = 4$  мм і  $\alpha = 55^\circ$  (після обмірів -  $54,4^\circ$ ); для другої:  $t = 2$  мм і  $\alpha = 45^\circ$  (після обмірів -  $44,2^\circ$ ). Товщина стінки ємності призначалася з міркувань роботи її елементів в геометрично лінійній області, а кут нахилу воронки – з міркувань повного самостійного спорожнення ємностей.



**Рис. 3.3. Конструкція експериментальної ємності:**

- 1 – нижня пірамідальна частина,
- 2 – двотавровий опорний виступ (з листа товщиною 6 мм),
- 3 – верхня призматична частина

Матеріалом для виготовлення ємностей була прийнята сталь, з якої у багатьох випадках виготовляються в практиці такі споруди. Необхідні її властивості визначались в ході окремих спеціальних досліджень.

### **3.2.2.1. Визначення властивостей сипучих матеріалів**

В авторській теоретичній моделі поведінки сипучого середовища в замкненому посуді використовуються чотири фізико-механічні характеристики сипучого матеріалу: щільність  $\gamma$ , кут зовнішнього тертя сипучого матеріалу о стінки ємності  $\varphi$ , кут внут-

рішнього тертя між зернами сипучого матеріалу  $\psi$  і кут укладки зерен сипучого матеріалу  $\beta$ .

В якості щільності приймалась величина насипної щільності. Методи її визначення загальновідомі. Кут зовнішнього тертя визначався за допомогою лінійки Желіговського у відповідності до методики, наведеної в рекомендаціях [114]. Для визначення кута внутрішнього тертя використовувався зсувний прилад за методикою рекомендацій [114]. Кут укладки зерен визначався згідно з рекомендаціями роботи [81].

Після статистичної обробки отриманих результатів вимірювань та відсіву грубих погрешностей [115 – 117] були отримані остаточні значення шуканих фізико-механічних параметрів сипучих матеріалів, які наведені в табл. 3.1.

Всі отримані значення достатньо непогано корелюють із більшістю даних, наведених у відповідних довідниках. Кут укладки зерен – це відносно новий параметр, стосовно якого даних у довідниках немає. Тому він визначався із особливою ретельністю та якістю.

Таблиця 3.1

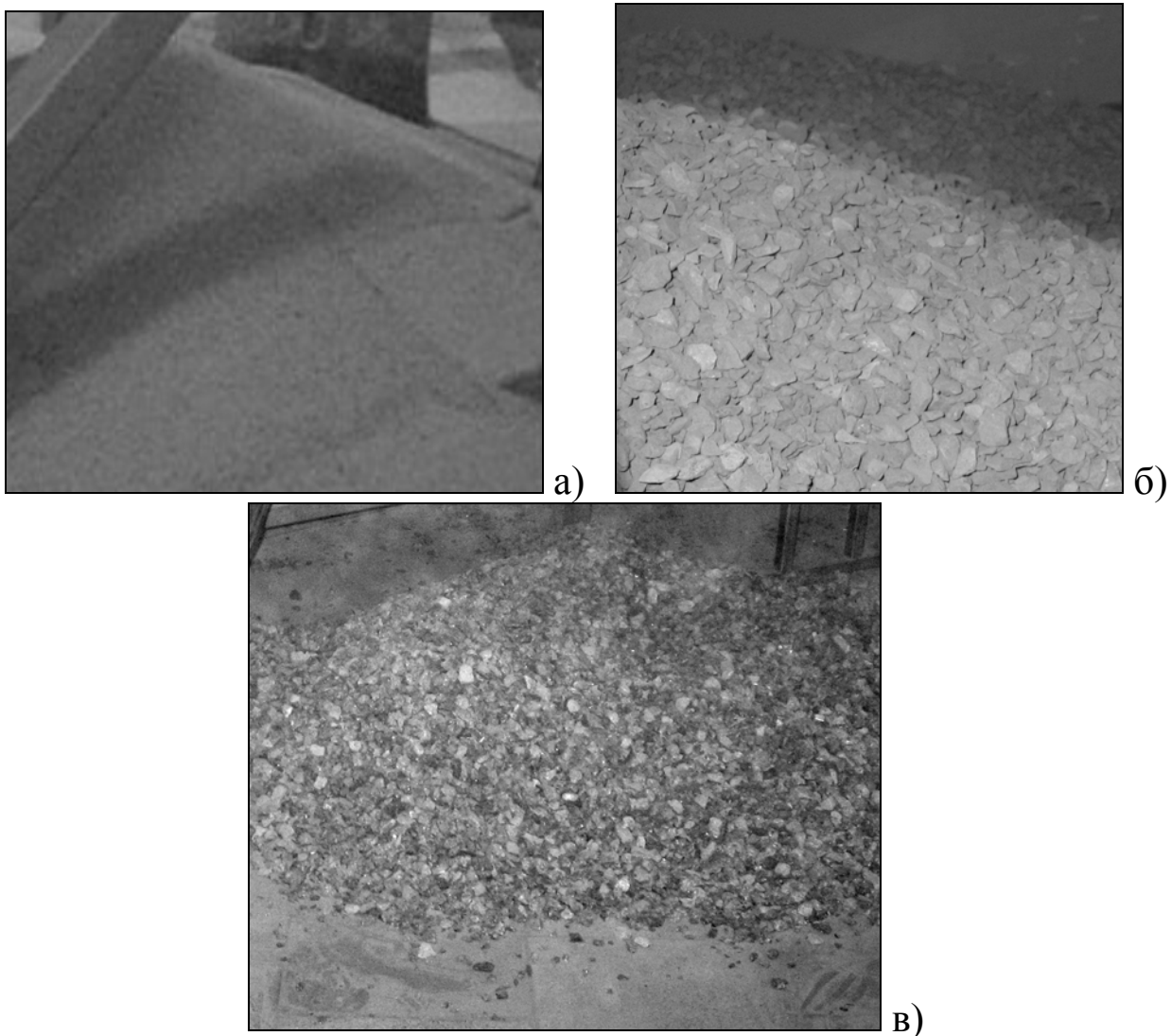
**Визначені основні фізико-механічні характеристики сипучих матеріалів**

Сипучий матеріал	Фізико-механічна характеристика			
	щільність $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	кут зовнішнього тертя $\varphi$ , °	кут внутрішнього тертя $\psi$ , °	кут укладки $\beta$ , °
Пісок	1613	17,8	43,6	57,6
Мармурова крихта	1785	19,5	40,1	48,9
Щебінь	1968	24,3	49,8	46,5

Цікаво звернути увагу на отримані значення кута укладки. Для піску він виявився досить близьким до кута 60°, який відповідає правильній укладці зерен. Це не дивно оскільки форма зерен піску досить близька до сферичної, а їх розмір відрізняється незначно. Інші два сипучих матеріали – мармурова крихта і щебінь – мають форму зерен більш витягнуту, тому значення кута укладки виявляються меншими.

Окрім зазначених основних фізико-механічних характеристик для проведення експериментальних досліджень були потрібні ще дві додаткові характеристики: кут природного відкосу сипучого матеріалу  $\chi$  і розмір зерна  $d$ .

Стосовно їх визначення серед фахівців немає єдиної думки. Тому були прийняті найбільш поширені в практиці підходи. В якості кута природного відкосу прийнятий насипний кут природного відкосу, який майже співпадає з кутом обрушення сипучого матеріалу [54, 56]. Його значення визначалось за допомогою відсипання матеріалу і вимірювання кута нахилу, який утворила призма відсипання із горизонталлю (рис. 3.4).



**Рис. 3.4. Насипний кут природного відкосу сипучих матеріалів піску (а), мармурової крихти (б) і щебеню (в)**

Стосовно визначення розміру зерна сипучого матеріалу виникли певні ускладнення, оскільки зерна мармурової крихти і особливо щебеню не мали шароподібної форми. Тому в якості цього розміру приймалось середнє геометричне значення трьох розмірів, за методикою, викладеною в роботі [81], відповідно до виразу (3.1):

$$d = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c}, \quad (3.1)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – відповідно три лінійних розміри зерна сипучого матеріалу.

Остаточно визначені додаткові фізико-механічні характеристики сипучих матеріалів наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Визначені додаткові фізико-механічні характеристики сипучих матеріалів**

Сипучий матеріал	Фізико-механічна характеристика	
	кут природного відкосу $\varphi$ , °	діаметр зерна $d$ , мм
Пісок	37,6	1,26
Мармурова крихта	34,8	7,65
Щебінь	37,2	14,97

Зазначимо, що фактично наведений в табл. 3.2 розмір зерна сипучого матеріалу є середньовзвážеною величиною з урахуванням існуючого стандартного ряду за фракційним складом.

**3.2.2.2. Визначення властивостей сталі ємностей**

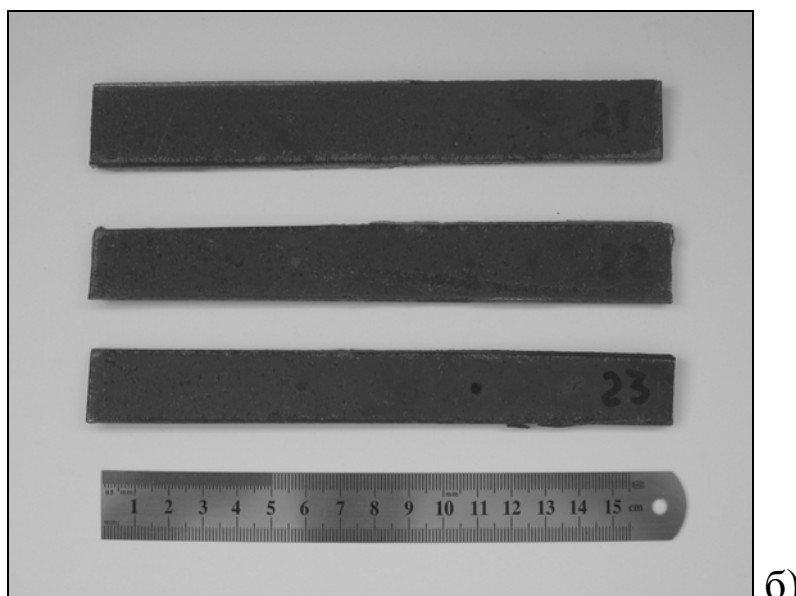
Необхідними для проведення експериментальних досліджень характеристиками сталей, з яких були виготовлені експериментальні ємності, є границя пружності, яка визначає рівень допустимого навантаження, і модуль пружності, який використовується для розрахунку напружень.

Для визначення цих характеристик були виконані випробування спеціально підготовлених зразків на розтяг. Зразки були вирізані із сталевих листів, з яких виготовлялись ємності, та за розмірами відповідали рекомендованим вимогами стандартів [118] для сталі товщиною 4 мм і [119] для сталі товщиною 2 мм.

Всього було випробувано 12 зразків по 6 для кожної зі сталей. Половина зразків в кожному випадку мала форму із виступами для кріплення у випробувальній машині із захватами та інша половина форму пластин для кріплення у випробувальній машині без таких захватів. Їх зовнішній вигляд представлений на рис. 3.5, 3.6. Зразки нумерувались за таким принципом: перша цифра номеру зразка відповідала номеру серії, друга – порядковому номеру зразка в серії. Серії 1 і 2 відносились до сталі першої ємності, серії 3 і 4 – другої ємності.

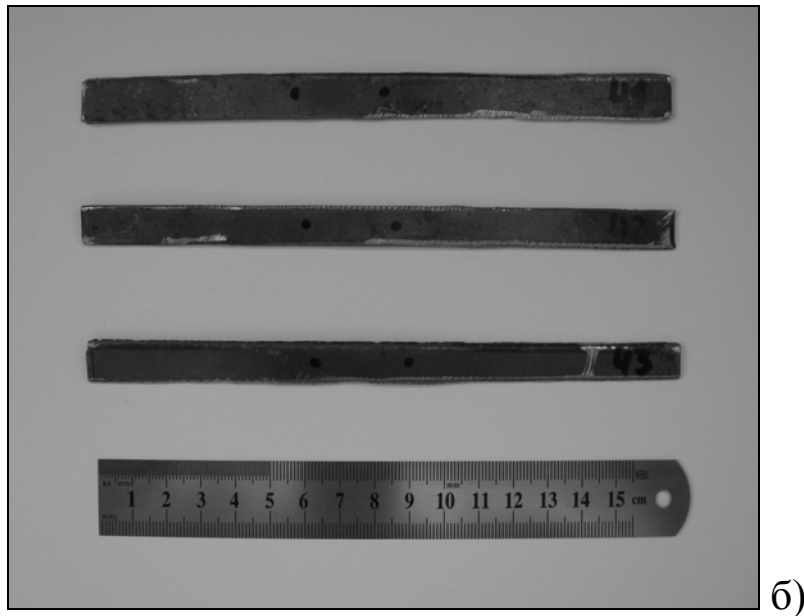


а)



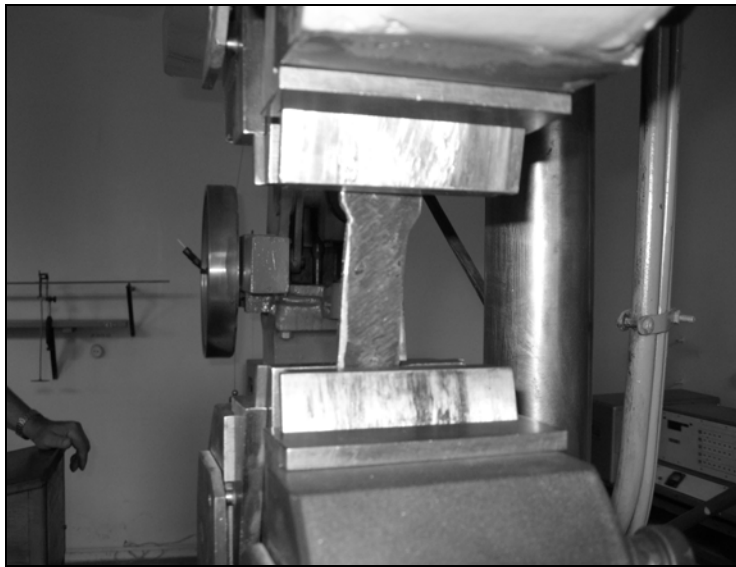
б)

**Рис. 3.5. Зразки зі сталі товщиною 4 мм для випробувань на розтяг серії 1 (а) і серії 2 (б)**



**Рис. 3.6. Зразки зі сталі товщиною 4 мм  
для випробувань на розтяг  
серії 3 (а) і серії 4 (б)**

Випробування проводились відповідно до методики стандартів [118, 119]. При цьому в якості випробувальної машини використовувалась універсальна гідравлічна машина УГ-20/2, яка може розвинути максимальне зусилля на розтяг до 20 т. Під час проведення випробувань зразки кріпилися в спеціальних самозатяжних захватах, тому на отриманих діаграмах розтягу початкові ділянки мають дещо нелінійний характер. На рис. 3.7 показано зразок у випробувальній машині до та після випробувань.



а)



б)

**Рис. 3.7. Сталевий зразок у випробувальній машині до (а) та після (б) випробувань на розтяг**

На рис. 3.8 показано фотографії розірваних зразків після зняття з випробувальної машини. Досить чітко простежується збільшення довжини зразків після випробувань, а також наявність чітко визначеної зони руйнування в робочій частині зразків. Руйнування відбувалось частково за класичної пластичною схемою із утворення шийки в зоні розриву, а частково за крихкою схемою, що свідчить про наявність у випробуваних сталях незначної кількості легуючих домішок.

Отримані за результатами випробувань діаграми руйнування у всіх випадках носили достатньо однотипний характер, тому одна з них, в якості прикладу, наведена на рис. 3.9.



а)



б)

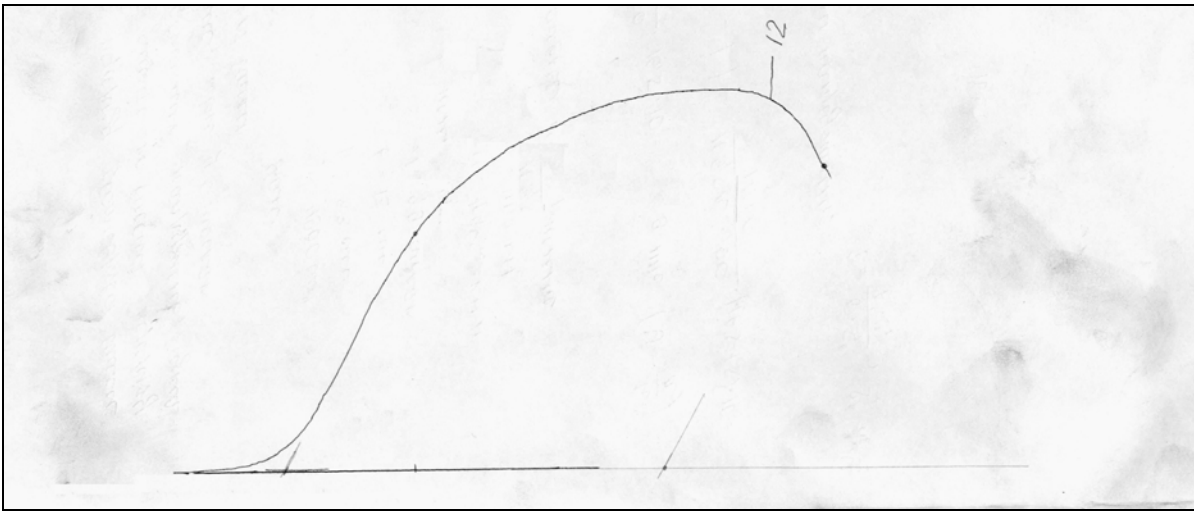


в)



г)

**Рис. 3.8. Зруйновані після випробувань зразки серії 1 (а), серії 2 (б), серії 3 (в) і серії 4 (г)**



**Рис. 3.9. Отримана діаграма випробовувань сталевих зразків на розтяг**

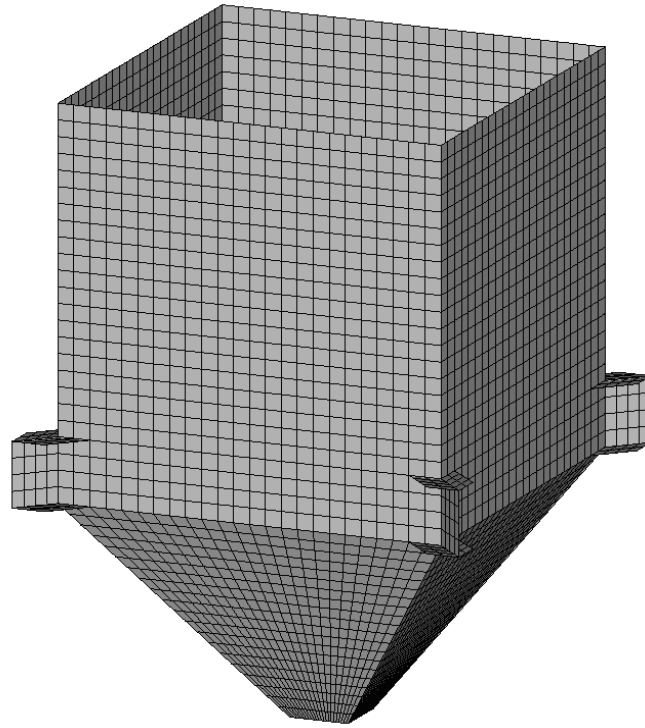
Відповідно до аналізу отриманих діаграм та показниками, які були зареєстровані під час випробовувань, було встановлено, що в обох випадках сталь відповідає за своїми характеристиками низьколегованій сталі марки ВСт3Г з границею пружності 265 МПа та усередненим модулем пружності  $1,96 \cdot 10^5$  МПа. Саме ці характеристики були використані в подальших експериментальних дослідженнях.

Проведений обсяг додаткових досліджень виявився достатнім.

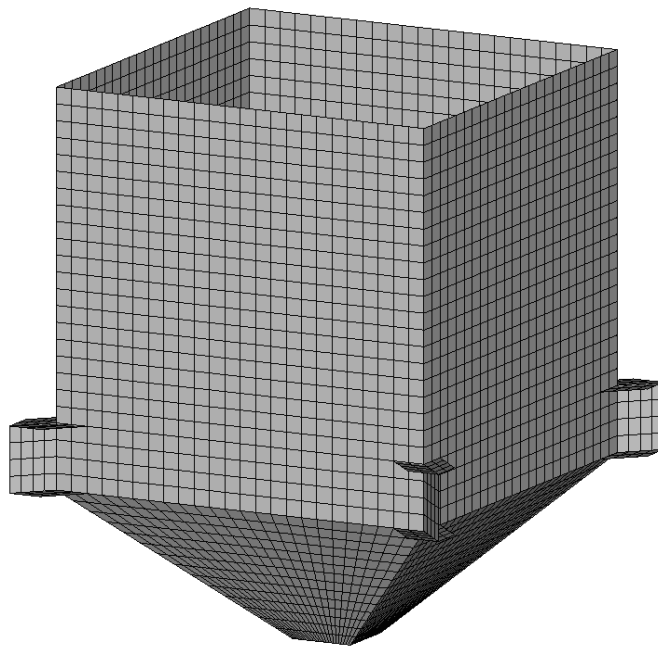
### **3.2.2.3. Комп'ютерна модель ємності**

Для визначення точок розташування вимірювальних приладів на експериментальних ємнісних конструкціях було виконане попереднє комп'ютерне моделювання за допомогою МСЕ.

Розроблені для цього скінчено-елементні моделі (СЕ-моделі) для двох експериментальних ємностей представлені на рис. 3.10. Вони являли собою пластинчасті системи, побудовані із оболонкових ізотропних 4-вузлових елементів. Дискретизація СЕ-моделей виконувалась відповідно до рекомендацій, визначених автором в його попередніх дослідженнях [2]. Форма і розміри скінчених елементів приймалися такими, щоб забезпечити точність отриманих результатів в межах 1 %.



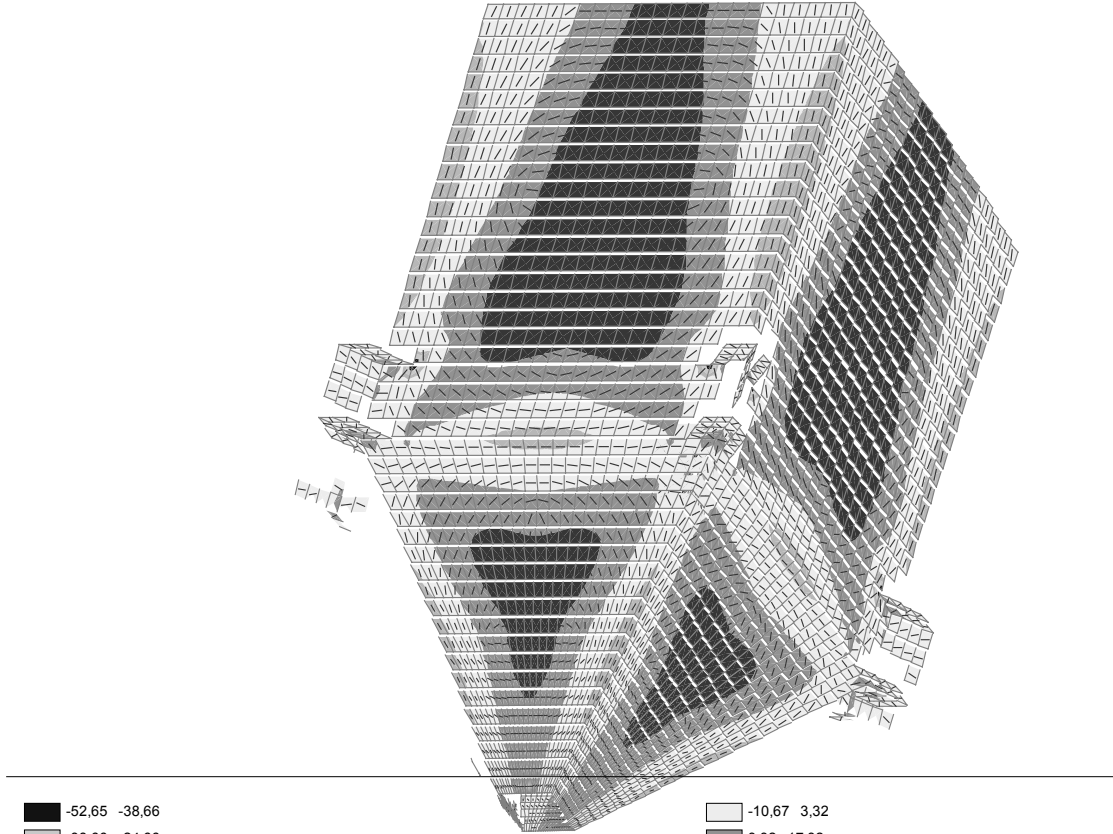
a)



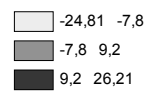
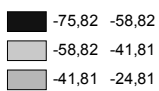
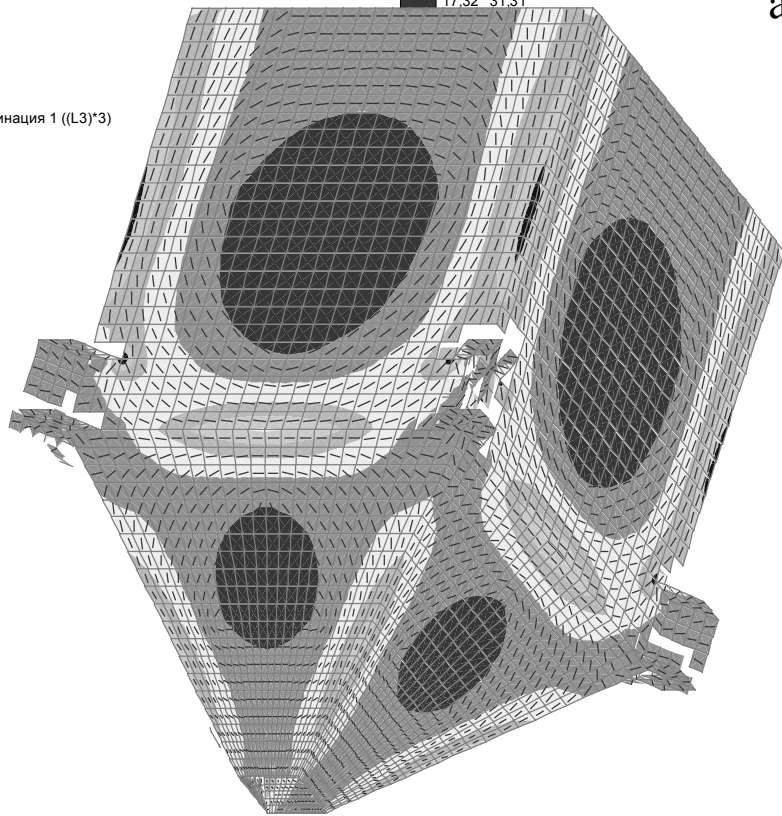
б)

**Рис. 3.10. Розроблені СЕ-моделі експериментальних ємностей № 1 (а) і № 2 (б)**

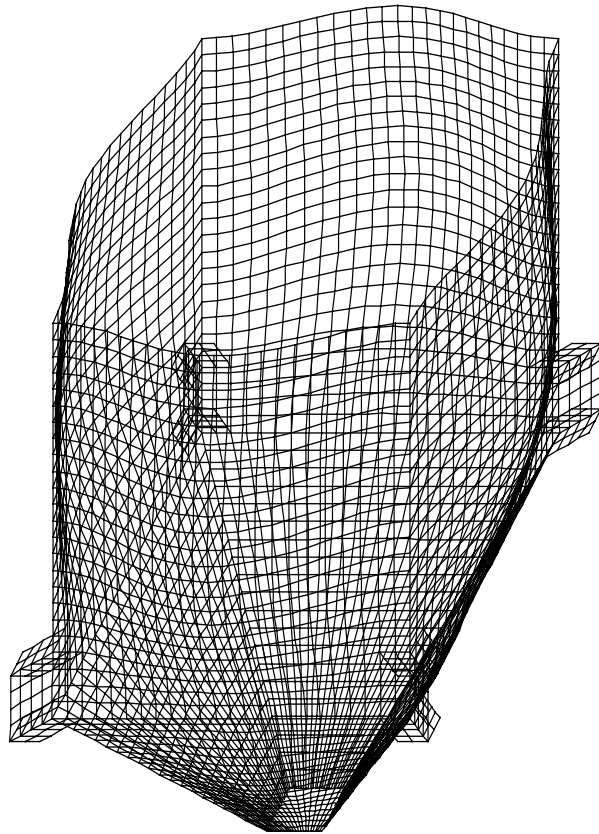
Напружено-деформований стан (НДС) обох ємностей під дією тиску від сипучих матеріалів за авторською теоретичною моделлю виявився доволі однотипним і представлений для ємності № 1 на рис. 3.11 і 3.12. Це дозволило визначити зони з найбільшим рівнем НДС в експериментальних конструкціях, а також вказати на додаткові зони, які потребували уваги при дослідженнях.



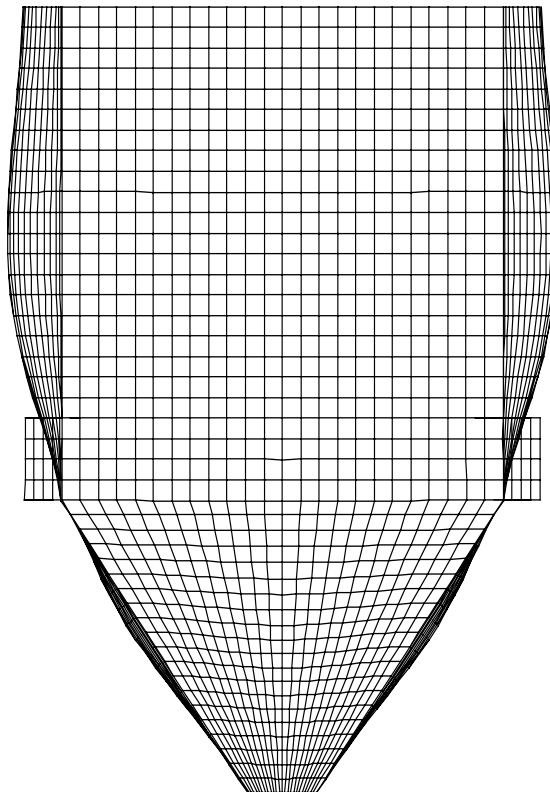
Внешний слой S1 Н/мм2 Комбинация 1 ((L3)\*3)



**Рис. 3.11. Розподіл першого (а) і третього (б) головних напружень на зовнішній стороні експериментальної ємності № 1**



а)



б)

**Рис. 3.12. Загальний вигляд (а) і вигляд збоку (б) деформацій експериментальної ємності № 1**

За допомогою розроблених СЕ-моделей був, також, отриманий спектр власних частот коливань експериментальних ємностей та відповідні форми власних коливань, тобто була виконана процедура, відома під назвою модальний аналіз. Визначення власних частот та форм коливань велося стандартними методами найскорішого запуску та ітерації підпросторів, закладеного в комплексі SCAD. Отримані результати для десяти нижчих частот приведені в таблиці 3.3. На рис. 3.13 наведені характерні нижні отримані форми коливань.

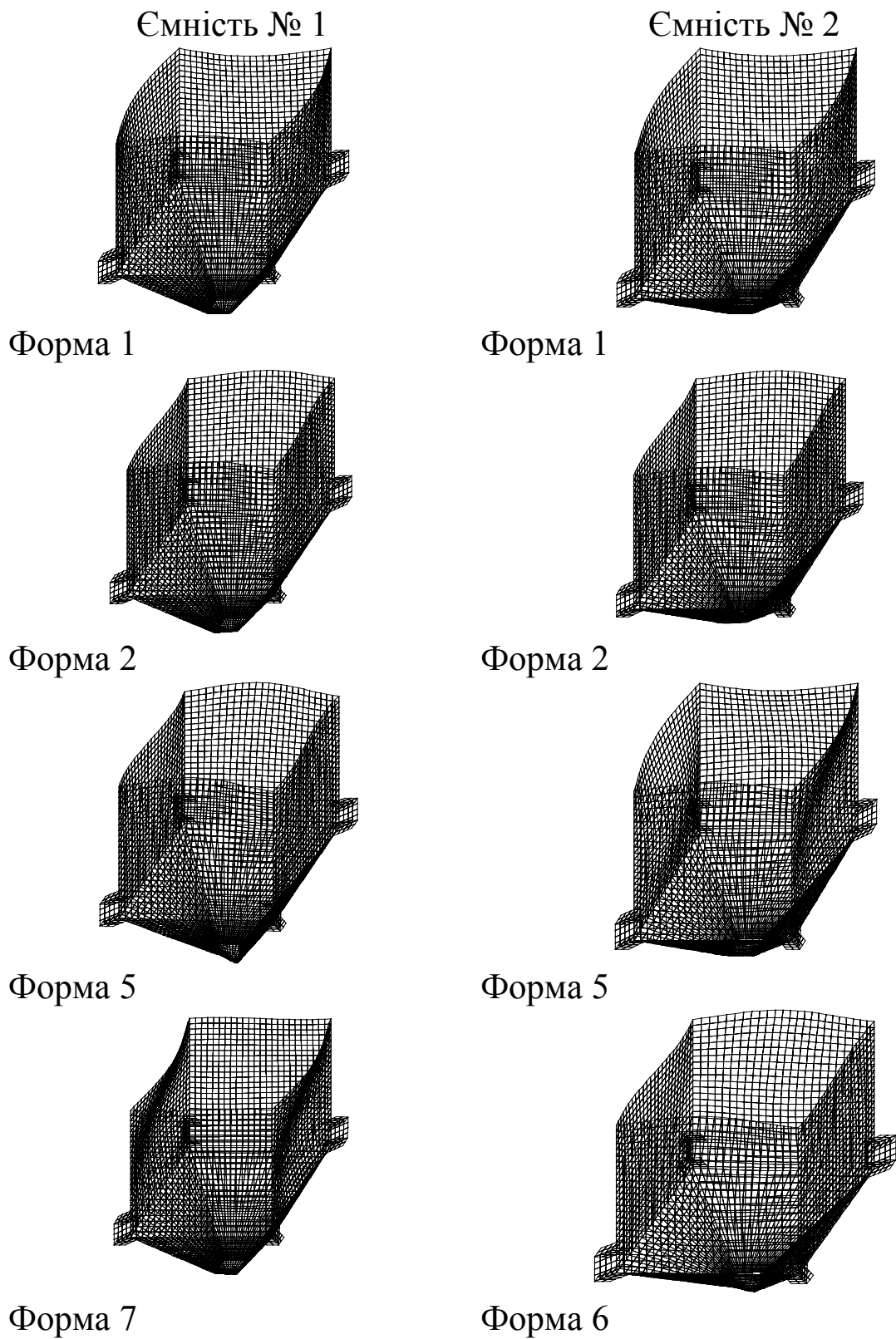
Таблиця 3.3

**Частотний спектр власних коливань  
експериментальних ємностей,  
отриманий за чисельними розрахунками**

Частота	Ємність № 1	Ємність № 2
1	19,0	9,7
2	25,6	13,2
3	26,6	13,4
4	36,7	18,3
5	40,3	24,4
6	47,0	25,1
7	52,3	26,8
8	53,4	28,6
9	59,3	29,8
10	64,8	33,0

Помітно, що у випадку першої ємності спектр частот є досить розрідженим, хоча мають місце й частоти, що відповідають кратним формам. Для другої ємності спектр частот є більш щільним і є більша кількість кратних форм.

Що стосується отриманих в результаті чисельного аналізу форм власних коливань, то для першої ємності форми 1 - 6 є одновузловими, а двовузлові форми починаються із форми 7. Форми 2 та 3 є кратними між собою та відповідають наявності симетрії в конструкції. Нижня частина ємності активно задіяна у формах 2, 3, 5 і 7.



**Рис. 3.13. Отримані розрахункові форми власних коливань для експериментальних ємностей**

Для другої ємності картина дещо інша. Кратними також виявляються форми 2 і 3, але двовузлові форми починаються вже з форми 5. Нижня частина ємності виявляються активно задіяна практично у всіх формах разом із верхньою частиною.

### 3.2.3. Прилади і обладнання

У відповідності до визначеного при СЕ-моделюванні НДС конструкції експериментальних ємностей були визначені місця розташування вимірювальних приладів - тензорезисторів з базою 5 мм і прогиномірів годинного типу (мессур) з точністю вимірювань 0,01 мм.

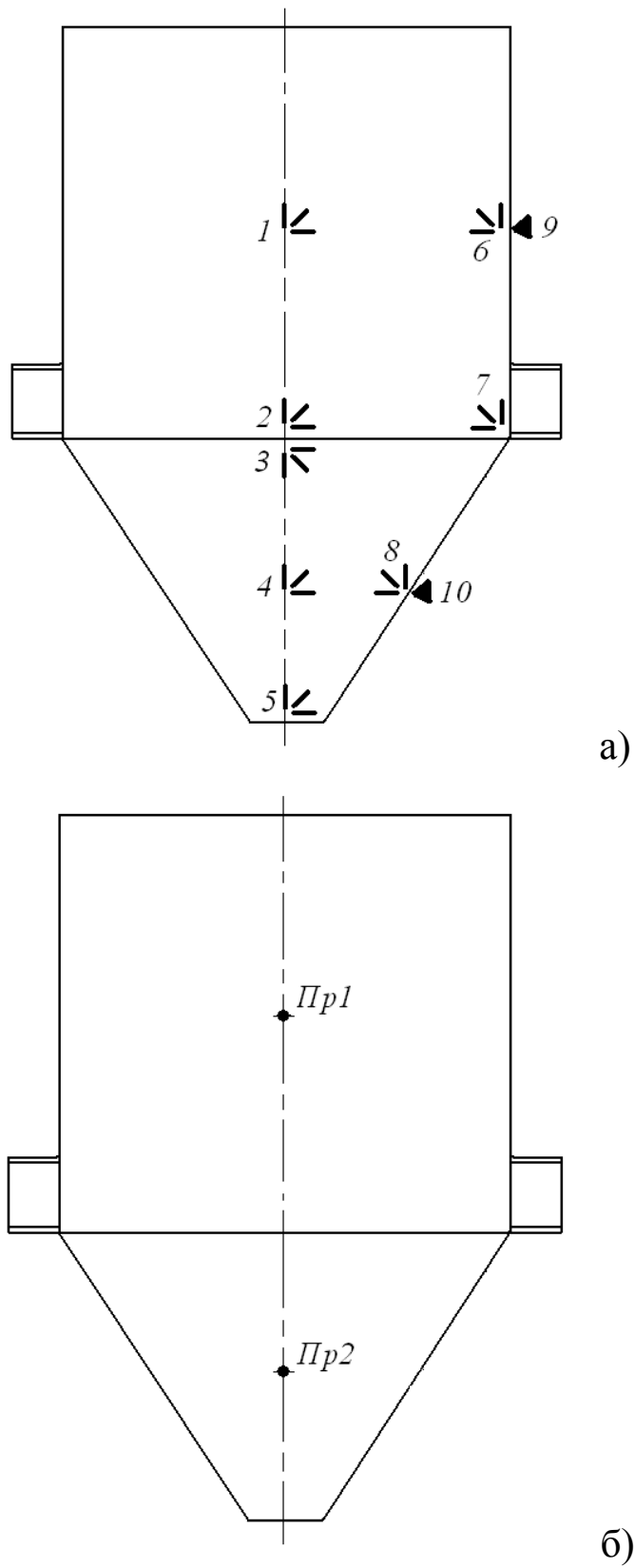
Тензорезистори наклеювалися по схемі стандартної розетки, оскільки напружений стан елементів стінки конструкції є плоским. Всього на конструкції було розташовано 10 тензорозеток (8 розеток на одній стороні ємності і 2 дублюючих розетки на сусідній стороні). Схема розташування розеток приведена на рис. 3.14,а.

Прогиноміри встановлювалися в двох точках на одній стінці ємностей по одному в середині верхньої та нижньої частин в місцях найбільшого очікуваного її прогину. Схема розташування прогиномірів приведена на рис. 3.14,б.

Тензодатчики через кабельні роз'єми приєднувалися до вимірювального комплексу ТМК-1, який у свою чергу підключався безпосередньо до комп'ютера, дозволяючи достатньо швидко і оперативно проводити експрес-обробку, а згодом і повну обробку отриманих даних. Зовнішній вигляд вимірювального комплексу представлений на фото рис. 3.15.

На рис. 3.16 і 3.17 приведені фотографії обох виготовлених експериментальних ємностей зі встановленими приладами вимірювань. Позначення сторін було прийняте латинськими буквами проти годинникової стрілки при погляді зверху: сторона А призначалася для установки прогиномірів, сторона В була основною для наклейки тензорозеток, сторона С була дублюючою для наклейки тензорозеток, сторона D для вимірювань не використовувалася.

На рис. 3.18 представлено внутрішній вигляд використаних в ході експериментальних досліджень ємнісних конструкцій. На фотографіях видно зроблену спеціальну розмітку, за якою визначалися проміжні рівні завантаження сипучим матеріалом.



**Рис. 3.14. Схема розташування вимірювальних приладів на ємностях:**  
 а) тензорезисторів, б) прогиномірів

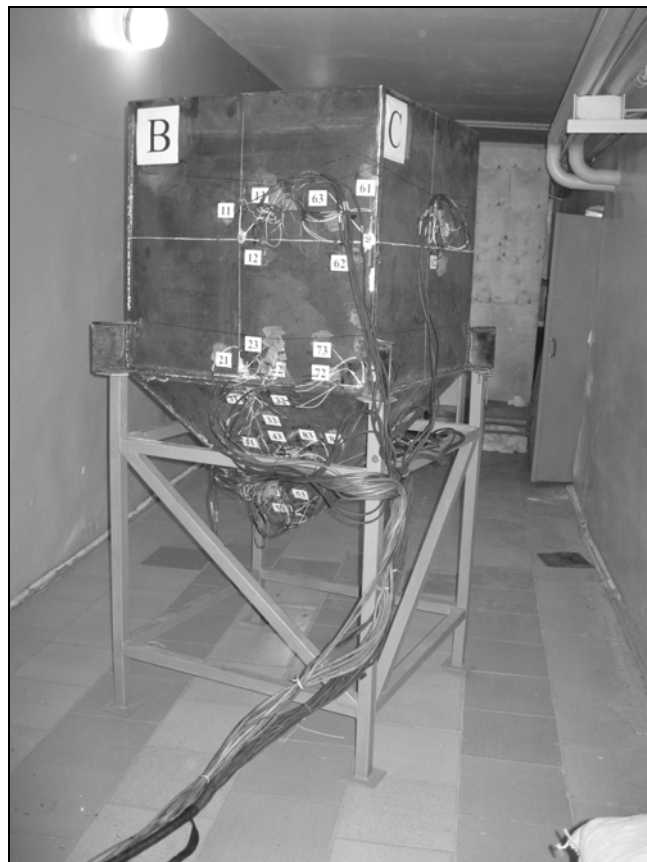


**Рис. 3.15. Вимірювальний комплекс ТМК-1**

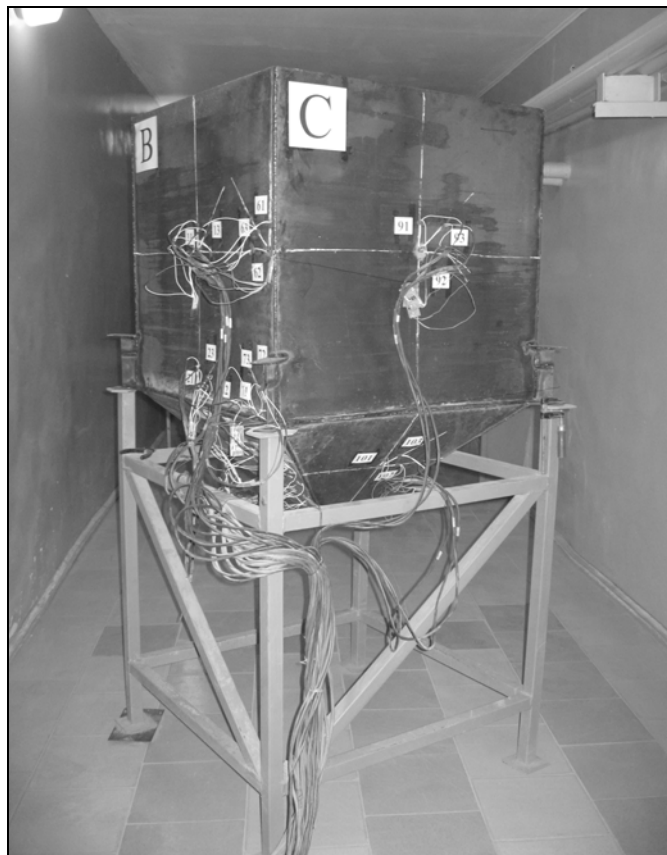
На рис. 3.19 і 3.20 представлені укрупнені фотографії розташованих на ємностях тензодатчиків разом із температурними компенсаційними блоками, а також прогиномірів, відповідно.

Відмітимо, також, що виконані конструкції ємностей розглядалися автором не як масштабні моделі реальних ємностей, а як невеликого розміру реальні ємності. Відповідно, і їх параметри, а також параметри сипучих матеріалів вибиралися не з умов масштабування. Справа в тому, що одним з типів ємнісних конструкцій, які широко використовуються на хімічних та фармацевтичних підприємствах, є ємності з невеликим об'ємом до 5 – 10 м<sup>3</sup>. Завантажені в них сипучі матеріали, як правило, є дуже кошторисними, а нерідко ще й отруйними, агресивними, радіоактивними й іншими небезпечними для людини та зовнішнього середовища компонентами тонких хімічних та фармацевтичних підприємств.

Тому в ході експериментальних досліджень, що проводилися, питання про подібність і залучення математичного апарату теорії подоби не ставилося. На думку автора, такий підхід є цілком правомірним і сприяє підвищенню достовірності отримуваних результатів.



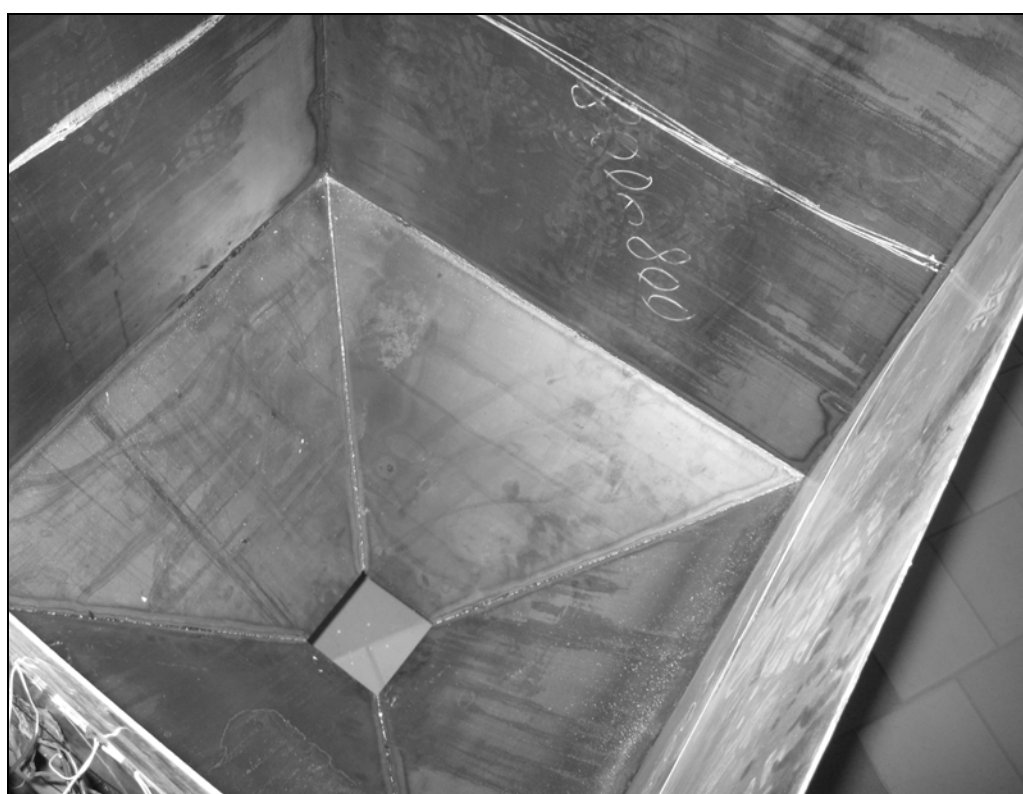
**Рис. 3.16. Зовнішній загальний вид експериментальної ємності № 1**



**Рис. 3.17. Зовнішній загальний вид експериментальної ємності № 2**

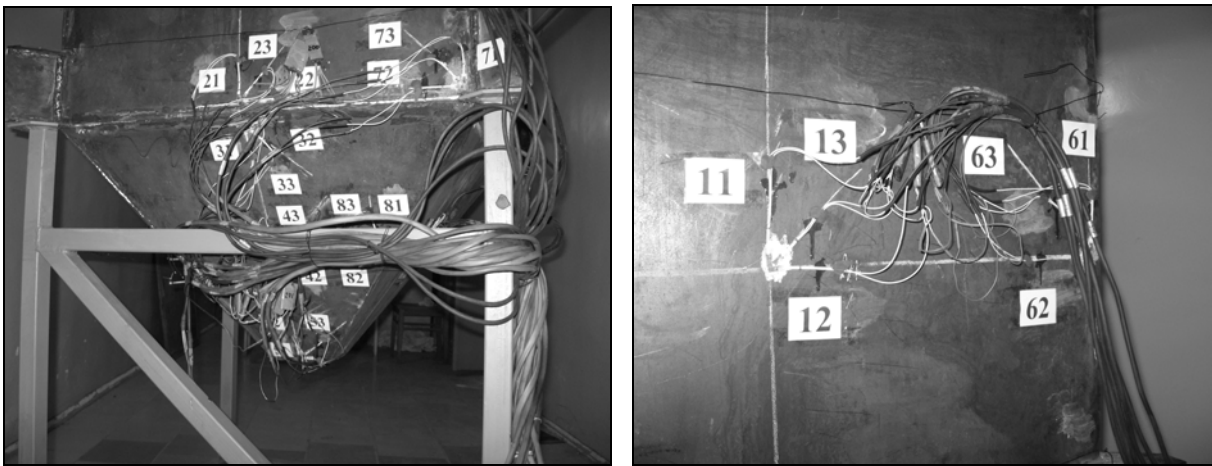


а)

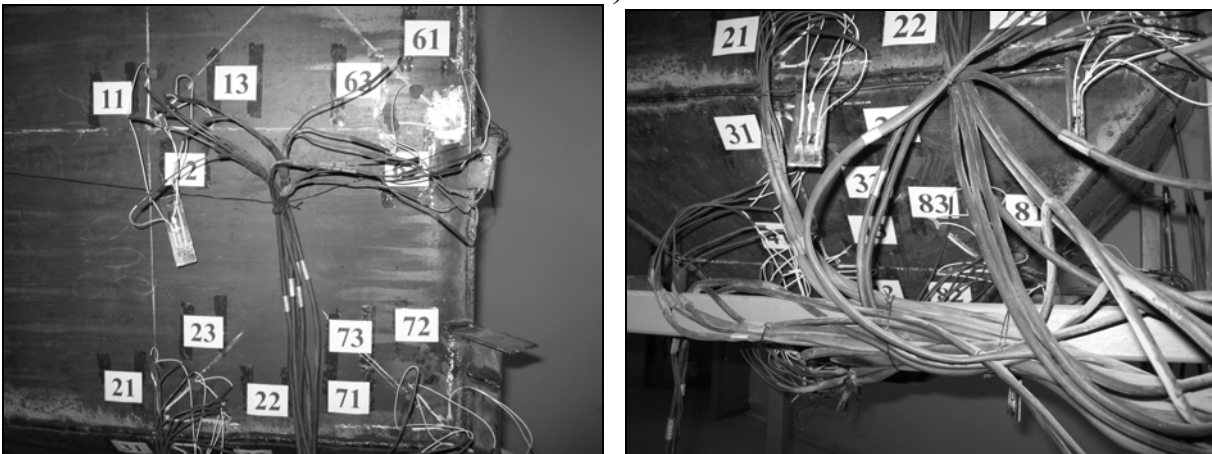


б)

**Рис. 3.18. Внутрішній вигляд експериментальної ємності № 1 (а) і № 2 (б)**



а)



б)

**Рис. 3.19. Фрагменти розташування розеток тензодатчиків на експериментальній ємності № 1 (а) і № 2 (б)**



**Рис. 3.20. Розташування прогиномірів на експериментальних ємностях**

### 3.2.4. План досліджень

Наступним ключовим питанням, пов'язаним з безпосереднім проведенням експериментальних досліджень, було питання про складання плану досліджень. Його розробка велася з урахуванням наявних теоретичних напрацювань з даного питання [99 - 102]. Експеримент було вирішено проводити, слідуючи термінології роботи [99] за однофакторною схемою, послідовно, але в довільному порядку, завантажуючи спочатку ємність № 1 сипучими матеріалами, а потім ємність № 2. Таким чином здійснювалася рандомізація вимірювань, що дозволяє вважати їх при подальшій обробці рівноточними і незалежними.

Окремим питанням було встановлення необхідної кількості кожного з опитів, що проводилися. Згідно роботам [120, 121] для гарантованого досягнення необхідної точності вимірювань їх мінімальна кількість повинна складати 5 вимірювань, а для виходу на 5 % довірчий рівень надійності – 7 вимірювань. Проте, в цьому, як і в більшості інших подібних експериментальних досліджень відносно будівельних конструкцій, здійснити таку їх кількість технічно складно, економічно невиправдано і вимагає значних часових і трудових витрат. Тому автор користувався достатньо поширеним емпіричним прийомом, коли кількість вимірювань підбиралася на основі концепції, так званого, послідовного експерименту [99]. При цьому нові вимірювання продовжують проводитися тільки до отримання стійких результатів. Проте, мінімально необхідна кількість випробувань у всіх випадках дорівнювала трьом опитам.

З урахуванням поставлених експериментальних завдань була прийнята наступна поетапна схема проведення експериментальних досліджень.

#### **Етап І. Підготовчий.**

Виконується збірка і установка експериментальної моделі.

Проводиться наклеювання тензодатчиків і установка прогиномірів.

Виконується тарировка приладів.

Визначаються характеристики матеріалів ємностей (стали).

Визначаються характеристики вибраних сипучих матеріалів.

## **Етап II. Робота з ємністю № 1.**

Послідовне завантаження всіма трьома сипучими матеріалами, для кожного з яких проводяться 3 серії випробувань.

Серія 1. Статичні випробування.

Проводиться 3 цикли завантаження ємності. Показання вимірювальних приладів знімаються при рівнях завантаження 25 %, 50 %, 75 % і 100 % об'єму ємності.

Серія 2. Динамічний запис процесу розвантаження.

Проводиться 3 записи процесу розвантаження ємності від 100 % завантаження до повного спорожнення.

Серія 3А. Запис динамічних параметрів порожньої ємності.

Проводиться 3 записи динамічних параметрів.

Серія 3В. Запис динамічних параметрів завантаженої ємності.

Проводиться 3 записи динамічних параметрів. Показання вимірювальних приладів знімаються при рівнях завантаження 25 %, 50 %, 75 % і 100 %.

## **Етап III. Робота з ємністю № 2.**

Послідовне завантаження всіма трьома сипучими матеріалами, для кожного з яких проводяться 3 серії випробувань.

Серія 1. Статичні випробування.

Проводиться 3 цикли завантаження ємності. Показання вимірювальних приладів знімаються при рівнях завантаження 25 %, 50 %, 75 % і 100 % об'єму ємності.

Серія 2. Динамічний запис процесу розвантаження.

Проводиться 3 записи процесу розвантаження ємності від 100 % завантаження до повного спорожнення.

Серія 3А. Запис динамічних параметрів порожньої ємності.

Проводиться 3 записи динамічних параметрів.

Серія 3В. Запис динамічних параметрів завантаженої ємності.

Проводиться 3 записи динамічних параметрів. Показання вимірювальних приладів знімаються при рівнях завантаження 25 %, 50 %, 75 % і 100 %.

Відмітимо, що здається можливим сумістити серію 1 і серію 3 випробувань, проводячи їх в ході одних і тих же завантажень. Проте, як свідчать наявні теоретичні дані, при динамічній дії навіть короткочасного типу відбувається ущільнення сипучого матеріалу. Наслідком цього, як правило, є підвищення його тиску на стінки

ємності. Якщо не врахувати в ході експериментальних досліджень цей факт, то результати послідовних записів при різних рівнях завантаження ємностей виявляться несумісними, що зробить неможливою їх подальшу обробку і оцінку.

### **3.2.5. Результати досліджень та їх аналіз**

Розглянемо отримані в ході проведених експериментальних досліджень результати та дамо їм оцінку. Як вже зазначалось, виконувались як статичні, так і динамічні дослідження.

#### **3.2.5.1. Результати статичних випробувань**

Отримані за експериментальними даними результати статичних випробувань для кожного із сипучих матеріалів оброблялись за відомим алгоритмом для отримання значень головних напружень. Потім виконувалась їх статична обробка та відсіювання грубих помилок.

Остаточні отримані результати статичних експериментальних досліджень після обробки разом із їх співставленням із результатами комп'ютерного моделювання для найгіршого випадку повного завантаження ємностей наведені в табл. Б.1 – Б.6 (напруження) і табл. Б.7 і Б.8 (прогини) додатку Б. Там же наведено порівняння отриманих експериментальних результатів з офіційно прийнятим підходом згідно ДБН В.2.2-8-98 [17] – табл. Б.9 – Б.16, відповідно.

Аналізуючи їх було зроблено висновок про те, що в цілому отримані значення напружень і прогинів досить точно збігаються із теоретичними даними, отриманими за допомогою методу скінчених елементів для авторської моделі. Середнє відхилення значень напружень, порівняно із результатами комп'ютерного моделювання становить 30 – 35 %, а прогинів 10 – 15 %, що є повністю задовільними величинами. Найбільше за величиною відхилення було зареєстровано для розетки 5. Це легко може бути пояснено наближеністю цієї розетки до випускного отвору та краю конструкції.

Порівнюючи експериментальні результати із результатами офіційного підходу слід констатувати між ним більш високий рівень розходження. Причому для різних типів сипучих матеріалів та різних ємностей він суттєво коливається і може сягати, навіть, декількох разів як за рівнем напружень, так і рівнем прогинів.

### 3.2.5.2. Результати випробування на розвантаження

В ході експериментальних досліджень процесу розвантаження записувалися динамічні процеси по всіх 30 встановленим тензодатчикам (каналам). При цьому виконувалася синхронізація за часом, а також вівся відеозапис процесу.

Картини записаних процесів якісно виявилися достатньо однотипні як для різних ємностей, так і для різних матеріалів, тому на рис. 3.21 представлені найбільш характерні з них, отримані для ємності № 1 у випадку завантаження її мармуровою крихтою. У всіх записах в лівій частині вказані номери каналів (двозначна цифра) і рівень зафіксованої напружень в МПа (дробова цифра; знак «+» означає розтягування, знак «-» означає стиснення). Тимчасова сітка нанесена з кроком 2 с. Для ємності № 2 були отримані аналогічні результати.

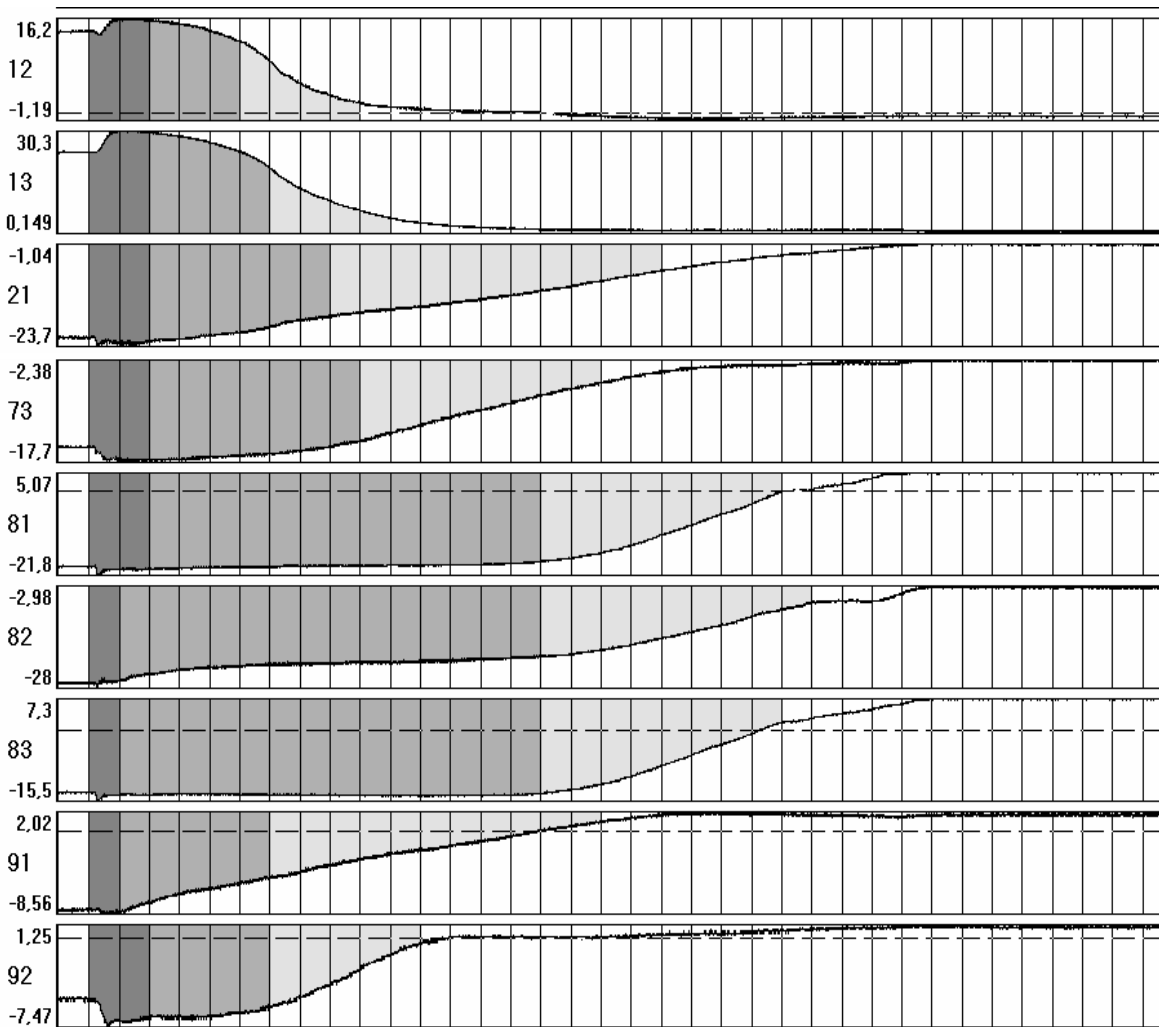
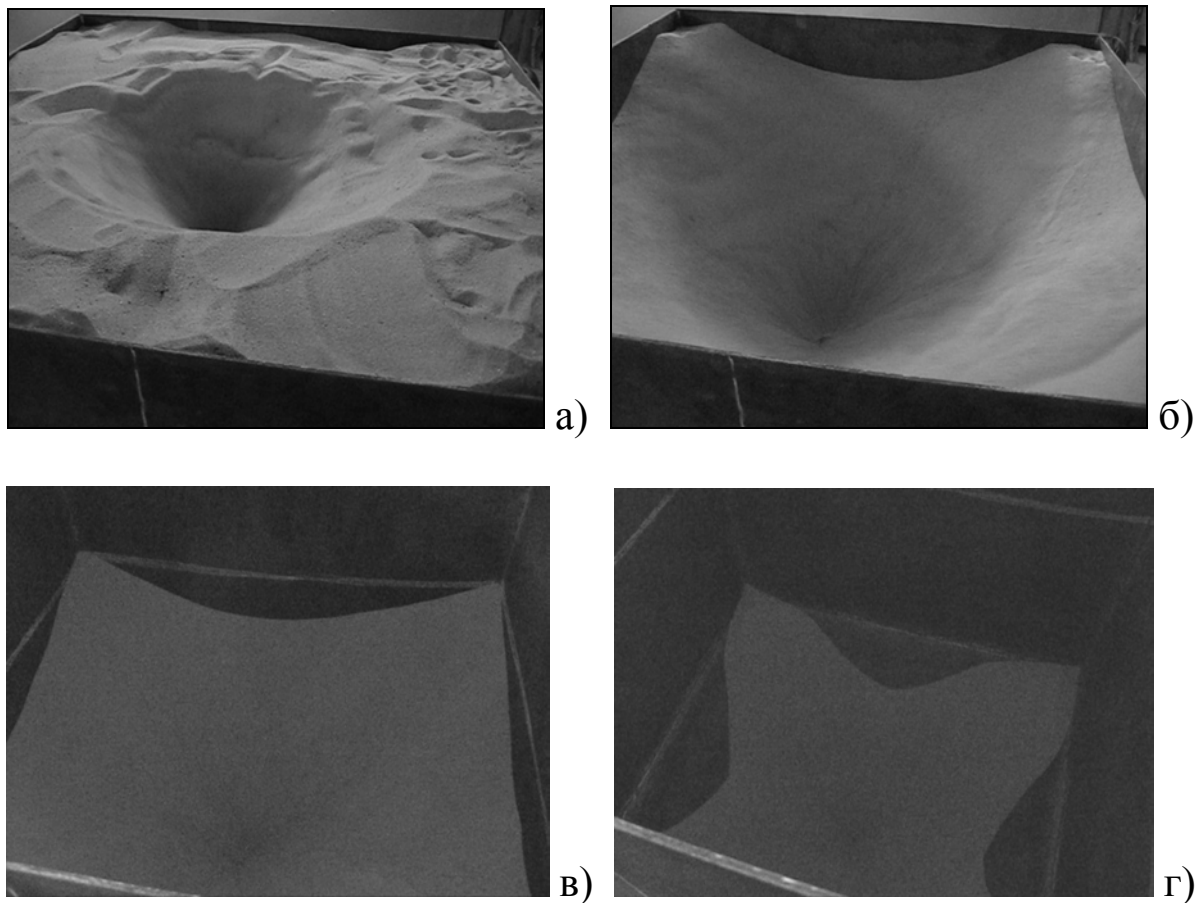


Рис. 3.21. Записи динамічного процесу розвантаження ємності № 1

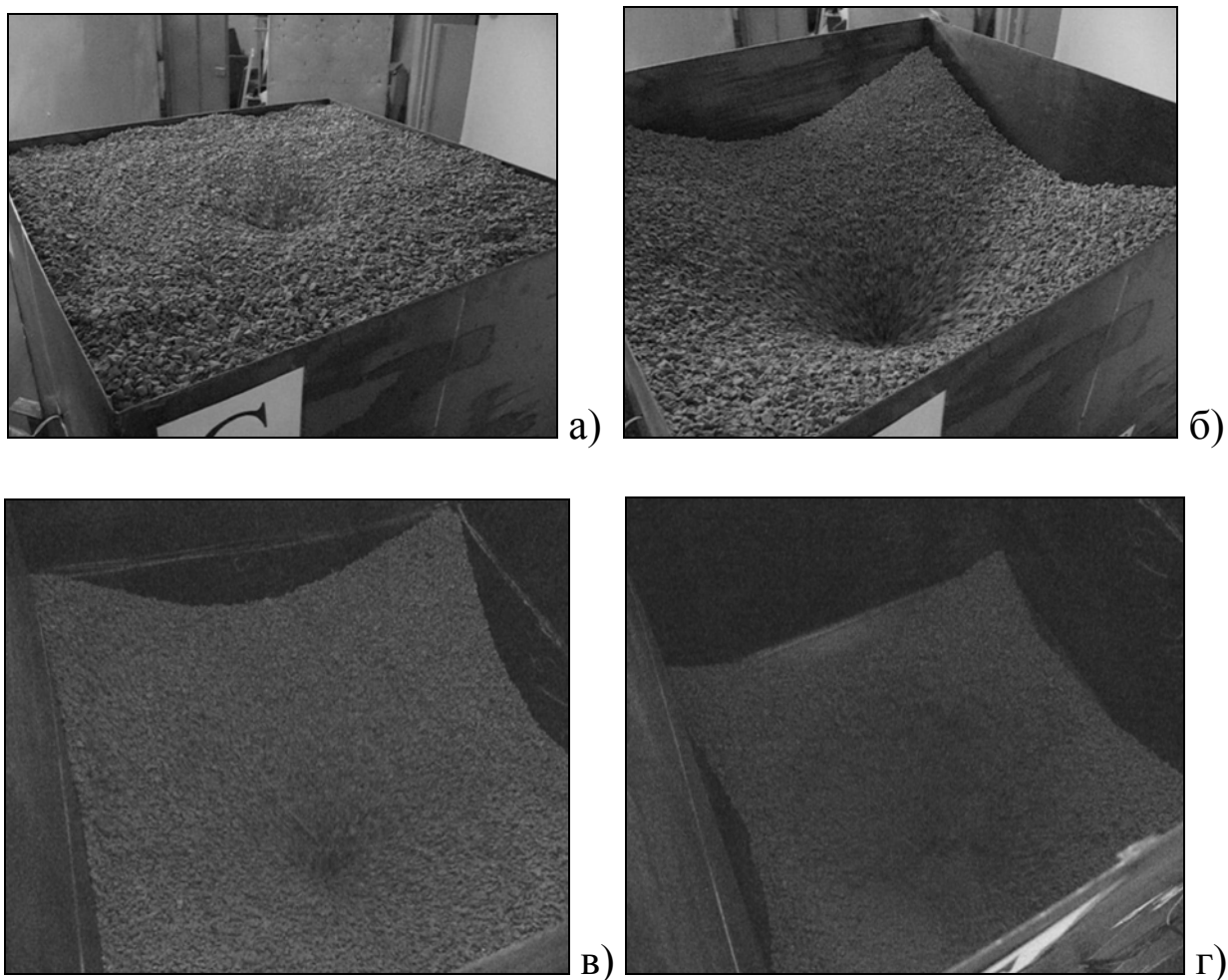
Фотографії, зроблені в різні моменти розвантаження з ємності № 1 для різних сипучих матеріалів, представлені на рис. 3.22 – 3.24.

На рис. 3.21 канали 12, 13 відповідають центральній зоні верхньої вертикальної частини ємності, де спостерігається розтягання на зовнішній поверхні листа, канал 21 відповідає зоні стикування верхньої і нижньої частин ємності в центральній частині, яка виявляється стислою. Аналогічно на рис. 3.21 канали 81 - 83 відповідають кутовій зоні верхньої частини ємності, а канал 73 - кутовій зоні в місці стикування двох частин ємності. У обох випадках спостерігається стискаючі напруження, які в процесі розвантаження міняють знак. Канали 91 - 92 відповідають кутовій зоні нижньої воронкоподібної частини ємності, яка також виявляється стиснутою. Вказані особливості розподілу НДС в сталевих конструкціях ємностей досліджувалися і описані автором достатньо детально у ряді його ранніх робіт [2].



**Рис. 3.22. Характер розвантаження піску в моменти часу:**

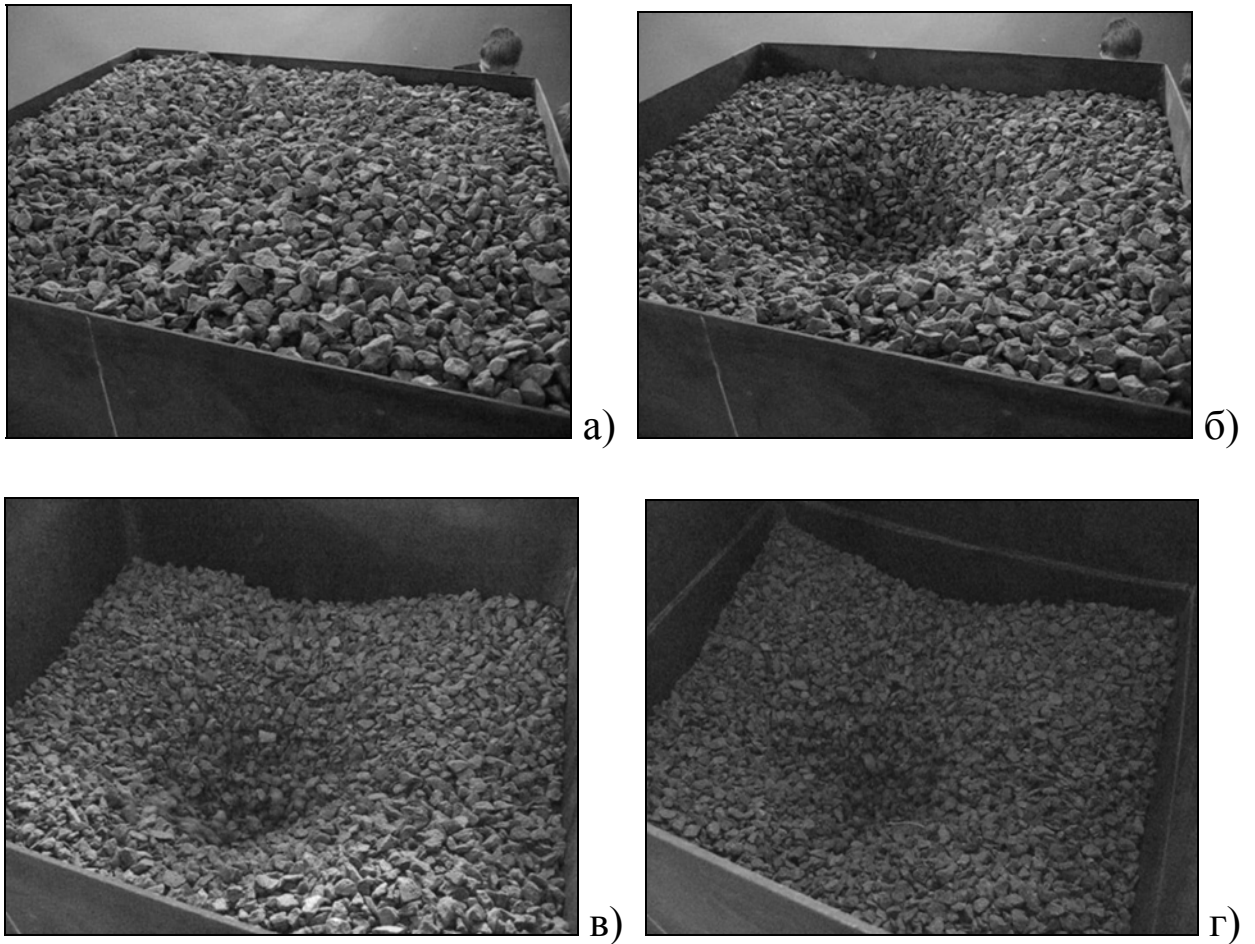
а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 40 с



**Рис. 3.23. Характер розвантаження мармурової крихти в моменти часу:  
а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 50 с**

В ході аналізу отриманих динамічних записів процесу розвантаження (див. рис. 5.21) було встановлено, що даний процес протікає в 3 стадії.

На першій стадії, що триває перші 1 - 3 с з моменту початку розвантаження спостерігається різке стрибкоподібне підвищення тиску. При цьому воно перевищувало теоретичне в 1,68 разів для піску, 1,54 разу для мармурової крихти і 1,35 разу для щебеня. Ці величини достатньо точно узгоджуються з теоретичними даними, отриманими автором у ряді його попередніх досліджень. Вказана стадія виділена на рис. 5.21 більш темним кольором.



**Рис. 3.24. Характер розвантаження  
щебеня в моменти часу:**

а) 3 с, б) 10 с, в) 30 с, г) 60 с

Як вже зазначалось раніше, основною причиною такого підвищення тиску сипучого матеріалу, на думку автора, є зміна структурної схеми взаємного розташування його зерен у момент початку розвантаження, що веде до зміни сил тертя між сусідніми зернами. У свою чергу це приводить до стрибкоподібного підвищення значення коефіцієнта бокового тиску матеріалу на стінки конструкції ємності. Даний результат, отриманий автором в його теоретичній роботі, знайшов достатньо виразне підтвердження в ході проведених експериментальних досліджень.

Другий етап процесу розвантаження характеризується поступовим зниженням величини тиску. Його тривалість коливається в межах 10 - 50 % всього часу розвантаження залежно від сипучого матеріалу, а точніше розміру його зерен. На рис. 3.21 дана стадія виділена сірим кольором.

Для третього етапу розвантаження характерне інтенсивніше падіння бокового тиску сипучого матеріалу аж до нуля, обумовлене значним спорожненням конструкцій. На рис. 3.21 дана стадія виділена світло-сірим кольором.

В процесі розвантаження ні в одній з областей конструкції (ні по одному з каналів) не було зафіксовано повторне збільшення тиску проти отриманого на першому етапі розвантаження. Це дозволяє стверджувати, що найбільш небезпечним є момент початку вивантаження сипучих матеріалів з ємності, а тиск, що виникає при цьому, є найбільшим для всіх режимів роботи конструкцій, включаючи і статичний.

У всіх трьох випадках різних сипучих матеріалів розвантаження відбувалося достатньо однотипно з утворенням в центрі ємності воронки, що досить добре узгоджується з якісним описом форм витіку матеріалів, приведеним в роботах [54 - 57]. Проте, поява пульсацій, що передбачалася в цих же роботах, при витіку грубозернистих матеріалів, якими в проведених експериментальних дослідженнях були мармурова крихта і щебінь, зафіксовано не було. Це вимагає внесення ряду уточнень до існуючих моделей цих авторів і, можливо, їх коректувань.

Якісний характер розвантаження різних сипучих матеріалів досить детально проілюстрований на рис. 3.22 – 3.24. З них зокрема слідує, що із зменшенням розміру зерна матеріалу швидкість і інтенсивність вивантаження зростають. Причому така закономірність має місце і для грубозернистих матеріалів. Разом з тим, згідно роботі [57] тривалість вивантаження для них не залежить від розміру їх зерна, що не узгоджується з виконаними вимірюваннями. У табл. 3.4 представлено зіставлення часу витіку для різних випадків проведеного експерименту з теоретичними даними, розрахованими згідно вказівок роботи [57].

Як видно з цієї таблиці в ході експерименту була зафіксована тенденція, протилежна теоретичної. Більшому куту нахилу граней випускної частини ємності відповідав більший час розвантаження ємності (об'єми ємностей відрізнялися приблизно на 10 %).

**Час розвантаження сипучих матеріалів, с**

№ п/п	Матеріал	Ємність	Теоретичний час, відповідно до роботи [57]	Експериментальний час
1.	Пісок	№ 1	33	46
		№ 2	37	38
2.	Мармурова крихта	№ 1	61	71
		№ 2	69	56
3.	Щебінь	№ 1	61	93
		№ 2	69	72

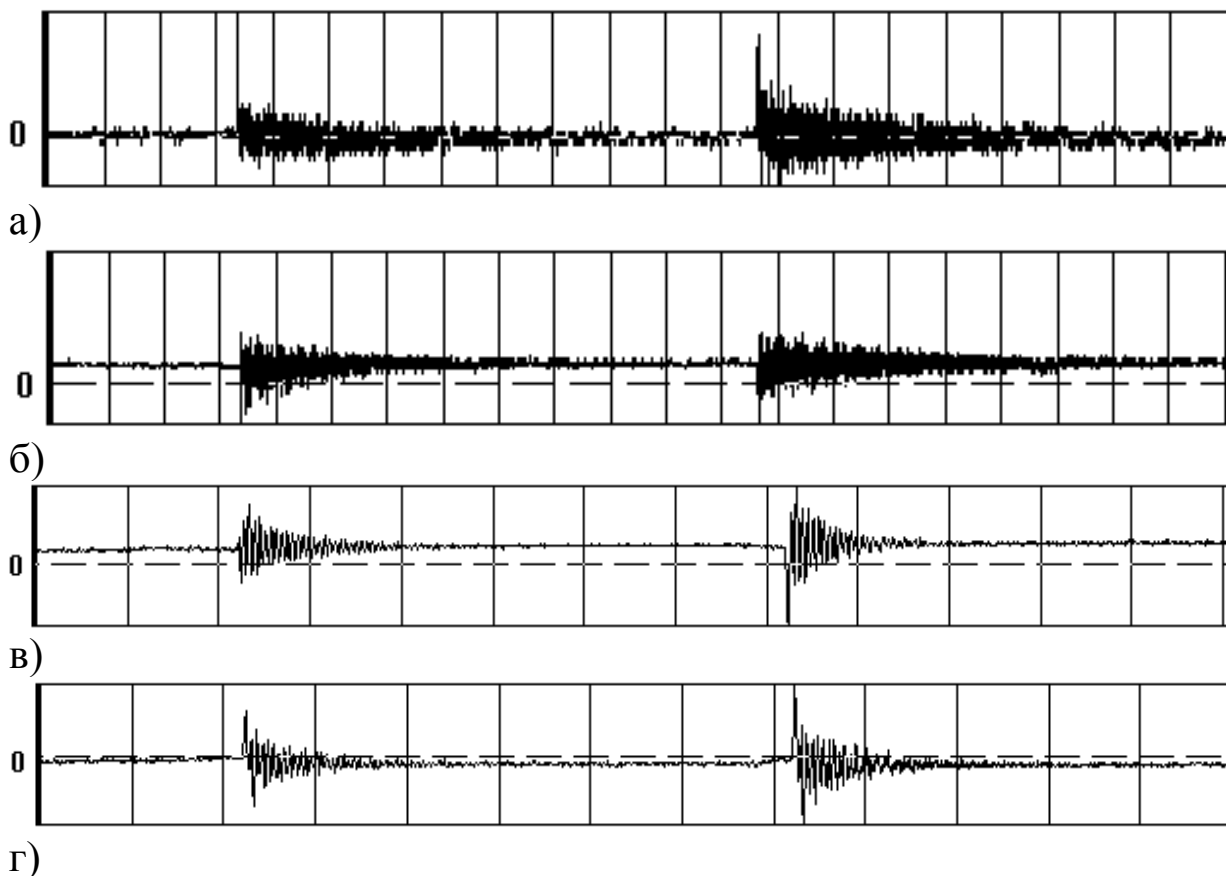
Таким чином, розроблена авторська дискретно-континуальна модель поведінки сипучої середи в замкненому сосуді, а зокрема, питання про безпеку стадії початку вивантаження сипучого матеріалу знайшла своє підтвердження в ході проведених експериментальних досліджень.

**3.2.5.3. Результати динамічних випробувань**

В ході виконаних експериментальних досліджень збудження власних коливань ємнісних конструкцій виконувалось для всіх випадків ударним типом в середню зону верхньої та нижньої частин ємностей. Отримані характерні фрагменти записів динамічних процесів порожніх ємнісних конструкцій для тензодатчиків розеток, розташованих в цих зонах, наведені на рис. 3.25. По горизонтальній вісі відкладено час із кроком сітки 1 с, а по вертикальній вісі – амплітуда напружень у відносних одиницях.

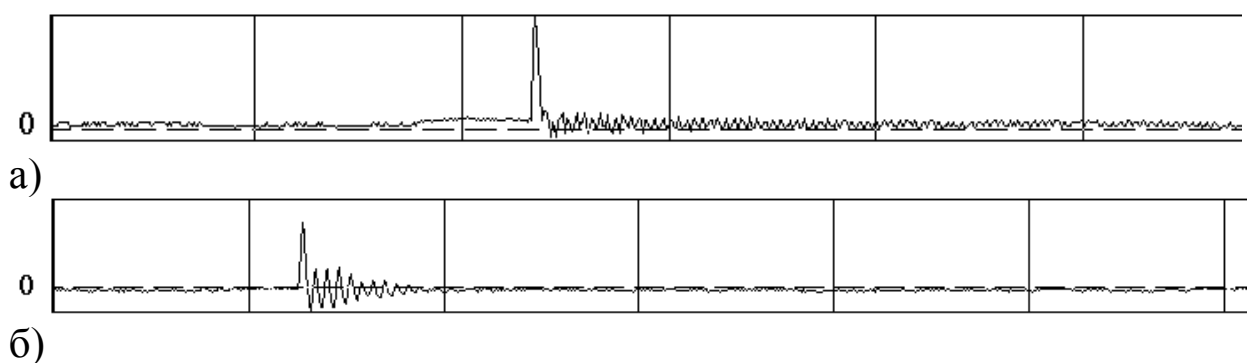
На рис. 3.26 приведено аналогічні фрагменти записів динамічних процесів для заповнених на одну третину ємнісних конструкцій (позначення аналогічні рис. 3.25).

На рис. 3.27 і 3.28 приведені результати математичної обробки записів, виконаних за допомогою відомого перетворення Фур'є [122 – 125]. Вони являють собою амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) для верхньої та нижньої частин ємностей. По горизонтальній вісі відкладено частоти коливань в Гц, по вертикальній – їх амплітудні значення у відносних одиницях. В табл. 3.5 наведені значення власних частот, отриманих за результатами такої математичної обробки.



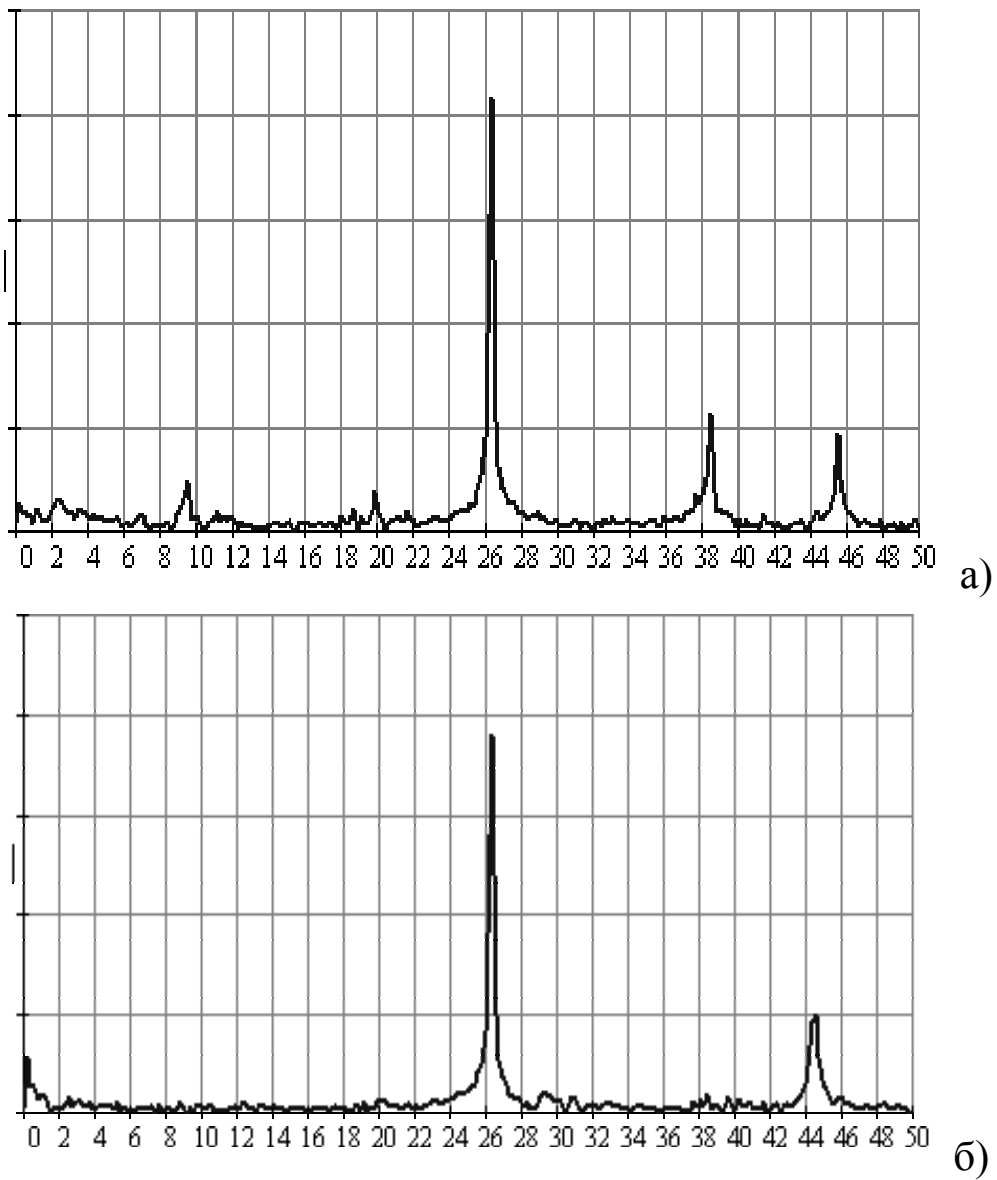
**Рис. 3.25. Фрагменти записів динамічних процесів ударного збудження власних коливань порожніх ємнісних конструкцій:**

а) верхня частина ємності № 1, б) нижня частина ємності № 1, в) верхня частина ємності № 2, г) нижня частина ємності № 2



**Рис. 3.26. Фрагменти записів динамічних процесів ударного збудження власних коливань ємнісних конструкцій, заповнених на третину:**

а) ємність № 1, б) ємність № 2

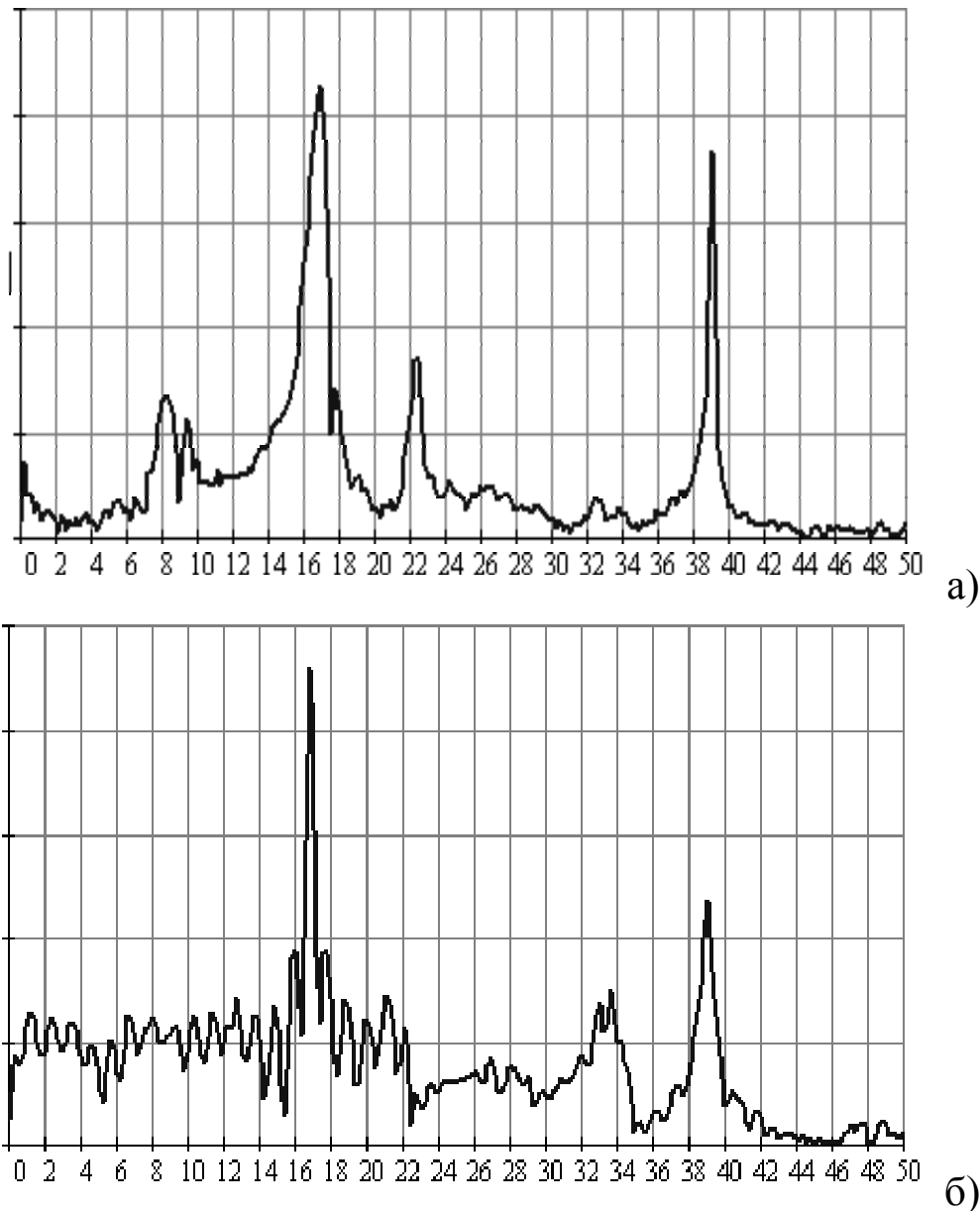


**Рис. 3.27. АЧХ для ємності № 1:**  
 а) верхня частина ємності; б) нижня частина ємності

Таблиця 3.5

**Частотний спектр власних коливань ємностей,  
 отриманий за результатами експерименту**

Частотні піки	Ємність № 1	Ємність №2
1	19,7	8,2
2	26,3	11,2
3	38,5	17,3
4	44,6	22,3
5	-	39,4



**Рис. 3.28. АЧХ для ємності № 2:**

а) верхня частина ємності; б) нижня частина ємності

Замітимо, що невеличкий сплеск на частоті 9 Гц обумовлений вільним обпиранням експериментальних конструкцій на опорних столиках.

З таблиці видно, що частотний спектр у випадку першої ємності є досить розрідженим, а у випадку другої ємності він є більш щільним, що якісно співпадає із результатами чисельного аналізу.

Порівнюючи між собою кількісні результати чисельних розрахунків (за табл. 3.3) та результати проведених експериментальних досліджень можна констатувати досить високий рівень співпадання значень власних частот коливань, а також частотного спект-

ру обох ємностей в цілому як в якісному, так і в кількісному плані. Це свідчить про можливість використання в практичних розрахунках та проектуванні конструкцій ємнісного типу чисельних моделей, розроблених та проаналізованих за допомогою методу скінченних елементів.

Для частково заповнених сипучим матеріалом ємнісних конструкцій навіть при третині загального обсягу затухання збуджених коливань виявилось настільки сильним, що не вдалося побудувати відповідні АЧХ. При більших рівнях заповнення споруд декремент виявився ще більш значним. Це доводить високі дисипативні якості сипучих матеріалів, на які було звернуто увагу в розділі 1 даної монографії. Таким чином, виникають серйозні сумніви до можливості прояву та небезпеки різноманітних динамічних ефектів, пов'язаних із дією сипучих матеріалів.

## Заключні зауваження

В якості заключних зауважень автор монографії хотів би відмітити, що наведені в роботі результати, як і сама представлена на розсуд наукової спільноти авторська теорія поведінки сипучого матеріалу в жорсткому замкненому сосуді типу ємності, не може вважатися завершеною. Вона має можливості для свого подальшого розвитку та поступового вдосконалення, оскільки містить ще купу невизначених питань. Найголовнішими серед них є врахування зв'язності сипучої середи, що дозволить поширити цю теорію на клас ґрунтових матеріалів, а також врахування пластичних особливостей сипучої речовини, що може в ряді випадків суттєво вплинути на достовірність прогнозованих даних.

Однак, автор глибоко впевнений, що запропонована ним теорія не тільки набуде такого подальшого свого розвитку в майбутньому, а й знайде своє безпосереднє та якісне підтвердження вже у сьогоденні, в роботах багатьох сучасних провідних теоретиків механіки сипучої середи.

Насамкінець автор вважає за потрібне навести відповідні посилання на опубліковані ним різноманітні роботи, так чи інакше пов'язані із представленими в даній монографії відомостями – це роботи [126 – 146], які подані у списку використаної літератури до монографії.

## Додаток А.

### Фізико-механічні характеристики сипучих матеріалів

В поданих нижче таблицях наведені основні фізико-механічні характеристики найбільш часто використовуваних сипучих матеріалів, під які розробляються та проектуються ємнісні будівельні конструкції.

В цих таблицях прийняті наступні умовності:

- прочерки означають відсутність даних;
- кут тертя визначається як  $ctg \varphi$ ;
- кут природного укосу  $\chi$  прийнято рівним куту внутрішнього тертя  $\psi$  між зернами сипучого матеріалу.

Таблиця А.1

**Щільність (питома вага), т/м<sup>3</sup>**

№ п/п	Матеріал	[44]	[39], ([43])
1	2	3	4
	<b><u>I. Будівельні</u></b>		
1.	Гіпс кусковий	1,60	1,60
2.	Глина волога и мокра	2,00	-
3.	Глина суха	1,60	1,60
4.	Глинозем	1,25	1,00-1,20
5.	Гравій сухий і мокрий	2,00	2,00
6.	Гранул	-	- (2,20)
7.	Доломіт	-	1,60-2,00
8.	Деревна тирса повітряно-суха	0,25	0,25
9.	Вапняк	1,60	1,60-2,00
10.	Вапно: - гашене в пороші	0,70	0,70
11.	- велике	1,20	-
12.	- дрібне	0,90	-
13.	Камінь	2,00	1,30-2,00
14.	Клінкер цементний	1,60	- (1,60)
15.	Міл роздрібнюваний	1,40	-
16.	Мергель	1,25	-
17.	Пісок, насичений водою	2,00	-
18.	Пісок сухий	1,60	1,60
19.	Пісковик	-	-
20.	Цемент	1,60	1,60
21.	Шлак	1,20	-
22.	Щебінь	2,00	2,00
	<b><u>II. Хімічні</u></b>		
23.	Алюміній фтористий	1,00	0,90-0,95
24.	Амоній фтористий	0,90	-
25.	Апатитовий концентрат	2,00	2,00
26.	Карбід	0,90	-
27.	Карналіт	1,00	-
28.	Кріоліт	1,00	1,20-1,35
29.	Магнезитовий порошок	1,80	-
30.	Нефеліновий концентрат	1,50	1,50
31.	Селітра	1,20	1,20
32.	Сода кальцинована	0,60	0,60

## Продовження таблиці А.1

1	2	3	4
33.	Сульфат амонію	0,90	0,90
34.	Фосфориста мука	1,60	-
	<b><u>III. Вугілля і руди</u></b>		
35.	Агломерат залізняку	2,00	1,60-2,50
36.	Железняк бурий	2,00	-
37.	Железняк червоний	2,60	-
38.	Железняк магнітний	3,40	-
39.	Кокс	0,60	0,50-0,60
40.	Концентрат шихтового відділення аглофабрики	-	-
41.	Руда	-	1,80-3,50
42.	Руда залізна	-	2,00-2,60
43.	Руда магнетитова	-	-
44.	Руда марганцева	2,00	-
45.	Сланец	1,00	1,10
46.	Торф	0,60	-
47.	Вугілля-антрацит	1,00	1,00-1,40
48.	Вугілля буре	0,80	-
49.	Вугілля кам'яне	1,00	1,00-1,50
50.	Вугільний пил нормальної вологості	0,80	0,70
51.	Штейн свинцевий	4,00	-
52.	Штиб вугільний	-	-
	<b><u>IV. Харчові продукти</u></b>		
53.	Зерно	0,80	-
54.	Картопля	0,75	-
55.	Комбікорм гранульований	0,80	-
56.	Комбікорми інші	0,55	-
57.	Крупа	0,80	-
58.	Кукурудза в початках	0,45	-
59.	Мука всіх видів	0,60	-
60.	Висівки всіх видів	0,40	-
61.	Соняшник	0,55	-
62.	Цукор-пісок	1,00	-
63.	Насіння боби	0,80	-

Таблиця А.2

## Кут природного укосу, °

№ п/п	Матеріал	[44]	[39], ([43])
1	2	3	4
<b><u>I. Будівельні</u></b>			
1.	Гіпс кусковий	35	30-39
2.	Глина волога и мокра	20	-
3.	Глина суха	30	40-45
4.	Глинозем	30	28-29
5.	Гравій сухий і мокрий	30	26-45
6.	Гранул	-	-
7.	Доломіт	-	-
8.	Деревна тирса повітряно-суха	35	31-56
9.	Вапняк	35	29-51
10.	Вапно: - гашене в пороші	35	-
11.	- велике	35	-
12.	- дрібне	35	-
13.	Камінь	30	20
14.	Клінкер цементний	30	29-33
15.	Міл роздрібнюваний	40	-
16.	Мергель	30	-
17.	Пісок, насичений водою	20	-
18.	Пісок сухий	30	30-40
19.	Пісковик	-	-
20.	Цемент	30	27-40
21.	Шлак	30	-
22.	Щебінь	30	40-45
<b><u>II. Хімічні</u></b>			
23.	Алюміній фтористий	35	27-36
24.	Амоній фтористий	30	-
25.	Апатитовий концентрат	40	31-33
26.	Карбід	30	-
27.	Карналіт	35	-
28.	Кріоліт	35	28-48
29.	Магнезитовий порошок	35	-
30.	Нефеліновий концентрат	35	31-40
31.	Селітра	40	38-40
32.	Сода кальцинована	40	35-45

## Продовження таблиці А.2

1	2	3	4
33.	Сульфат амонію	40	40
34.	Фосфориста мука	40	-
	<b><u>III. Вугілля і руди</u></b>		
35.	Агломерат залізняку	40	45
36.	Железняк бурий	40	-
37.	Железняк червоний	40	-
38.	Железняк магнітний	40	-
39.	Кокс	40	28-51
40.	Концентрат шихтового відділення аглофабрики	-	-
41.	Руда	-	30-41
42.	Руда залізна	-	35-37
43.	Руда магнетитова	-	-
44.	Руда марганцева	40	-
45.	Сланец	35	-
46.	Торф	35	-
47.	Вугілля-антрацит	35	35
48.	Вугілля буре	35	-
49.	Вугілля кам'яне	35	27-45
50.	Вугільний пил нормальної вологості	25	-
51.	Штейн свинцевий	40	-
52.	Штиб вугільний	-	34-44
	<b><u>IV. Харчові продукти</u></b>		
53.	Зерно	25	-
54.	Картопля	30	-
55.	Комбікорм гранульований	25	-
56.	Комбікорми інші	30	-
57.	Крупа	25	-
58.	Кукурудза в початках	30	-
59.	Мука всіх видів	40	-
60.	Висівки всіх видів	40	-
61.	Соняшник	30	-
62.	Цукор-пісок	35	-
63.	Насіння боби	25	-

**Коефіцієнт зовнішнього тертя по сталі**

№ п/п	Матеріал	[44]	[39], ([43])
1	2	3	4
	<b><u>I. Будівельні</u></b>		
1.	Гіпс кусковий	0,30	0,61-0,78
2.	Глина волога и мокра	0,20	-
3.	Глина суха	0,30	-
4.	Глинозем	0,30	0,42-0,54
5.	Гравій сухий і мокрий	0,50	0,58-1,00
6.	Гранул	-	0,40-0,42
7.	Доломіт	-	0,46-0,51
8.	Деревна тирса повітряно-суха	0,30	0,39-0,83
9.	Вапняк	0,30	0,30-1,00
10.	Вапно: - гашене в пороші	0,30	0,35
11.	- велике	0,30	-
12.	- дрібне	0,30	-
13.	Камінь	0,50	0,58-0,84
14.	Клінкер цементний	0,30	-
15.	Міл роздрібнюваний	0,30	-
16.	Мергель	0,30	-
17.	Пісок, насичений водою	0,20	-
18.	Пісок сухий	0,30	0,32-0,80
19.	Пісковик	-	0,30-0,59
20.	Цемент	0,30	0,60-0,65
21.	Шлак	0,30	-
22.	Щебінь	0,50	0,47-0,63
	<b><u>II. Хімічні</u></b>		
23.	Алюміній фтористий	0,30	0,58-0,60
24.	Амоній фтористий	0,30	-
25.	Апатитовий концентрат	0,30	0,60
26.	Карбід	0,30	-
27.	Карналіт	0,30	-
28.	Кріоліт	0,30	0,55-0,95
29.	Магнезитовий порошок	0,30	-
30.	Нефеліновий концентрат	0,30	0,30-0,68
31.	Селітра	0,30	-
32.	Сода кальцинована	0,30	0,30-0,70

## Продовження таблиці А.3

1	2	3	4
33.	Сульфат амонію	0,30	-
34.	Фосфориста мука	0,30	-
	<b><u>III. Вугілля і руди</u></b>		
35.	Агломерат залізняку	-	0,45
36.	Железняк бурий	-	-
37.	Железняк червоний	-	-
38.	Железняк магнітний	-	-
39.	Кокс	0,50	0,47-0,53
40.	Концентрат шихтового відділення аглофабрики	-	0,89
41.	Руда	-	0,57-0,84
42.	Руда залізна	-	0,50-1,00
43.	Руда магнетитова	-	0,46
44.	Руда марганцева	-	-
45.	Сланец	0,30	0,35-0,58
46.	Торф	0,50	-
47.	Вугілля-антрацит	0,30	0,40-0,80
48.	Вугілля буре	0,30	-
49.	Вугілля кам'яне	0,30	0,30-0,80
50.	Вугільний пил нормальної вологості	-	0,32-0,77
51.	Штейн свинцевий	-	-
52.	Штиб вугільний	-	0,30 (-)
	<b><u>IV. Харчові продукти</u></b>		
53.	Зерно	0,40	-
54.	Картопля	-	-
55.	Комбікорм гранульований	0,40	-
56.	Комбікорми інші	0,40	-
57.	Крупа	0,40	-
58.	Кукурудза в початках	0,40	-
59.	Мука всіх видів	0,30	-
60.	Висівки всіх видів	0,30	-
61.	Соняшник	0,40	-
62.	Цукор-пісок	-	-
63.	Насіння боби	0,40	-

## **Додаток Б.**

### **Результати експериментальних досліджень**

В поданих нижче таблицях наведені основні результати статичних експериментальних досліджень на малорозмірних ємнісних конструкціях для різних типів сипучих матеріалів при повному завантаженні споруд. Значення напружень наведені в МПа, значення прогинів в мм.

Наведено співставлення отриманих експериментальних результатів із розробленою авторською теоретичною моделлю поведінки сипучого матеріалу в ємнісній конструкції, а також із офіційно прийнятим підходом згідно існуючих в Україні нормативних документів.

## Завантаження піском ємності № 1

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	29,4	28,2	4,08
	третє	20,2	16,0	20,79
2.	перше	-9,8	-6,7	31,63
	третє	-24,8	-18,5	25,40
3.	перше	-7,6	-3,3	56,58
	третє	-13,9	-13,4	3,60
4.	перше	30,3	36,0	18,81
	третє	22,6	21,2	6,19
5.	перше	14,3	7,9	44,76
	третє	4,4	-2,3	152,27
6.	перше	-10,6	-6,9	34,91
	третє	-21,8	-17,7	18,81
7.	перше	-10,4	-5,2	50,00
	третє	-14,2	-7,1	50,00
8.	перше	-13,6	-19,3	41,91
	третє	-42,9	-41,8	2,56
9.	перше	29,4	26,7	9,18
	третє	20,2	19,4	3,96
10.	перше	30,3	33,8	11,55
	третє	22,6	25,5	12,83

Таблиця Б.2

**Завантаження мармуровою крихтою ємності № 1**

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	24,2	24,4	0,83
	третє	18,2	15,7	13,74
2.	перше	-5,8	-4,0	31,03
	третє	-14,8	-15,0	1,35
3.	перше	-3,6	-0,5	86,11
	третє	-10,9	-8,7	20,18
4.	перше	25,1	24,1	3,98
	третє	19,2	21,3	10,94
5.	перше	9,1	0,2	97,80
	третє	0,7	-2,2	414,29
6.	перше	-5,8	-4,7	18,97
	третє	-14,2	-12,8	9,86
7.	перше	-7,7	-3,9	49,35
	третє	-1,2	-5,4	350,00
8.	перше	-16,2	-20,8	28,40
	третє	-44,5	-42,1	5,39
9.	перше	24,2	20,3	16,12
	третє	18,2	18,8	3,30
10.	перше	25,1	24,0	4,38
	третє	19,2	22,7	18,23

## Завантаження щебенем ємності № 1

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	20,9	22,3	6,70
	третє	14,1	13,5	4,26
2.	перше	-3,8	-3,7	2,63
	третє	-12,4	-13,3	7,26
3.	перше	-1,3	0,0	100,00
	третє	-9,7	-10,4	7,22
4.	перше	22,1	21,7	1,81
	третє	15,8	15,0	5,06
5.	перше	6,2	3,9	37,10
	третє	-5,2	-2,3	55,77
6.	перше	-2,9	-3,7	27,59
	третє	-12,5	-12,5	0,00
7.	перше	-3,7	-1,7	54,05
	третє	-2,5	-5,5	120,00
8.	перше	-13,6	-13,8	1,47
	третє	-40,2	-43,8	8,96
9.	перше	20,9	17,5	16,27
	третє	14,1	16,5	17,02
10.	перше	22,1	20,4	7,69
	третє	15,8	15,2	3,80

Таблиця Б.4

## Завантаження піском ємності № 2

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	45,4	43,9	3,30
	третє	36,7	36,1	1,63
2.	перше	-14,4	-6,2	56,94
	третє	-35,1	-25,4	27,64
3.	перше	-12,9	-14,5	12,40
	третє	-28,8	-21,7	24,65
4.	перше	39,6	30,0	24,24
	третє	31,2	26,8	14,10
5.	перше	18,9	13,7	27,51
	третє	2,3	-6,7	391,30
6.	перше	-22,2	-25,8	16,22
	третє	-33,3	-38,5	15,62
7.	перше	-4,2	-5,0	19,05
	третє	-10,6	-6,2	41,51
8.	перше	-17,4	-22,0	26,44
	третє	-37,9	-43,4	14,51
9.	перше	45,4	42,0	7,49
	третє	36,7	31,4	14,44
10.	перше	39,6	40,7	2,78
	третє	31,2	33,8	8,33

Таблиця Б.5

**Завантаження мармуровою крихтою ємності № 2**

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	39,8	34,4	13,57
	третє	31,2	33,7	8,01
2.	перше	-10,2	-4,0	60,78
	третє	-29,7	-15,0	49,49
3.	перше	-6,5	-3,5	46,15
	третє	-21,4	-28,7	34,11
4.	перше	32,2	34,1	5,90
	третє	25,6	22,2	13,28
5.	перше	12,4	7,2	41,94
	третє	3,4	-2,2	164,71
6.	перше	-17,1	-14,7	14,04
	третє	-25,2	-22,8	9,52
7.	перше	-1,2	-3,9	225,00
	третє	-6,3	-5,4	14,29
8.	перше	-14,3	-20,8	45,45
	третє	-32,5	-32,1	1,23
9.	перше	39,8	32,3	18,84
	третє	31,2	30,8	1,28
10.	перше	32,2	34,0	5,59
	третє	25,6	27,7	8,20

Таблиця Б.6

## Завантаження щебенем ємності № 2

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	33,2	35,0	5,42
	третє	25,5	23,2	9,02
2.	перше	-8,4	-3,5	58,33
	третє	-21,4	-12,9	39,72
3.	перше	-5,6	-2,1	62,50
	третє	-17,3	-11,4	34,10
4.	перше	27,7	24,2	12,64
	третє	22,7	22,6	0,44
5.	перше	8,5	2,5	70,59
	третє	1,1	-5,7	618,18
6.	перше	-11,7	-15,7	34,19
	третє	-20,5	-15,4	24,88
7.	перше	-3,3	-3,6	9,09
	третє	-2,8	-5,8	107,14
8.	перше	-10,2	-14,7	44,12
	третє	-25,7	-29,5	14,79
9.	перше	33,2	30,9	6,93
	третє	25,5	30,3	18,82
10.	перше	27,7	30,0	8,30
	третє	22,7	23,9	5,29

## Значення прогинів для ємності № 1

Сипучий матеріал	Значення прогинів		Розбіжність, %
	для прогиноміру ПР1 за даними		
	комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
пісок	0,53	0,50	5,66
мармурова крихта	0,80	0,86	7,50
щебень	0,40	0,41	2,50
	для прогиноміру ПР2 за даними		
	комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
пісок	0,70	0,67	4,29
мармурова крихта	0,92	0,99	7,61
щебень	0,50	0,48	4,00

## Значення прогинів для ємності № 2

Сипучий матеріал	Значення прогинів		Розбіжність, %
	для прогиноміру ПР1 за даними		
	комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
пісок	2,24	2,11	5,80
мармурова крихта	1,47	1,50	2,04
щебень	0,81	0,71	12,35
	для прогиноміру ПР2 за даними		
	комп'ютерного моделювання (авторська модель)	експерименту (авторська модель)	
пісок	1,58	1,52	3,80
мармурова крихта	1,15	1,12	2,61
щебень	0,55	0,47	14,55

## Завантаження піском ємності № 1

Розетка тензодатчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	7,0	28,2	302,86
	третє	6,2	16,0	158,06
2.	перше	-4,5	-6,7	48,89
	третє	-15,1	-18,5	22,52
3.	перше	-1,8	-3,3	83,33
	третє	-11,6	-13,4	15,52
4.	перше	15,5	36,0	132,26
	третє	14,3	21,2	48,25
5.	перше	6,2	7,9	27,42
	третє	-1,3	-2,3	76,92
6.	перше	-3,8	-6,9	81,58
	третє	-10,8	-17,7	63,89
7.	перше	0,1	-5,2	-
	третє	-0,9	-7,1	688,89
8.	перше	-7,5	-19,3	157,33
	третє	-26,1	-41,8	60,15
9.	перше	7,0	26,7	281,43
	третє	6,2	19,4	212,90
10.	перше	15,5	33,8	118,06
	третє	14,3	25,5	78,32

Таблиця Б.10

**Завантаження мармуровою крихтою ємності № 1**

Розетка тензо-датчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	9,3	24,4	162,37
	третє	8,2	15,7	91,46
2.	перше	-4,6	-4,0	13,04
	третє	-18,3	-15,0	18,03
3.	перше	-2,3	-0,5	78,26
	третє	-14,5	-8,7	40,00
4.	перше	17,4	24,1	38,51
	третє	16,7	21,3	27,54
5.	перше	6,5	0,2	96,92
	третє	-1,5	-2,2	46,67
6.	перше	-4,4	-4,7	6,82
	третє	-14,0	-12,8	8,57
7.	перше	0,2	-3,9	-
	третє	-1,2	-5,4	350,00
8.	перше	-7,7	-20,8	170,13
	третє	-19,7	-42,1	113,71
9.	перше	9,3	20,3	118,28
	третє	8,2	18,8	129,27
10.	перше	17,4	24,0	37,93
	третє	16,7	22,7	35,93

## Завантаження щебенем ємності № 1

Розетка тензо-датчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	5,6	22,3	298,21
	третє	5,5	13,5	145,45
2.	перше	-4,4	-3,7	15,91
	третє	-15,8	-13,3	15,82
3.	перше	-1,4	0,0	100,00
	третє	-11,1	-10,4	6,31
4.	перше	17,4	21,7	24,71
	третє	16,3	15,0	7,98
5.	перше	5,2	3,9	25,00
	третє	-2,3	-2,3	0,00
6.	перше	-2,9	-3,7	27,59
	третє	-8,7	-12,5	43,68
7.	перше	0,2	-1,7	950,00
	третє	-1,0	-5,5	450,00
8.	перше	-8,9	-13,8	55,06
	третє	-30,1	-43,8	45,51
9.	перше	5,6	17,5	212,50
	третє	5,5	16,5	200,00
10.	перше	17,4	20,4	17,24
	третє	16,3	15,2	6,75

Таблиця Б.12

## Завантаження піском ємності № 2

Розетка тензо- датчи- ків	Вид головного напру- ження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	29,1	43,9	50,86
	третє	24,5	36,1	47,35
2.	перше	-19,3	-6,2	67,88
	третє	-63,2	-25,4	59,81
3.	перше	-5,1	-14,5	184,31
	третє	-36,1	-21,7	39,89
4.	перше	59,5	30,0	49,58
	третє	56,6	26,8	52,65
5.	перше	24,0	13,7	42,92
	третє	-8,0	-6,7	16,25
6.	перше	-12,9	-25,8	100,00
	третє	-43,2	-38,5	10,88
7.	перше	0,7	-5,0	814,29
	третє	-0,9	-6,2	588,89
8.	перше	-28,5	-22,0	22,81
	третє	-71,9	-43,4	39,64
9.	перше	29,1	42,0	44,33
	третє	24,5	31,4	28,16
10.	перше	59,5	40,7	31,60
	третє	56,6	33,8	40,28

**Завантаження мармуровою крихтою ємності № 2**

Розетка тензо- датчи- ків	Вид головного напру- ження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	38,2	34,4	9,95
	третє	31,7	33,7	6,31
2.	перше	-22,4	-4,0	82,14
	третє	-75,5	-15,0	80,13
3.	перше	-7,4	-3,5	52,70
	третє	-46,1	-28,7	37,74
4.	перше	68,6	34,1	50,29
	третє	63,7	22,2	65,15
5.	перше	31,7	7,2	77,29
	третє	-12,7	-2,2	82,68
6.	перше	-16,6	-14,7	11,45
	третє	-56,1	-22,8	59,36
7.	перше	-1,5	-3,9	160,00
	третє	-1,0	-5,4	440,00
8.	перше	-32,2	-20,8	35,40
	третє	-80,8	-32,1	60,27
9.	перше	38,2	32,3	15,45
	третє	31,7	30,8	2,84
10.	перше	68,6	34,0	50,44
	третє	63,7	27,7	56,51

Таблиця Б.14

## Завантаження щебенем ємності № 2

Розетка тензо-датчиків	Вид головного напруження	Напруження по результатах		Розбіжність, %
		комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
1.	перше	23,0	35,0	52,17
	третє	21,2	23,2	9,43
2.	перше	-21,9	-3,5	84,02
	третє	-66,4	-12,9	80,57
3.	перше	-2,8	-2,1	25,00
	третє	-32,9	-11,4	65,35
4.	перше	73,2	24,2	66,94
	третє	62,0	22,6	63,55
5.	перше	32,8	2,5	92,38
	третє	-13,7	-5,7	58,39
6.	перше	-10,8	-15,7	45,37
	третє	-35,8	-15,4	56,98
7.	перше	1,0	-3,6	460,00
	третє	-1,0	-5,8	480,00
8.	перше	-28,8	-14,7	48,96
	третє	-87,0	-29,5	66,09
9.	перше	23,0	30,9	34,35
	третє	21,2	30,3	42,92
10.	перше	73,2	30,0	59,02
	третє	62,0	23,9	61,45

## Значення прогинів для ємності № 1

Сипучий матеріал	Значення прогинів		Розбіжність, %
	для прогиноміру ПР1 за даними		
	комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
пісок	0,57	0,50	12,28
мармурова крихта	0,76	0,86	13,16
щебень	0,49	0,41	16,33
	для прогиноміру ПР2 за даними		
	комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
пісок	0,49	0,67	36,73
мармурова крихта	0,47	0,99	110,64
щебень	0,51	0,48	5,88

## Значення прогинів для ємності № 2

Сипучий матеріал	Значення прогинів		Розбіжність, %
	для прогиноміру ПР1 за даними		
	комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
пісок	3,65	2,11	42,19
мармурова крихта	4,21	1,50	64,37
щебень	4,01	0,71	82,29
	для прогиноміру ПР2 за даними		
	комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)		
	комп'ютерного моделювання (офіційний підхід)	експерименту (авторська модель)	
пісок	2,66	1,52	42,86
мармурова крихта	3,02	1,12	62,91
щебень	3,33	0,47	85,89

## Список використаної літератури

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 обогатительных фабрик / Под ред. К. А. Михайлова. – М.: Госстойиздат, 1962. – 197 с.
11. Лурье З. С. Бункерные устройства углеобогатительных 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 восьмиосного 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. Кантарович З. Б. Расчёт подвесных железных бункеров / З. Б. Кантарович. М. -Л.: ОНТИ, 1932. - 42 с.
37. 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.
38. Сооружения промышленных предприятий: СНиП 2.09.03-85. – [Чинний від 1987-01.01]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. – 56 с.
39. Руководство по расчету и проектированию железобетонных, стальных и комбинированных бункеров / Ленпромстройпроект. – М.: Стройиздат, 1983. – 200 с.

40. Лессиг Е. И. Листовые металлические конструкции / Е. И. Лессиг, А. Ф. Лилеев, А. Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.
41. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. А. П. Величкина, В. Ш. Козлова. – К.: Будівельник, 1973. – 552 с.
42. Справочник проектировщика. Металлические конструкции / Под ред. Н. П. Мельникова. – [2-е изд.] – М.: Стройиздат, 1980. – 776 с.
43. Справочник проектировщика инженерных сооружений / Под ред. Д. А. Коршунова. – К.: Будівельник, 1988. – 352 с.
44. 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.
45. 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.
46. Металлические конструкции: [учебн. для вузов] / Под общ. ред. Е. И. Беленя. – [5-е изд.]. – М.: Стройиздат, 1976. – 600 с.
47. Ягофаров Х. Основы теории проектирования листовых металлических конструкций. Пирамидально-призматический бункер / Х. Ягофаров, Н. Н. Собакин. – Екатеринбург: УрГУПС, 2006. – 234 с.
48. Design of steel structures. Part 4: Tanks, silos and pipelines: prEN 1993-4. Eurocode 3. - CEN, 2001.
49. Structural Engineering Handbook / Edited by Edwin H. Gaylord, Jr., Charles N. Gaylord, James E. Stallmeyer. – [4<sup>th</sup> ed]. - McGraw-Hill, 1997. – 624 p.
50. ESDEP WG: Vol. 15: Structural Systems. Bins: Lecture 15C.2. – 31 p.
51. Прокофьев И. П. Давление сыпучего тела и расчет подпорных стенок / И. П. Прокофьев. – М.: Изд-во строит. лит-ры, 1947. – 144 с.
52. Соколовский В. В. Статика сыпучей среды / В. В. Соколовский. - М.: Физматгиз, 1960. - 243 с.
53. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Расчетно-теоретический / Под ред. А. А. Уманского. – М.: Гос. изд-во по стро-ву, арх-ре и строит. матер., 1960. – 1040 с.
54. Терцаги К. Теория механики грунтов. / Под ред. Н. А. Цытовича; пер. с нем. - М.: Госстройиздат, 1961. – 507 с.

55. Чеботарёв Г. П. Механика грунтов. Основания и земляные сооружения / Г. П. Чеботарев. - М.: Стройиздат, 1968. - 616 с.
56. Клейн Г. К. Строительная механика сыпучих тел / Г. К. Клейн. - М.: Стройиздат, 1977. - 256 с.
57. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. - Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 1992. - 312 с.
58. Janssen H. A. Versuche uber getreidedruck in Silozellen / H. A. Janssen // Z.D. VDI, 1895. - № 35. - p. 1045 - 1049.
59. Edwin H. Gaylord. Design of steel Bins for storage of Bulk Solids / H. Gaylord Edwin, Gaylord. Jr., Charles N. - McGraw-Hill, 2000. - 278 p.
60. Reisner W. Bins and bunkers for handling bulk materials. Practical design ant techniques / W. Reisner. - McGraw-Hill, 2000. - 324 p.
61. Safarian S. S. Design and Construction of Silos and Bunkers / S. S. Safarian, E. C. Harris. - McGraw-Hill, 2000. - 212 p.
62. Решетнев Е. К. Истечение сыпучих материалов из бункеров закладочных комплексов / Е. К. Решетнев. - М.: Наука, 1987. - 119 с.
63. 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.
64. Давидсон В. Е. "Сверхтекучесть" сыпучих тел / В. Е. Давидсон // Наука и жизнь, 1988. - № 10. - С. 155 - 156.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. 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.

69. 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.
70. 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.
71. Денисов В. В. Совершенствование складирования и выпуска из бункеров сводообразующих компонентов комбикорма: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / В. В. Денисов. – Саратов, 2001. – 25 с.
72. Кожевников В. А. Совершенствование процесса истечения трудносыпучих материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / В. А. Кожевников. – Самара, 2005. – 16 с.
73. Комченко Е. В. Совершенствование процесса истечения мелких сыпучих материалов из бункеров сельскохозяйственного назначения: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / Е. В. Комченко. – Ростов-на-Дону, 2004. – 22 с.
74. Гуцин В. М. Течение сыпучих материалов на участке их ввода в пневмотранспортный трубопровод / В. М. Гуцин // Наукові праці: сер. Гірничо-електромеханічна. – Донецьк, 2002. – Вип. 51. – С. 75 – 79.
75. Пахайло А. И. Оптимизация параметров сельскохозяйственных бункерных устройств в условиях сводообразования сыпучих материалов: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.20.01. / А. И. Пахайло. – Зернорад, 1991. – 16 с.
76. Магула В. Э. Статика гибких стенок под давлением несвязной сыпучей среды / В. Э. Магула, А. Д. Москаленко // Строительная механика и расчёт сооружений, 1970. - № 4. - С. 5 - 9.
77. Харабет А. Н. Нечеткий подход к моделированию сыпучих материалов / А. Н. Харабет // Науковий вісник ОДПУ: Гуманітарні науки. Природознавчі науки. Технічні науки. – Одеса, 1999. - № 7. – С. 112 – 116.
78. Шиниги Йу, Т. Джотака. Экспериментальные исследования статического давления в бункерах / Пер. с англ. статьи Shinichi Yui, T. Jotaki. Experimental analysis of static pressure in bins. Журн. Chemical Engineering Science, 1979. – Vol. 34. - № 7. – P. 913 – 918.

79. 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.
80. Богомягких В. А. Теория и расчет бункеров для сыпучих материалов / В. А. Богомягких. – Ростов-на-Дону: изд-во РГУ, 1974. – 149 с.
81. Гячев Л. В. Основы теории бункеров / Л. В. Гячев. – Новосибирск: изд-во НГУ, 1992. – 312 с.
82. 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.
83. 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.
84. 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. – Зернорад, 2001. – 19 с.
85. 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.
86. 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.
87. 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.
88. Семенов В. Ф. Бункеры и хранилища зерна: [учеб. пособие для студ. вузов] / В. Ф. Семенов. – Барнаул: изд-во АлтГТУ, 1999. – 221 с.

89. Капитонов Е. Н. Бункеры и затворы: [учеб. пособие для студ. вузов] / Е. И. Капитонов. – Тамбов: изд-во ТГТУ, 1994. – 113 с.
90. Швец В. Б. Справочник по механике и динамике грунтов / В. Б. Швец, Л. К. Глинзбург, В. М. Гольдштейн, В. К. Капустин, В. И. Феклин, Н. С. Швец / Под ред. В. Б. Швеца. – К.: Будівельник, 1987. – 232 с.
91. Барбас И. Г. Ударное нагружение кузовов транспортных средств сыпучим грузом / Сб. научн. трудов ДИИТа. – Днепропетровск: ДИИТ, 1984. – Вып. 205/26. - С. 93 – 96.
92. Барбас И. Г. О применении физического моделирования к исследованию ударного нагружения думпкаров / И. Г. Барбас, Ю. Г. Курсов, Е. Н. Вавилов, А. И. Логинов, Н. П. Островерхов, В. И. Панасенко // Сб. научн. трудов ДИИТа. – Днепропетровск: ДИИТ, 1977. – Вып. 190/23. - С. 93 – 95.
93. 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.
94. Стальные конструкции. Нормы проектирования: СНиП II-23-81\*. – [Чинний від 1983-01-02]. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1991. – 96 с.
95. Лихтарников Я. М. Расчет стальных конструкций / Я. М. Лихтарников, Д. В. Ладыженский, В. М. Клыков. – [2-е изд.]. – К.: Будівельник, 1984. – 368 с.
96. Тахтамышев А. Г. Примеры расчета стальных конструкций / А. Г. Тахтамышев. – М.: Изд-во лит-ры по строит-ву, 1969. – 264 с.
97. Basis of design and actions on structures. Part 4: Actions in silos and tanks: prEN 1991-4. Eurocode 1. - CEN, 2002.
98. 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.
99. Налимов В. В. Теория эксперимента / В. В. Налимов. – М.: Наука, 1971. – 207 с.
100. Налимов В. В. Логические основания планирования эксперимента / В. В. Налимов, Т. И. Голикова. – М.: Metallurgia, 1981. – 150 с.

101. Безухов К. И. Испытание строительных конструкций и сооружений / К. И. безухов. – [3-е изд.]. – М.: Гос. Изд-во лит-ры по стро-ву и арх-ре, 1954. – 508 с.
102. Шеннон Р. Ю. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Ю. Шеннон; пер. с англ. / Под ред. Е. К. Масловского. – М.: Мир, 1978. – 418 с.
103. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич; пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 542 с.
104. 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.
105. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимации / О. Зенкевич, К. Морган; пер. с англ. / Под ред. Н. С. Бахвалова. – М.: Мир, 1986. – 318 с.
106. Стренг Г. Теория метода конечных элементов / Г. Стренг, Дж. Фикс; пер. с англ. – М.: Мир, 1977. – 350 с.
107. Сегерминд Л. Применение метода конечных элементов / Л. Сегерминд. – М.: Мир, 1979. – 391 с.
108. Розин Л. А. Основы метода конечных элементов в теории упругости / Л. А. Розин. – Л.: ЛПИ, 1972. – 77 с.
109. Деклу Ж. Метод конечных элементов / Ж. Деклу; пер. с франц. / Под ред. Н. Н. Яненко. – М.: Мир, 1976. – 95 с.
110. Бате К. Численные методы анализа и метод конечных элементов / К. Бате, Е. Вилсон; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1982. – 200 с.
111. 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.
112. Карпиловский В. С. SCAD для пользователя / В. С. Карпиловский, Э. З. Криксунрв, А. В. Перельмутер, М. А. Перельмутер, А. Н. Трофимчук. – К.: ВВП Компас, 2000. – 332 с.
113. 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.
114. Руководство по определению характеристик материала заполнения и геометрических параметров бункеров / Центр. н.-и. и про-

ек.-экперим. ин-т пром. зданий и сооруж. – М.: Стройиздат, 1978. – 29 с.

115. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений / Е. И. Пустыльник. – М.: Наука, 1968. – 288 с.

116. Тьюки, Дж. У. Анализ результатов наблюдений: Разведочный анализ / Дж. У. Тьюки; пер. с англ. / Под ред. В. Ф. Писаренко. – М.: Мир, 1981. – 693 с.

117. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин / А. Н. Зайдель. – Л.: Наука, 1974. – 108 с.

118. Металлы. Методы испытаний на растяжение: ГОСТ 1497-84\*. – [Чинний від 1986-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 36 с.

119. Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент: ГОСТ 11701-84\*. – [Чинний від 1986-01-01]. – М.: Изд-во стандартов, 1985. – 24 с.

120. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

121. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – М.: Физматгиз, 1962. – 349 с.

122. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 1 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс; пер. с англ. – М.: Мир, 1971. – 316 с.

123. Дженкинс Г. Спектральный анализ и его приложения. Выпуск 2 / Г. Дженкинс, Д. Ваттс; пер. с англ. – М.: Мир, 1972. – 284 с.

124. Шеффе Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе; пер. с англ. – М.: ГИФМЛ, 1963. – 226 с.

125. Рао С. Р. Линейные статистические методы и их приложения / С. Р. Рао; пер. с англ.. – М.: Наука, 1968. – 338 с.

126. 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.

127. Bannikov D. O. Features of Failures of Steel Bunkers (of pyramiddally-prismatic type) / D. O. Bannikov, M. I. Kazakevitch // Proc. of 10<sup>th</sup> Polish-Ukrainian sem. “Theoretical Foundations of Civil Engineering”. – Warsaw: Warszawskiej Politechnik. – 2002. – Vol. II. – P. 650 – 657.

128. 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.

129. 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.
130. 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.
131. 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.
132. 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.
133. 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.
134. 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.
135. 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.
136. 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.
137. 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.

138. 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.
139. 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.
140. Банников Д. О. Особенности процесса разгрузки бункерных емкостей / Д. О. Банников // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2008. – № 5. – С. 131 – 135.
141. Банніков Д. О. Експериментальні дослідження динамічних властивостей сталевих ємнісних конструкцій для сипучих вантажів / Д. О. Банніков // Підйомно-транспортна техніка. – 2008. – № 4. – С. 79 – 88.
142. 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.
143. Банников Д. О. Особенности классификации емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников // Вісник ОГА-СА. – Одеса: Зовнішрекламсервіс. – 2009. - Вип. 33. – С. 12 – 17.
144. 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.
145. 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.
146. Банников Д. О. Руководство по проектированию вертикальных стальных емкостных конструкций для сыпучих материалов / Д. О. Банников. – Днепропетровск: Новая идеология, 2009. – 56 с.

Наукове видання

**Банніков Дмитро Олегович**

**Сипучий матеріал в ємнісній конструкції**

монографія

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

Підписано до друку 15.09.09. Формат 60×84/16.  
Папір офсетний. Ум.-друк. арк. 10,1. Обл.-вид. арк. 9,32.  
Тираж 300 прим. Вид. № 102. Зам. № 09/211.

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