

А. Махінько, Н. Махінько

СТАЛЕВІ ЄМНОСТІ для зберігання зерна

Книга 1

**Київ
Видавництво «Сталь»
2021**

УДК 624.014.27.046:631.24

А. Махінько, Н. Махінько

М36 Сталеві ємності для зберігання зерна. Книга 1. – К.: Вид-во «Сталь», 2021. – 356 с., рис. 151, табл. 39.

В монографії розглянуто широке коло питань, присвячених проблемам розрахунку та проектування сталевих циліндричних ємностей для зберігання зерна. Наводиться загальна класифікація об'єктів за геометричними і конструктивними ознаками, принципами роботи під навантаженням і особливостями оцінки несучої здатності та надійності їх елементів. Детально викладені теоретичні аспекти розрахунку напружено-деформованого стану ємностей від дії найбільш ймовірних навантажень – вертикального і горизонтального тиску сипкого матеріалу, який викликає вісесиметричне навантаження конструкції та тиску вітрового потоку, що відноситься до несиметричних навантажень. Зазначені результати авторських експериментальних та аналітичних досліджень, зокрема інженерна методика для визначення всіх внутрішніх силових факторів по висоті ємності та теоретичні положення детермінованого розрахунку напружено-деформованого стану конусних покриттів на чотири типи навантажень: власну вагу, вагу термopідвісок, швидкісний напір вітру та тиск снігового покриву. Значну увагу приділено комп'ютерному моделюванню вітрових впливів на ємності для зберігання зерна з метою отримання їх аеродинамічних характеристик. Висвітлено сучасні й перспективні підходи ймовірного розрахунку ємностей та наведені практичні методики для безпосереднього знаходження показників надійності їх конструктивних елементів, оцінки надійності болтових з'єднань та визначення мінімально необхідного рівня надійності залежно від заданого параметра економічних збитків.

Для наукових та інженерно-технічних працівників, фахівців у галузі інжинірингу та будівництва зерносховищ, викладачів вишів, аспірантів і студентів.

Рекомендовано до видання Науково-технічною радою ТОВ «Український інститут сталевих конструкцій імені В.М. Шимановського».

ISBN 978-617-676-179-2

© А. Махінько, Н. Махінько, 2021

© Видавництво «Сталь», 2021

ДО ЧИТАЧА

Наша країна є частиною глобального зернового ринку з позитивною тенденцією до щорічного зростання. Сезонний характер виробництва зерна і постійна висока споживча необхідність викликають потребу в його зберіганні протягом значного часу. Технологічно правильне довготривале складування сировини в сховищах дає можливість поставляти якісне зерно не тільки внутрішнім споживачам та відповідати суворим правилам великої кількості країн-імпортерів. Добре відомо, що найбільш масового та широкого використання у аграріїв, задля забезпечення цих вимог, набули конструкції сталевих оцинкованих силосів. Ці споруди не лише є найбільш економічними в своєму класі, але й дають змогу здійснювати високотехнологічне переміщення зерна, його кондиціонування та переробку з мінімальним втручанням персоналу.

Останнім часом попит на ємності для зберігання зерна постійно підвищується, проте, разом із тим, в інженерній спільноті накопичується велика кількість різноманітних невирішених питань – силос чи бункер? будівельна споруда чи обладнання елеваторного підприємства? вітчизняний виробник чи європейський постачальник? ДБН В.2.2-8-98 чи EN 1993-4-1:2014? тощо.

Чому ситуація складається саме так? На нашу думку, незважаючи на актуальність і тривалий термін спорудження та експлуатації силосних ємностей в нашій країні, наукові та прикладні питання, присвячені проблемам розрахунку та проектування їх конструкцій, не лише рідко знаходять відображення в технічній літературі, а й фактично залишаються осторонь наукового розгляду. І це досить дивно, враховуючи невтішну статистику щорічних аварій на зернових елеваторах і пов'язані з цим значні економічні збитки як окремих аграріїв, так і цілих сільськогосподарських холдингів. Досить часто причинами цих катастроф є існуюча практика невідповідальних виробників, які, отримавши мінімальний досвід та спираючись на не обґрунтовані дані, прагнуть до надмірного зниження металоємності існуючої конструкції. Це проковує великий відсоток відмов, спричинених помилками проектування. Наприклад, ємність розрахована на тиск сипкого матеріалу з випробуваними циклами завантаження-розвантаження, цілком може виявитися аварійною при сприйнятті розрахункових вітрових навантажень із періодом повторюваності в декілька десятків років. У даному випадку прослідковується недостатня вивченість та неврахування вітрових впливів на сталеві ємності, особливо у складі груп.

Актуальність вивчення конструкцій ємностей для зберігання, додатково обумовлена застарілими існуючими нормативними підходами до їх розрахунку, які були сформульовані ще на початку минулого століття і не дають інженеру повного уявлення про дійсну роботу такої комплексної взаємопов'язаної системи, як «ємність – зерно». Особливої загостреності проблема набуває, коли ємність підсилена встановленими з різним кроком вертикальними чи горизонтальними ребрами жорсткості різної конструктивної форми.

З урахуванням перелічених аспектів, представлена монографія не лише заповнює важливу наукову прогалину в області вивчення оболонкових тонкостінних конструкцій, але й містить практичні аспекти розрахунку досить специфічного виду споруд. Загалом у даній роботі представлені результати масштабного дослідження роботи сталевих циліндричних ємностей для зберігання зерна під дією випадкових змінних навантажень, що містить теоретичні основи, аналітичну оцінку, авторські інженерні методики, експериментальні дослідження та економіко-імовірнісні обґрунтування оптимальних рівнів надійності сталевих елементів ємностей із позицій теорії апріорних ризиків. Сподіваємося дана праця буде корисною не лише як науковий трактат, але й стане практичним посібником для інженерів-проектувальників.

Для широкого кола читачів, які цікавляться питаннями розрахунку та конструювання тонкостінних оболонкових систем і супутніми питаннями проектування.

Члени редакційної колегії:

Академік Національної академії наук України,
д.т.н., проф.

Л.М. Лобанов

Академік Національної академії наук України,
д.т.н., проф.

В.В. Харченко

Член-кореспондент Національної академії
наук України, д.т.н., проф.

О.В. Шимановський

Книга опублікована за підтримки заводу «LUBNYMASH», одного з провідних підприємств України з проектування та виготовлення обладнання для зерна і зернопродуктів.

ПЕРЕДМОВА

Представлена монографія присвячена глобальному дослідженню особливого класу будівельних споруд, до яких відносяться тонкостінні сталеві ємності для зберігання сипких гранульованих матеріалів. З огляду на переважające використання даних конструкцій саме в галузі агропромислового комплексу як основні продукти зберігання приймалися зернові та сировина їх переробки. Таким чином були окреслені межі технологічних навантажень та обрана оптимальна за геометричними та конструктивними характеристиками *циліндрична форма* споруд з плоским (для довготривалого зберігання) та конічним (для короткочасного) днищем і конічною покрівлею ухилом $\approx 30^\circ$.

Книга є результатом поєднання багаторічного практичного досвіду проєктування об'єктів агропромислового комплексу та глибинних теоретичних знань фундаментальних інженерних дисциплін. Вона є першою частиною двотомного видання та здебільшого має теоретичне спрямування, хоча автори приділили велику увагу представленню результатів для можливості їх безпосереднього застосування в практиці розрахунку і конструювання – більшість отриманих формул є «робочі», а всі методики апробовані при реальних розрахунках в середовищі кінцево-елементного аналізу.

Монографія (книга 1) складається з чотирьох розділів, логічно поєднаних спільною тематикою. В першому розділі наведена загальна *класифікація* ємностей для зберігання зерна за геометричними і конструктивними ознаками та коротка характеристика основних груп експлуатаційних навантажень. Другий розділ присвячений дослідженню *напружено-деформованого стану* ємностей від дії найбільш ймовірних навантажень – вертикального і горизонтального тиску сипкого матеріалу, який викликає вісесиметричне навантаження силосу, та тиску вітрового потоку, що відноситься до несиметричних навантажень. В третьому розділі наводяться результати *комп'ютерного моде-*

лювання вітрових впливів на ємності для зберігання зерна з метою отримання їх аеродинамічних характеристик. Останній розділ стосується питань *імовірнісного розрахунку* ємностей для зберігання зерна та безпосередньої оцінки показників надійності їх конструктивних елементів.

Хоча автори намагалися подати матеріал у найбільш простому, зручному та наочному вигляді, широке коло розглянутих питань вимагає від читача професійних знань ряду автономних дисциплін і методів, таких як: статистична механіка, методи нормування навантажень, механіка руйнування будівельних сталей, теорія ортотропних оболонок обертання, будівельна аеродинаміка, методи кінцевих елементів і об'ємів, методи обчислювальної аеродинаміки (CFD аналіз), теорія тонкостінних елементів та загальна теорія надійності будівель і споруд та ін.

Загалом розрахунок тонкостінних оболонкових конструкцій, до яких можна віднести сталеві циліндричні ємності з гнучким зовнішнім каркасом, традиційно відноситься до царини авіаційної чи машинобудівельної галузей промисловості. В той же час силоси, як *будівельні конструкції*, належать до іншої області інжинірингу та відрізняються за багатьма параметрами: конструктивні схеми, геометричні умови, основні групи навантажень тощо. Тому важливою задачею дослідження роботи сталевих ємностей для зберігання зерна було відокремлення основних положень технічної теорії оболонок і вибір методів рішення для аналізу напружено-деформованого стану й побудови аналітичної методики розрахунку циліндричних оболонок з вихідними параметрами, наближеними до реальних моделей ємностей для зберігання (геометрія, тип навантаження, умови закріплення тощо). Наведемо такий приклад. Цілковито зрозуміло, що при завантаженні оболонки тиском сипкого матеріалу, в ній не виникають внутрішні згинальні моменти, а діють винятково розтягувальні чи стискувальні напруження, отже, вона може бути розглянута в руслі безмоментної теорії. Врахування впливу геометричних параметрів, які притаманні реальним ємностям, наприклад, зміна товщини чи кількості прошарків (анізотропії) оболонки за висотою; ефект *«гофрування»* оболонки; наявність ребер або контурних елементів; врахування початкових недосконалостей форми (випучування, вирізи) чи ексцентричне закріплення, а також випадки несиметричного завантаження – виходять зі сфери впливу безмоментної теорії та вимагають іншого підґрунтя розрахунку (теорія крайового ефекту, моментна теорія).

Відповідно до окресленого, в монографії в рамках моментної та безмоментної теорії оболонок викладена авторська аналітична методика розрахунку корпусу циліндричних ємностей з гнучким зовнішнім каркасом на міцність і деформативність. Окрім цього зазначаються результати супутніх досліджень, представлені в інженерній формі, що можуть застосовуватися для розв'язання ряду практичних задач. Зокрема, аналіз жорсткісних характеристик профільованих листів на основі спрощеного методу розрахунку парамет-

рів синусоїдального профілю; розрахункові формули для визначення прогинів, погонних згинальних моментів та погонних поперечних сил в ємностях за відсутності ребер жорсткості; розрахунки безреберних ємностей з постійною та змінною товщиною стінки; розрахункова модель вертикального ребра жорсткості циліндричної ємності у вигляді стиснуто-зігнутого стрижня на пружній основі; наближені формули для опису основних геометричних характеристик вертикальних ребер та ін.

Окремим пунктом монографії є загальне дослідження напружено-деформованого стану *конусних покрівель*, в рамках якого отримані прості аналітичні залежності для оцінки внутрішніх зусиль і переміщень всіх елементів конусних покрівель різних розмірів та конфігурації (без кілець жорсткості та з одним, двома чи трьома кільцями, за відсутності та з урахуванням другорядних балок, при симетричному та несиметричному навантаженні) на сумісну дію чотирьох типів навантажень: власну вагу, вагу термопідвісок, швидкісний напір вітру та тиск снігового покриву. Практична реалізація запропонованої методики проілюстрована числовими прикладами перевірочних розрахунків.

Ще однією важливою темою, що розглянута в книзі є чисельне дослідження обтікання вітровим потоком групи ємностей для зберігання, об'єднаних в *силосний парк*. У цьому випадку потоки повітряних мас прискорюються і між спорудами виникають значні сили розрідження, врахування яких практично ніколи не виконується. Тому, в рамках методу контрольних об'ємів, було здійснене комп'ютерне моделювання обтікання моделі одиночної ізольованої циліндричної ємності, моделі ємності біля перешкоди у вигляді нескінченного довгого екрана та поєднання моделей різних конфігурацій циліндричних тіл, що імітують силосний парк. Задачі аеродинамічного розрахунку реалізовувалися в трьох варіантах: плоске 2D обтікання із висотою розрахункової області в одну комірку кінцево-елементної сітки, квазі-двовимірне обтікання із висотою розрахункової області у два діаметри силосної ємності та просторове тривимірне обтікання при моделюванні всіх необхідних турбулентних ефектів. Крім цього, розрахунки виконувалися у стаціонарній та нестационарній постановці із різним кроком часової дискретизації. В книзі описані основні результати проведеного чисельного експерименту та наведена спеціальна методика побудови кінцево-елементних сіток в задачах моделювання вітрових впливів на циліндричні ємності, яка реалізована у параметричному вигляді – розміри всіх елементів сітки визначаються за спеціальними залежностями як функції діаметра ємності та числа Рейнольдса.

Останнім циклом питань, що порушуються в монографії, є застосування альтернативних прогресивних методів щодо розрахунку ємностей для зберігання з урахуванням стохастичної природи складових граничної нерівності. Отримані на цьому підґрунті результати, хоча і є дещо складними для розуміння та опису, проте однозначно оптимальні як з економічної точки зору,

так і щодо вимог до надійності та безпеки споруд. З огляду на проблематику, в роботі аргументований вибір параметра кількісної міри співвідношення між зовнішніми впливами, геометричними розмірами конструкцій і характеристиками міцності сталі, з якої вони виготовлені, через випадкову величину *узагальненого критичного фактора*, на базі імовірнісного представлення яко-го сформована процедура визначення надійності сталевих ємностей для зберігання з отриманням кінцевого аналітичного виразу, аналогічно класичному підходу. Відповідно до сформованого методу розрахунку наводяться отримані залежності для визначення критичного фактора та фактичної імовірності безвідмовної роботи конструкції в простій аналітичній формі. Практичним виявом стало формування інженерної методики ймовірнісного розрахунку конструкцій ємностей, що працюють в умовах згину, осьового й позacentрового стиску або розтягу при стохастичних властивостях зовнішніх впливів та параметрів міцності сталі.

Заключним етапом роботи стало виконання економіко-ймовірнісного опису оптимальних рівнів надійності сталевих ємностей на основі мінімізації функцій сумарного ризику.

На нашу думку, книга стане в нагоді науковим та науково-технічним працівникам проектних установ, інженерам-конструкторам підприємств елеваторного обладнання, викладачам, аспірантам, студентам.

Авторський колектив висловлює подяку членам редакційної колегії: академіку Національної академії наук України, доктору технічних наук, професору Л.М. Лобанову, Академіку Національної академії наук України, доктору технічних наук, професору В.В. Харченку, члену-кореспонденту НАН України, доктору технічних наук, професору О.В. Шимановському за уважне ставлення, корисні поради та критичні зауваження, які допомогли нам покращити цей рукопис.

Особливу вдячність хочемо адресувати керівництву заводу «LUBNYMASH» і особисто директору Плєскачу Ю.М. за сприяння даної публікації та надану підтримку при проведенні наукових та експериментальних досліджень, результати яких відображені на сторінках книги. Розрахункові методики та вдалі проектні рішення, втілені в практику конструювання впродовж тривалого часу співробітництва з компанією, дозволили не лише отримати значний економічний ефект, але і підвищити надійність конструкції сталевих ємностей та забезпечити кінцевого споживача більш якісним продуктом.

РОЗДІЛ I.

СТАЛЕВІ ЄМНОСТІ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА. ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ФОРМ

Даний розділ містить огляд основних конструктивних рішень металевих конструкцій, що мають місце в галузі будівництва сталевих ємностей для зберігання гранульованих твердих сипких продуктів для потреб сільськогосподарського сектора. Проведений аналіз архітектурних особливостей та основних невизначеностей для розглядуваного виду споруд, які повинні бути враховані в процесі проектування чи розрахунку. Сюди відносяться геометричні варіації форм, пропорцій та розмірів основних елементів ємностей, форми потоку в процесі вивантаження, типи стінок та види жорсткісних елементів, розміщення вхідних отворів та вихідних хоперів, їх обриси та ін. Зазначені функціональні та будівельні фактори щодо забезпечення необхідного внутрішнього об'єму та технологічних рухомих процесів при оптимальному рівні надійності споруди. Залежно від положення в просторі, здебільшого в роботі розглядається вертикальний тип споруд, що характеризуються збільшеним розміром по вертикалі, з акцентом на циліндричні ємності.

Наводиться коротка характеристика основних груп експлуатаційних навантажень на ємності для зберігання (власна вага, технологічні навантаження, вертикальний та горизонтальний тиск сипкого матеріалу, снігові та вітрові впливи, температурні та ін.). Зазначені загальні схеми визначення їх характеристичних значень з наступною деталізацією математичних моделей розподілу.

1.1. Конструктивні особливості сталевих ємностей. Історичні аспекти розвитку та сучасний стан

Стрімкі темпи розвитку сільськогосподарської галузі як на території нашої країни, так і в світовому масштабі зумовлюють постійне виникнення дефіциту потужностей для зберігання зернових культур. Вимоги до якісного зберігання продукту з мінімальними енерговитратами є стимулом активного розвитку елеваторного будівництва. В контексті даної проблематики, на перше місце слід віднести створення раціональних та надійних промислових споруд для зберігання різних об'ємів зернових продуктів, до яких відносяться сталеві ємності для зберігання (рис. 1.1).

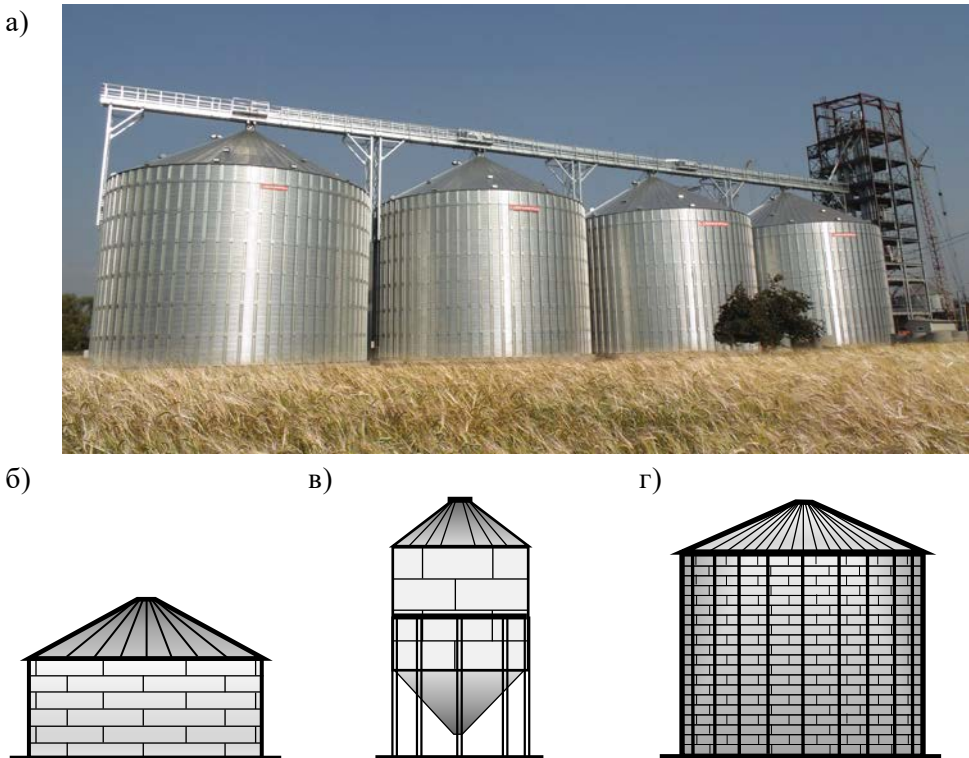


Рис. 1.1. Загальний вигляд (а) сталевих ємностей для зберігання (ПП «LUBNYMASH») та їх основні форми: б – безреберні; в – на дискретних опорах; г – із системою ребер жорсткості

Основними функціями ємностей є завантаження, зберігання та розвантаження зернових сипких матеріалів із визначеними характеристиками. Вони можуть бути розташовані окремо або об'єднані в групи – *силосні парки*, які

Порівнюючи графічну інформацію обох підходів, можливо відмітити їх гарну відповідність, особливо при малих гнучкостях і децю гіршу при більших ($\lambda > 80$). Проте в будь-якому випадку запропонований підхід створює деякий запас, а для області великих імовірностей дає точну оцінку знизу критичного фактора елемента.

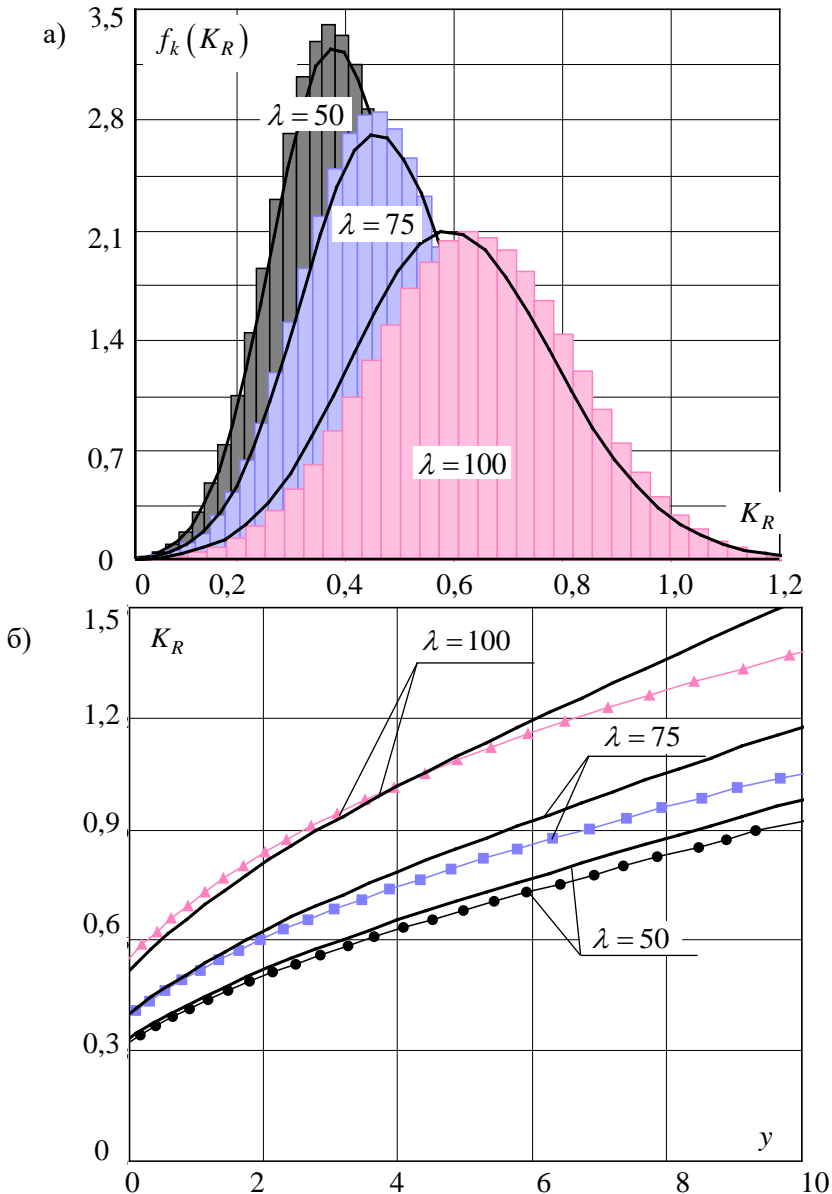


Рис. 4.3. Імовірнісне представлення критичного фактора на прикладі стисненого елемента ($V_R = 0,1$, $V_S = 0,3$): а – щільність розподілу; б – функції розподілу на критичній імовірнісній шкалі

ЗМІСТ

ДО ЧИТАЧА	3
ПЕРЕДМОВА	5
Розділ I. СТАЛЕВІ ЄМНОСТІ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ ЗЕРНА. ОГЛЯД КОНСТРУКТИВНИХ ФОРМ.....	9
1.1. Конструктивні особливості сталевих ємностей. Історичні аспекти розвитку та сучасний стан.....	10
1.2. Класифікація та конструктивні ознаки сталевих ємностей.....	15
1.3. Класифікація навантажень на сталеві ємності.....	33
1.3.1. Власна вага конструкцій та обладнання.....	33
1.3.2. Навантаження від сипких матеріалів.....	34
1.3.3. Вітрові навантаження на ємність зберігання.....	44
1.3.4. Навантаження від снігу.....	51
1.3.5. Температурні та сейсмічні навантаження.....	55
Розділ II. РОЗРАХУНОК ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЄМНОСТЕЙ З ГНУЧКИМ ЗОВНІШНІМ КАРКАСОМ.....	59
2.1. Розрахунок ємностей з плоским днищем як оболонок обертання змінної жорсткості при вісесиметричному та асиметричному навантаженні.....	60
2.1.1. Вплив профілювання листів на жорсткісні характеристики ємностей	60
2.1.2. Моделювання синусоїдальної стінки силосів у задачах кінцево-елементного аналізу.....	69
2.1.3. Напружено-деформований стан ємностей за відсутності ребер жорсткості.....	74
2.1.4. Вплив вертикальних ребер на жорсткісні характеристики ємностей.....	85

2.1.5. Визначення внутрішніх зусиль в елементах ємностей.....	98
2.2. Особливості розрахунку ємностей як оболонки обертання при несиметричному квазірівномірному навантаженні.....	104
2.2.1. Розрахунок на несиметричне вітрове навантаження за безмоментною теорією.....	104
2.2.2. Розрахунок на несиметричне вітрове навантаження за моментною теорією.....	110
2.2.3. Особливості розрахунку ємностей на вітрове навантаження при змінній за висотою товщині корпусу і ребер жорсткості.....	136
2.3. Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель.....	138
2.3.1. Розрахунок покрівлі без кілець жорсткості та з одним кільцем при симетричному навантаженні.....	141
2.3.2. Розрахунок покрівель з декількома кільцями жорсткості при симетричному навантаженні.....	154
2.3.3. Особливості розрахунку покрівель на несиметричне навантаження.....	166
2.4. Висновки за другим розділом.....	168
Розділ III. МОДЕЛЮВАННЯ ВІТРОВИХ ВПЛИВІВ НА СИЛОСИ ТА СИЛОСНІ ПАРКИ.....	171
3.1. Загальна характеристика турбулентності в задачах аеродинаміки.....	173
3.2. Особливості побудови розрахункових сіток в аеродинамічних задачах.....	183
3.3. Верифікаційні тести обчислювальної аеродинаміки.....	191
3.3.1. Вибір розрахункової сітки.....	191
3.3.2. Двовимірне обдування круглого циліндра.....	197

3.4. Числовий експеримент моделювання систем вихорів у плоскому потоці (2D-моделювання).....	208
3.5. 3D-моделювання просторового потоку в околі циліндричних моделей.....	250
3.6. Висновки за третім розділом.....	254
Розділ IV. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТІ ЄМНОСТЕЙ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ.....	257
4.1. Імовірнісне представлення коефіцієнта критичного фактора.....	257
4.2. Розрахунок надійності тонкостінних елементів силосних ємностей.....	279
4.3. Економічний підхід до визначення оптимального рівня надійності.....	292
4.4. Особливості розрахунку надійності листів корпусу ємностей для зберігання.....	299
4.5. Оцінка надійності багатоболтових з'єднань листів корпусу.....	308
4.6. Вербальна надійність окремих конструкцій та споруд.....	321
4.7. Висновки за четвертим розділом.....	325
ВИСНОВКИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ДОСЛІДЖЕННЯ.....	327
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	330

МАХІНЬКО Антон Володимирович, доктор технічних наук,
старший науковий співробітник,
лауреат премії Президента України,
начальник науково-технічного відділу, ТОВ «ЕТУАЛЬ».

pasargada1981@gmail.com

МАХІНЬКО Наталія Олександрівна, доктор технічних наук,
професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва
та реконструкції аеропортів,
Національний авіаційний університет.

nataliia.makhinko@npp.nau.edu.ua

МЗ6 Сталеві ємності для зберігання зерна. Книга 1. – К.: Вид-во «Сталь»,
2021. – 356 с., рис. 151, табл. 39.

Редактор
Комп'ютерна верстка

Т.І. Лукашевич
Н.О. Махінько

Підписано до друку 18.10.2021 р. Формат 70×100/16.
Папір офсет. Гарнітура Times New Roman.
Друк офсет. Умов. друк. арк. 15,45.
Наклад 300 прим. Замовлення № 155.

ТОВ «Видавництво «Сталь».
вул. Віталія Шимановського, 2/1, м. Київ, 02125, Україна,
тел./факс 516-45-02, тел. 516-55-92
E-mail: tov_steel@ukr.net
www.izdat.com.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 4947 від 30.07.2015