УДК 624.014, 624.953, 621.642.39 DOI 10.31649/2311-1429-2024-1-14-23

В. О. Попов[1]
Д. М. Байда[2]
О. С. Баранецька[1]
К. П. Криклива[3]

СТІЙКІСТЬ ГЕРМЕТИЧНОЇ ОБОЛОНКИ МЕТАЛЕВОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ ПРИ ВПЛИВІ ВАКУУМУ

[1]Вінницький національний технічний університет
[2]Державний університет «Житомирська політехніка»
[3]Комунальне підприємство "Житомирводоканал"

У статті обґрунтована можливість перепрофілювання великорозмірних герметичних ємностей хімічного виробництва, що знаходиться у стані простою, для зберігання та перевантаження нафтопродуктів. Розглянуто рішення важливої наукової задачі із розроблення методики скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану будівельних конструкцій резервуарів для зберігання рідких нафтопродуктів під впливом вакууму, який може виникати при їх аварійному спустошенні. Деталізоване моделювання напружено-деформованого стану ємностей виконано на прикладі резервуару об'ємом 20 000 м^3, збудованого в умовах потенційно підвищеної сейсмічної активності. Наведені основні результати обстеження споруди, включаючи вимірювання геометричних відхилень від проекту, набутих протягом тривалої експлуатації. Описані дефекти і пошкодження, які виникли на різних етапах життєвого циклу споруди, а також, дані вимірювань втрат металоконструкцій від корозії. Виявлено можливі форми втрати стійкості споруди для ідеалізованої моделі споруди циліндричної форми та для моделі споруди із дефектами геометрії. При моделюванні враховано зазначені недосконалості геометрії ємності і корозійне зменшення товщини стінок. Визначено коефіцієнти запасу стійкості та виявлено ефект зменшення запасу стійкості при значному спотворенні форми.

Уточнено розташування найбільш напружених та перевантажених ділянок, які були виявлені на попередніх аналітичних етапах досліджень. Доведено, що сферичний каркасний дах споруди не може витримувати проектні навантаження від вакууму 50 мм вод. ст. через можливий співнаправлений сніговий вплив на дах, не врахований радянськими проектувальниками. Акцентовано увагу, що найбільші деформації споруди, а також, ініціалізація початкових викривлень ділянок, які можуть втратити стійкість, відбувається в зоні виявлених дефектів геометрії. Підтверджено результати аналітичного визначення допустимої межі вакууму, яку ще можуть витримувати будівельні конструкції споруди. Обчислене програмно значення негативного тиску, при якому ще не спостерігаються ознаки втрати стійкості, рекомендовано ввести у технічний регламент експлуатації споруди, як граничне.

Ключові слова: *резервуар, нафтопродукти, напружено-деформований стан, вакуум, дефекти геометрії.*

Вступ

Ця наукова робота завершує цикл авторських науково-практичних досліджень, присвячених аналізу поведінки під навантаженням великорозмірних вертикальних циліндричних ємностей для зберігання органічних рідин [1–4]. Наукові дослідження цієї статті доповнюють і уточнюють попередні напрацювання присвячені аналітичній оцінці міцності, стійкості і довговічності великорозмірних резервуарів, які використовуються для потреб хімічної промисловості в умовах підвищеної сейсмічної активності.

На сьогодні, в умовах енергетичного голоду, деякі галузі хімічної промисловості України переживають не найкращі часи. Значна частина підприємств, яка займалася виробництвом мінеральних добрив, миючих засобів, кислот, розчинників тощо, призупинили свою роботу з різних причин, серед яких слід, особливо, виділити логістичні проблеми з відвантаженням закордонному замовнику готової продукції. Водночас, матеріальна база таких підприємств, включаючи складні технологічні агрегати для накопичення і зберігання готової продукції (герметичні резервуари), залишилася достатньо потужною. Особливо це стосується перспективних хімічних виробництв, запущених наприкінці минулого століття.

Водночас, через системне руйнування сховищ нафтопродуктів внаслідок воєнних дії, у нафтопереробної галузі хімічної промисловості за останні два роки виникла значна нестача, саме, складських потужностей.

Постановка проблеми.

Отже, з одного боку, у галузі хімічного синтезу мінеральних добрив спостерігається простій і, як наслідок, надлишок накопичувальних резервуарів, а, з іншого, у нафтопереробному виробництві – прямо протилежна ситуація – нестача цих самих резервуарів. Швидке зведення нових сховищ для паливо-мастильних матеріалів на заміну зруйнованих, занадто вартісне, матеріаломістке, та вимагає залучення великої кількості інших цінних ресурсів. Крім того, слід зазначити, що, конструктивно, резервуари для нафтопродуктів, фактично нічим не відрізняються від резервуарів для органічних не

агресивних до металу речовин. Тому, для вирішення невідкладної задачі зберігання таких необхідних державі паливо-мастильних матеріалів, пропонується використовувати недозавантажені виробничі складські потужності хімічних виробництв, що простоюють.

Однак, для реалізації вказаного задуму, необхідно виконати комплекс інженерно-технічних та наукових задач, а, саме:

- обстеження технічного стану та оцінка залишкового ресурсу резервуарів;
- розроблення проектної документації з реконструкції споруди з відповідним перепрофілюванням;
- вирішення логістичних питань з доставки та відвантаження паливо-мастильних матеріалів.

Серед зазначених задач слід виділити, передусім, оцінку технічного стану та залишкового ресурсу міцності резервуару та його відповідності вимогам норм [7 – 9]. Знаходження рішення цієї глобальної задачі тісно пов'язане з розробкою методики деталізованого моделювання напружено-деформованого стану ємностей з урахуванням дефектів і пошкоджень, набутих протягом тривалої експлуатації. Цьому, в основному і присвячена дана наукова робота.

Основна частина.

У подальшому методика моделювання описана на прикладі реальної споруди-резервуару загальним об'ємом 20 000 м^3, що розташований на території Одеського припортового заводу у м. Южне [1]. Резервуар вже зазнавав перепрофілювання. За задумом проектувальників він спочатку був призначений для зберігання суперфосфорної кислоти у ланці технологічного циклу виробництва фосфатних добрив. Через виробничі потреби, близько п'ятнадцяти років назад, почав використовуватися для зберігання метанолу. За цим призначенням використовувався до початку широкомасштабних воєнних дій. На даний час споруда знаходиться у стані простою. Під час реконструкції пропонується використання цієї та сусідніх ємностей складського комплексу для акумулювання та перевантаження нафтопродуктів.

Майданчик будівництва згаданої споруди характеризується надзвичайно високою потенційною сейсмічною активністю, яка, з урахуванням ґрунтових умов може досягати 8 балів [3 – 5]. Ємність є частиною складського комплексу для зберігання метанолу, який, загалом, складається з чотирьох резервуарів діаметром 39,9 м та висотою стінки 17,89 м, розташованих відстані близько 30 м один від одного і функціонально зв'язаних конструкціями перехідних містків (рис. 1).

Конструкція ємності, що розглядається, як приклад, являє собою безкаркасну сталеву споруду у вигляді вертикальної циліндричної оболонки обертання, виготовленої з листової сталі. Основою споруди служить сталеве тонкостінне днище, що передає навантаження на грунт через кільцеподібний залізобетонний ростверк, який, в свою чергу, спирається на систему паль-стояків. До сталевого днища приєднана циліндрична оболонка-обичайка (стінка споруди), яка має по висоті змінну товщину – знизу – товща, згори тонша. Оболонка захищена від перегріву сонячною радіацією розташованим неподалік жалюзійним каркасним екраном з південного боку. Над стінкою споруди улаштовано тонколистовий дах у вигляді сегмента сфери, зібраний на металевому каркасі та об'єднаного з обичайкою опорним жорстким кільцем.

Для обслуговування протипожежних піногенераторів та для інших сервісних потреб на споруді улаштовано систему оглядових майданчиків та інших корисних технологічних агрегатів, які при моделюванні розглядалися як корисне навантаження, що не підвищує жорсткість самої споруди.

Рисунок 1 – Загальний вигляд складського комплексу з чотирьох великорозмірних ємностей з південного боку а, також, жалюзійних екранів та системи сервісних перехідних містків.

Доступ до конструкцій ємності забезпечується через шахтні сходи та систему перехідних містків.

Клас наслідків (відповідальності) ємності – СС-3 (значні наслідки) [1 – 3, 6].

Будівельні конструкції резервуару для зберігання суперфосфорної кислоти взятої, як приклад, було зведено у 1 988 році, у відповідності до комплекту робочих креслень, розроблених ДПІ «ДніпроПроектСтальКонструкція», м. Дніпропетровськ. Більш докладно про конструкцію ємності та її технічні параметри дивись [1 – 3]. З конструктивної та технологічної точки зору ємності складського комплексу працюють як окремі споруди.

Для оцінки технічного стану ємностей було виконано візуальне та інструментальне обстеження однієї з чотирьох споруд. Для вибіркового контролю геометрії бічних стінок було вибрано чотири ділянки (№1 – №4), до яких був вільний доступ на час обстеження (відсутній жалюзійний екран). В процесі контролю умовно приймалося, що увігнутість стінки (яма) до центра ємності вимірювався із знаком «–», опуклість стінки (горб) від центра – назовні, вимірювався із знаком «+». Контроль геометрії здійснювався електронним теодолітом ТЕ-05 від рівня низу до найвищої видимої точки, що не прикрита кронштейнами, містками та іншими конструктивними елементами. Контроль відстані здійснювався лазерним далекоміром “Disto classic 5a”. Результати вибіркового геодезичного контролю наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Зведені результати вибіркового геодезичного контролю геометрії ємності

Номер ділянки	Максимальне відхилення, мм	Локалізація максимального відхилення
1	–70	верхівка
2	+36	верхівка
3	–40	рівень 1-го кронштейну
4	+129	рівень 1-го кронштейну

В результаті вибіркового контролю геометричної форми резервуару, яка для тонкостінних конструкцій є визначальною при оцінці залишкового ресурсу, було встановлено, що відхилення окремих ділянок стінок ємності від вертикалі у спустошеному стані знаходяться в межах від –70 до +129 мм, що перевищує гранично встановлені відхилення $f_u = \pm 0{,}005 \cdot \mathrm{H}_\epsilon = \pm 90(\text{мм})$ та, місцями, перевищує допустимі відхилення для відповідного місцевого відхилення поясу $\left(f_u = \pm 0{,}005 \cdot H_{рівня} = \pm 12 мм/1 м.п.\right)$ [1, 2], [7, табл. 8].

На сферичному даху ємності виявлені понаднормативне відхилення верхнього кільця від горизонталі, корозія зварних швів та листової зашивки, понаднормативні увігнутості та інші ознаки втрати стійкості (рис. 2).

Рисунок 2 – Зовнішній вигляд та технічний стан покриття резервуару. Масова корозія листової зашивки. Ознаки втрати стійкості сегментів даху з південно-східного боку у вигляді понаднормативних увігнутостей.

Встановлено, також, що конструкції резервуару зазнали втрат від корозії:

- по конструкціях днища знос складає до 15 … 17 %,
- по конструкціях стінок – до 5 %,
- по конструкціях даху – до 10 % [1, 2].

На негативний фактор технічного стану споруди, що погіршився, накладаються, також, більш жорсткі нормативні вимоги із забезпечення підвищеної надійності відповідальної споруди.

Отже, металеві конструкції резервуару після більше аніж тридцятирічної експлуатації знаходяться у технічному стані який у невигідний бік відрізняється від проектного.

У попередніх дослідженнях [1 – 3] за допомогою аналітичних методик виконано перше наближення аналізу напружено-деформованого стану споруди великорозмірного герметичного резервуару та було виявлено, що одним з найбільш небезпечних експлуатаційних станів споруди є поява вакууму при аварійному спустошенні ємності.

Дійсно, у цьому випадку, атмосферний тиск ззовні ємності додається до корисних і технологічних навантажень на споруду та створює додаткові небезпечні розрахункові ситуації, які можуть призвести до втрати стійкості форми як циліндричної оболонки бічних стінок споруди, так і сферичного даху.

Причому, встановлена закономірність, що чим менш заповненим є резервуар, тим більш негативний вплив на нього спричиняє негативний тиск (вакуум), адже гідростатичний тиск йому (вакууму) прямо протидіє.

Крім того, для ємностей нафтопродуктів характерний режим експлуатації з періодичним наповненням-спустошенням, що часто повторюються.

Негативний тиск від вакууму всередині ємності накладається на тиск на елементи обичайки від вітрового впливу. Водночас, снігові навантаження на дах споруди, які, також, спрямовані всередину ємності, додають негативного впливу саме, на дахову частину . Таким чином, найбільш негативними комбінаціями впливів при роботі резервуару у випадку аварійного спустошення є наступні комбінації впливів:

- варіант 1 – постійні навантаження + вакуум всередині ємності + вітрові навантаження + сніг;
- варіант 2 – постійні навантаження + вакуум всередині ємності + вітрові навантаження;
- варіант 3 – постійні навантаження + вакуум всередині ємності + сніг,
- варіант 4 – постійні навантаження + вакуум всередині ємності.

Оскільки, згідно з керівництвом з експлуатації, спустошення резервуару відбувається епізодично з постійним нагнітанням надлишковим тиском азотом, а вакуум при спустошенні, взагалі, є аварійним експлуатаційним станом при не спрацюванні клапанів скидання негативного тиску, отже, як наслідок, стани варіантів тимчасових впливів за варіантами 1, 2 вважалися проектувальниками споруди малоймовірними.

До проектної документації внесено тільки четвертий варіант комбінації тимчасових впливів.

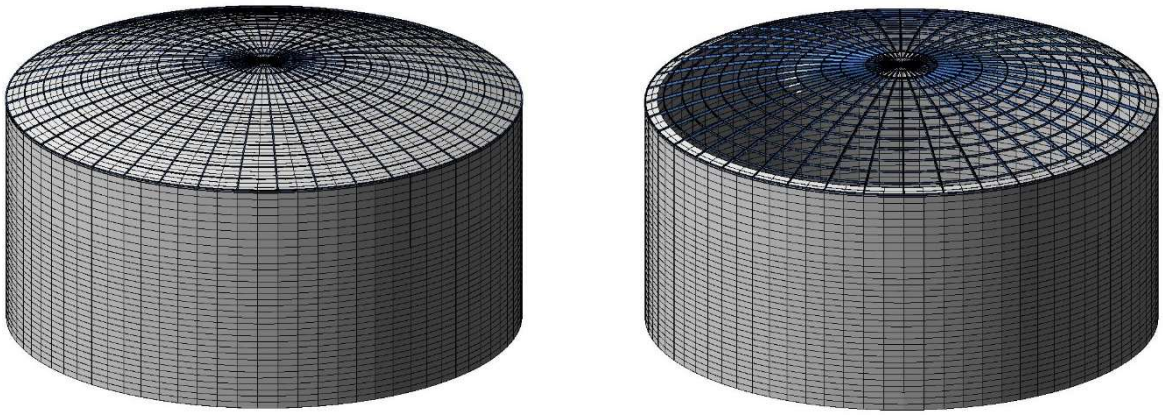
Однак, проста інженерна логіка підказує, що тривало діючий тимчасовий вплив від снігу може накладатися на аварійний стан при випуску робочої рідини. Тому, із врахуванням рекомендацій [1], отриманих згідно з аналітичними методиками розрахунків, слід розглянути два ймовірних варіанти завантаження (варіант 4 – проектний, та варіант 3 – пропонований).

При цьому слід врахувати два можливих значення негативного тиску: проектне значення вакууму (0,5 кПа) та, знижене згідно [1], експлуатаційне значення вакууму 0,237 кПа (можливий стан в момент викачки робочої рідини), з урахуванням поточного технічного стану основних елементів споруди. Ці розрахункові варіанти було перевірено за допомогою скінчено-елементної моделі напружено-деформованого стану з урахуванням викривлень геометрії споруди та корозійного зносу.

Для оцінки достовірності аналітичної методики визначення внутрішніх напружень у елементах ємності, розроблених у [1] і [2], а також, для уточнення результатів розрахунків, отриманих аналітичним способом було виконано попереднє спрощене моделювання металоконструкцій ємності методом скінчених елементів засобами ПК «Ліра-САПР». Металеві елементи ємності, а саме, днище, обичайка, елементи даху, елементи опорного кільця та окрайку днища, змодельовані пластинчастими скінченими елементами. Висота пластинчастих елементів обичайки – змінна. Для рівнів стінки товщиною 17, 16 та 14 мм прийнята висота скінчених елементів 0,497 м, для рівнів стінки товщиною 13 мм, прийнята висота скінчених елементів 0,663 м, згідно з результатами обмірів. Конструкції металокаркасу сферичного даху змодельовано стрижневими скінченими елементами, а зашивка – пластинчастими елементами товщиною 4 та 10 мм відповідно. Конструкції сервісних майданчиків у розрахунку враховано корисним навантаженням, зібраним у вузлах обичайки в рівні верхнього опорного кільця. Товщина пластинчастих елементів зашивки була скоригована у відповідності до виявленого інструментальними обстеженнями корозійного зносу. Геометрія споруди у першому наближенні вважалася ідеальною, тобто, циліндрична поверхня стінок та сферична поверхня даху – без

виявлених обстеженням увігнутостей та інших недосконалостей. При моделюванні умовно вважалося, що конструкції стінки в рівні фундаментів жорстко приєднані до нерухомої основи.

Тривимірна візуалізація скінчено-елементної моделі ємності показана на рис. 3.



а) б)

Рисунок 3 – Модель конструкції при розрахунку стійкості від вакууму: а – загальний вигляд, б – елементи зашивки даху умовно не показані.

Основні несучі конструкції резервуару відносяться до категорії відповідальності конструкцій «А», I категорії за напруженим станом [7, табл. 1].

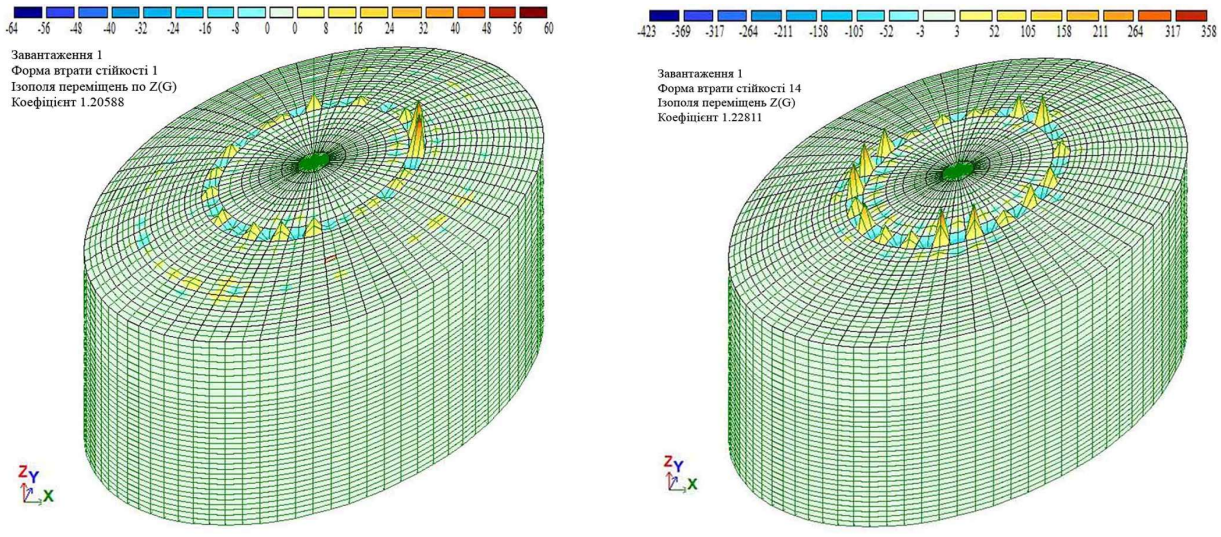
Тому для основних сполучень навантажень за [6, табл. 5], прийнято такі коефіцієнт надійності:$\gamma_n{}^I = 1{,}25$ –для 1-ї групи граничних станів; $\gamma_n{}^{II} = 1{,}05$ –для 2-ї групи граничних станів. Коефіцієнт надійності по вазі металоконструкцій резервуару $\gamma_{fm} = 1{,}05$ – для металевих конструкцій, у яких зусилля від власної ваги менші 50% [9, табл. 5.1]. Коефіцієнт надійності за навантаженням для впливу вакууму $\gamma_{fm2} = 1{,}2$ [8].

Згідно з проектними даними станом на 1988 рік будівельні конструкції ємності мають витримувати розрідження (вакуум) $p_в = -50 мм вод. ст. = -0{,}5 кПа$. Розрахунковий вакуум можна оцінити за формулою (1):

$$p_в^p = p_в \cdot \gamma_{fm} \cdot \gamma_n^I, [кПа] \quad (1)$$

Підставляючи відомі величини у (1) отримуємо $p_в^p = -0{,}5 \cdot 1{,}2 \cdot 1{,}25 = -0{,}75 (кПа)$.

На рис. 4 показані можливі форми втрати стійкості споруди.



а) б)

Рисунок 4 – Результати розрахунку ймовірних форм втрати стійкості елементів даху ідеалізованої моделі резервуару (варіант завантаження 4: постійні навантаження + вакуум всередині ємності): а – 1 форма, б – 14 форма.

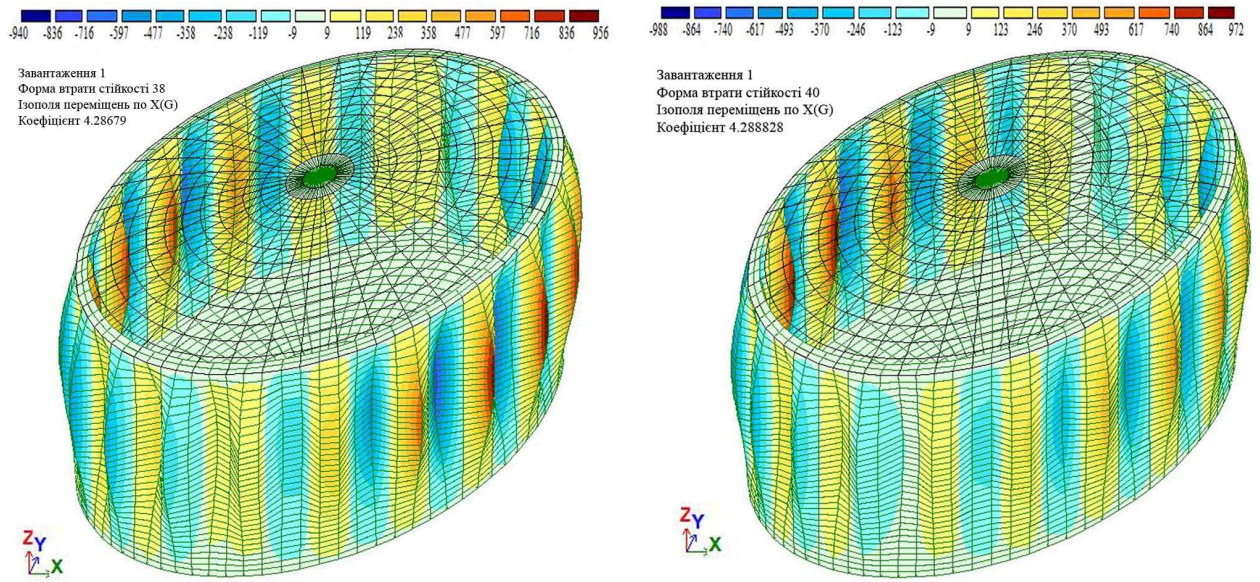
За 1 … 38 формами втрата стійкості пов'язана виключно з тонкостінними елементами даху. Найбільш небезпечними є перші чотирнадцять форм з близькими коефіцієнтами запасу стійкості, рівними $n_1 \ldots n_{14} = 1{,}2 \ldots 1{,}22$, що набагато менше нормативного коефіцієнта запасу $n_u = 2{,}4$ [1, 8]:

$$(n_1 \ldots n_{14} = 1{,}2 \ldots 1{,}22) < (n_u = 2{,}4).$$

При варіанті завантаження 3 (постійні навантаження від власної ваги споруди + вакуум всередині ємності + сніг) коефіцієнт запасу стійкості елементів даху, взагалі, набагато менше 1. Навіть, якщо взяти до уваги експлуатаційні значення снігових впливів, прибрати введені у розрахунок коефіцієнти надійності, коефіцієнт запасу стійкості менше 1. Тобто, тонкостінні елементи даху можуть втрачати стійкість і, як наслідок, споруда резервуару, загалом, може втратити герметичність, що неприпустимо. Отже, одночасно витримувати снігове навантаження та проектне значення вакууму дах резервуару не може.

Порівнюючи виявлені на даху резервуару викривлення (рис. 2) з результатами високо деталізованого скінчено-елементного моделювання напружено-деформованого стану, можна зробити висновок, що деформації даху виникли абсолютно прогнозовано через не врахування проектувальниками цілком ймовірної комбінації впливів, варіант 3 – постійні навантаження від власної ваги споруди + вакуум всередині ємності + сніг.

Форми втрати стійкості ідеалізованої скінчено-елементної моделі починаючи з 38-ої, пов'язані з елементами бічних стінок. Для прикладу, на рис. 5 показано 38-му (першої, для бічної стінки)та 40-ву форму.



а) б)

Рисунок 5 – Результати розрахунку ймовірних форм втрати стійкості стінки ідеалізованої моделі резервуару (варіант завантаження 3: постійні навантаження + вакуум всередині ємності + сніг): а – 38 форма (перша, для бічної стінки), б – 40 форма. Зашивка даху умовно не показана.

З рис. 5 добре видно, що викривлення елементів стінки, які являють собою послідовну хвилясту поверхню з випуклих та увігнутих ділянок, за формою та характером нагадує викривлення, набуті стінкою реальної конструкції резервуару (див. табл. 1).

Коефіцієнти запасу стійкості стінки рівні $n_{38} \ldots n_{40} = 4{,}28 \ldots 4{,}29$, що більше нормативного коефіцієнта запасу $n_u = 2{,}4$ [1, 8]:

$$(n_{38} \ldots n_{40} = 4{,}28 \ldots 4{,}29) > (n_u = 2{,}4).$$

Стійкість бічних стінок забезпечена.

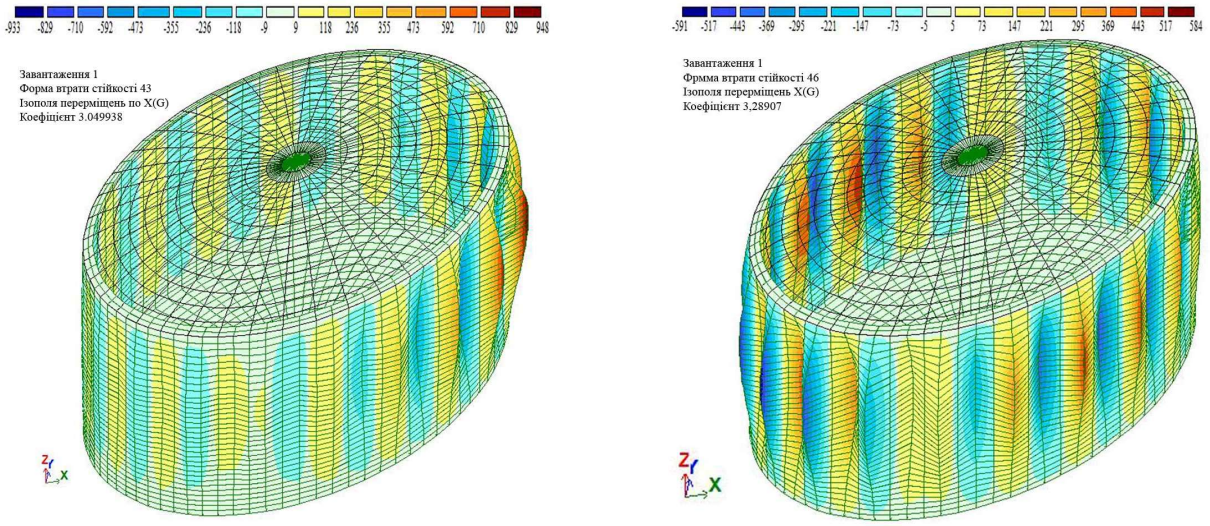
Однак, останній висновок стосується лише першого наближення розрахункової моделі. Надалі було розроблено нову, уточнену модель, з урахуванням виявлених геодезичним контролем недосконалостей геометрії споруди (див. табл. 1). На ділянках із виявленими при обстеженні опуклостями та увігнутостями було модифіковано геометричні параметри моделі шляхом згущення сітки тріангуляції, заміни прямокутних елементів оболонок трикутними та переміщенням вузлів у відповідності до

виявлених результатів геодезичного контролю. Корозійні втрати було враховано зменшенням товщини відповідних пластинчастих елементів конструкцій резервуару. Результати визначення форм втрат стійкості споруди показано на рис. 6.

Добре видно, що спотворення геометрії ємності вплинуло, як на кількісні, так і на якісні показники втрати стійкості форми. По-перше, перша форма втрати стійкості бічної стінки (43-тя для даної моделі) змінилася, деформації втрати стійкості зосередилися поблизу геометричних недосконалостей. Коефіцієнт запасу стійкості стінки, при цьому, суттєво зменшився: $n_{43}\ldots n_{46} = 3{,}05\ldots3{,}29$.

$$(n_{43}\ldots n_{46} = 3{,}05\ldots3{,}29) > (n_u = 2{,}4).$$

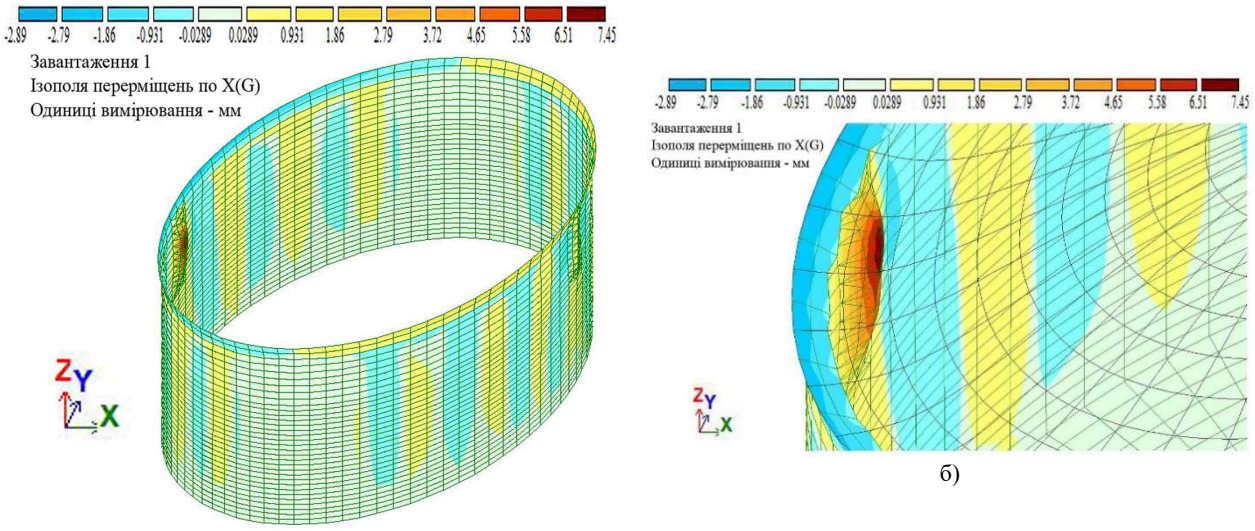
Стійкість бічних стінок деформованої оболонки резервуару із урахуванням виявлених викривлень забезпечена, однак, коефіцієнти запасу стійкості на 24…29% нижчі за ідеалізовану модель з не деформованими конструкціями.



а) б)

Рисунок 6 – Результати розрахунку ймовірних форм втрати стійкості стінки моделі резервуару де змодельовано недосконалості геометрії (варіант завантаження 3: постійні навантаження + вакуум всередині ємності + сніг): а – 43 форма (перша для бічної стінки), б – 46 форма. Зашивка даху умовно не показана.

Крім того, було проаналізовано деформування споруди під навантаженням. В місцях локальних викривлень стінок виявлено підвищені горизонтальні деформації, які ініціюють втрату стійкості фрагментів (рис. 7).



а) б)

Рисунок 7 – Результати розрахунку деформацій конструкції бічної стінки від вакууму по 0x, мм: а – загальний вигляд, б – локальний фрагмент в зоні спотворення геометрії.

Шляхом перебору величини тиску негативного доведено, що умова стійкості для всіх

конструктивних елементів резервуару забезпечується при рівні вакууму $p_{ви} = -0{,}237 кПа$.

Аналогічні дослідження були проведені і для інших впливів, включаючи сейсмічні, на резервуар з урахуванням дефектів геометричної форми та витончення стінок внаслідок корозійного зносу. Виявлено, що дефекти геометрії найбільш негативно проявляють себе, саме при негативному тиску, що впливає на споруду разом зі сніговим впливом. При впливах вакууму на споруду з дефектами геометрії сумісний сніговий вплив неминуче призводить до втрати стійкості даху.

Таким чином, враховуючи результати попередніх досліджень [1 – 3] можна вважати доцільним і можливим перепрофілювання металевих резервуарів хімічної промисловості у ємності для зберігання нафтопродуктів з урахуванням їх поточного технічного стану. При цьому розрахунковим способом слід визначити допустимі межі (висоту) наповнення, а, також, інші технологічні обмеження. Нехтувати викривленнями форми при цьому не можна, їх необхідно враховувати при моделюванні, або, як варіант, вводити додаткові сервісні коефіцієнти запасу $\gamma_{ff} > 1{,}3$.

Висновки

Проведені наукові дослідження дозволили обґрунтувати принципову можливість, у умовах воєнного стану, використання існуючих сталевих циліндричних ємностей хімічної промисловості, що простоюють, для зберігання нафтопродуктів. При цьому слід враховувати певні експлуатаційні обмеження, викликані вимогами чинних норм та реальним технічним станом резервуарів, що встановлюється в результаті інструментальних обстежень. Враховуючи необхідність періодичного наповнення-спустошення ємностей, що часто повторюються, важливим технологічним впливом при цьому є впливи від вакууму (розрідження, що може виникати в момент аварійного випуску нафтопродуктів).

В результаті аналізу деталізованої моделі напружено-деформованого стану конструкції ємності об’20 тис. м^3 під впливом вакууму, взятої, як приклад, доведено, що найбільш негативним є випадок повного спустошення ємності. Розрахунками доведено, що тонкостінні елементи даху, внаслідок не врахування радянськими проектувальниками можливого співнаправленого ефекту від вакууму та снігового впливу на дах споруди, неминуче втрачають стійкість при проектному вакуумі 0,5 кПа. Відповідно рекомендується зниження допустимого рівня вакууму всередині ємності з проектного $p_{\text{в}} = -0{,}5$кПа до $p_{ви} = -0{,}237 кПа$. При цьому у технічному регламенті слід передбачити регулярне очищення даху споруди від снігу.

При деталізованому моделюванні споруди з урахуванням викривлень і деформацій, набутих при тривалій експлуатації, встановлено, що бічні стінки резервуару витримують зазначені негативні тиски, однак, коефіцієнт запасу стійкості до 30% нижчий за проектний (первинний) не деформований стан. Тому при моделюванні подібних споруд нехтувати викривленнями форми при моделюванні не можна. Якнайкраще необхідно моделювати такі викривлення методом скінчених елементів згущенням сітки триангуляції та заміною прямокутних елементів оболонки трикутними. Для спрощення, у випадку необхідності виконання експрес-аналізу стійкості, до запасів стійкості, обчислених на ідеалізованій моделі, рекомендується вводити додаткові сервісні коефіцієнти запасу $\gamma_{ff} > 1{,}3$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Попов В.О., Попова А.В. Аналітичне моделювання напружено-деформованого стану резервуару для зберігання метанолу об'ємом 20000 м^3 від технологічних та кліматичних впливів. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2021-1. С. 87-98.
2. Попов В.О., Войцехівський О.В., Криклива К.П. Сейсмостійкість великорозмірного резервуару для зберігання метанолу. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2023-1. С. 5 – 19.
3. Попов В. О. Оптимізація експлуатаційних параметрів існуючих вертикальних металевих циліндричних резервуарів [Електронний ресурс] / В. О. Попов, К. П. Криклива // Матеріали LII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ : Збірник доповідей, Вінниця, 14-23 березня 2023 р. – Електрон. текст. дані. – 2023. С. 1343 – 1345. – Режим доступу: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17453.
4. Байда Д.М., Сазонова І.Р. Особливості розрахунку сталевого резервуару при дії сейсмічних впливів. Будівництво в сейсмічних районах України. Будівельні конструкції: Міжвідомчій науково-технічний збірник наукових праць (будівництво) / ДП «ДНДІБК». – Випуск 76. – К., 2012. – С. 154–159.
5. ДБН В.1.1.12:2014. Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Будівництво в сейсмічних районах України. Введ. З 1.10.2014 р. на заміну ДБН В.1.1.12:2006. К.: Мінрегіон України, 2014 – 110 с.
6. ДБН В.1.2-14-2009. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель, споруд, будівельних конструкцій та основ. К.: Мінбуд України, 2009. – 37 с. – (Державні будівельні норми України).
7. ДСТУ 8855:2019 Будівлі та споруди. Визначення класу наслідків (відповідальності). [На заміну ДСТУ -Н Б В.1.2-16:2013] Київ, Технічний комітет стандартизації «Експертиза містобудівної та проектної документації на будівництво», 2019 – 13 с. – (Національний стандарт України).

8. ВБН В.2.2-58.2-94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. / Держкомнафтогаз. – К.: Укрнафтопродукт, 1994. – 98 с. – (Відомчі будівельні норми України).
9. ДБН В.1.2-:2006. Навантаження і впливи. Норми проектування. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К. : Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
10. ДБН В.2.6-168:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. На заміну ДБН В.2.6-163:2010 у частині розділу 1 та ДСТУ Б В.2.6-194:2013. [Дата надання чинності 01.01.2015 р.] – К.: Мінрегіон України, 2014. – 199 с. – (Національний стандарт України).
11. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. Введ. З 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с. – (Національний стандарт України).

REFERENCES

1. Popov V.O., Popova A.V. Analitychne modelyuvannya napruzheno-deformovanoho stanu rezervuaru dlya zberihannya metanolu ob'yemom 20000 m3 vid tekhnolohichnykh ta klimatychnykh vplyviv. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2021-1. S. 87-98.
2. Popov V.O., Voytsekhivs′kyy O.V., Kryklyva K.P. Seysmostiykist′ velykorozmirnoho rezervuaru dlya zberihannya metanolu. Suchasni tekhnolohiyi, materialy i konstruktsiyi v budivnytstvi. Naukovo-tekhnichnyy zbirnyk. Vinnytsya, VNTU, 2023-1. S. 5 – 19.
3. Popov V. O. Optymizatsiya ekspluatatsiynykh parametriv isnuyuchykh vertykal′nykh metalevykh tsylindrychnykh rezervuariv [Elektronnyy resurs] / V. O. Popov, K. P. Kryklyva // Materialy LII naukovo-tekhnichnoyi konferentsiyi pidrozdiliv VNTU : Zbirnyk dopovidey, Vinnytsya, 14-23 bereznya 2023 r. – Elektron. tekst. dani. – 2023. C. 1343 – 1345. – Rezhym dostupu: https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2023/paper/view/17453.
4. Bayda D.M., Sazonova I.R. Osoblyvosti rozrakhunku stalevoho rezervuaru pry diyi seysmichnykh vplyviv. Budivnytstvo v seysmichnykh rayonakh Ukrayiny. Budivel′ni konstruktsiyi: Mizhvidomchiy naukovo-tekhnichnyy zbirnyk naukovykh prats′ (budivnytstvo) / DP «DNDIBK». – Vypusk 76. – K., 2012. – S. 154–159.
5. DBN V.1.1.12:2014. Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiynykh vplyviv, vid pozhezhi. Budivnytstvo v seysmichnykh rayonakh Ukrayiny. Vved. Z 1.10.2014 r. na zaminu DBN V.1.1.12:2006. K.: Minrehion Ukrayiny, 2014 – 110 s.
6. DBN V.1.2-14-2009. Zahal′ni pryntsypy zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel′, sporud, budivel′nykh konstruktsiy ta osnov. K.: Minbud Ukrayiny, 2009. – 37 s. – (Derzhavni budivel′ni normy Ukrayiny).
7. DSTU 8855:2019 Budivli ta sporudy. Vyznachennya klasu naslidkiv (vidpovidal′nosti). [Na zaminu DSTU -N B V.1.2-16:2013] Kyyiv, Tekhnichnyy komitet standartyzatsiyi «Ekspertyza mistobudivnoyi ta proektnoyi dokumentatsiyi na budivnytstvo», 2019 – 13 s. – (Natsional′nyy standart Ukrayiny).
8. VBN V.2.2-58.2-94. Rezervuary vertykal′ni stalevi dlya zberihannya nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93,3 kPa. / Derzhkomnaftohaz. – K.: Ukrnaftoprodukt, 1994. – 98 s. – (Vidomchi budivel′ni normy Ukrayiny).
9. DBN V.1.2-:2006. Navantazhennya i vplyvy. Normy proektuvannya. [Na zaminu SNyP 2.01.07-85 (krim rozdilu 10)]. [Chynnyy vid 2007-01-01] – K. : Minbud Ukrayiny, 2006. – 71 s. – (Derzhavni budivel′ni normy Ukrayiny).
10. DBN V.2.6-168:2014. Stalevi konstruktsiyi. Normy proektuvannya. Na zaminu DBN V.2.6-163:2010 u chastyni rozdilu 1 ta DSTU B V.2.6-194:2013. [Data nadannya chynnosti 01.01.2015 r.] – K.: Minrehion Ukrayiny, 2014. – 199 s. – (Natsional′nyy standart Ukrayiny).
11. DSTU B V.1.2-3:2006. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya. Vved. Z 1 sichnya 2007 r. na zaminu rozdilu 10 SNyP 2.01.07-85. K.: Minbud Ukrayiny, 2006. – 10 s. – (Natsional′nyy standart Ukrayiny).

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури. Факультет будівництва, цивільної та екологічної інженерії, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, email: v.a.popov.vntu@gmail.com. ORCID 0000-0003-2379-7764.

Байда Денис Миколайович – к.т.н., доцент кафедри гірничих технологій та будівництва ім. проф. Бакка М.Т., Факультет гірничої справи, природокористування та будівництва. Державний університет «Житомирська політехніка», м. Житомир, email: denisbayda@gmail.com. ORCID 0009-0004-0004-377X

Баранецька Олена Сергіївна – бакалавр будівництва, фахівець центру забезпечення якості освіти Вінницького національного технічного університету, м. Вінниця. email: alexeyielenka@gmail.com

Криклива Катерина Павлівна – Комунальне підприємство “Житомирводоканал”, інженер відділу розвитку і модернізації виробництва, магістр будівництва, м. Житомир Katherine.kryklyva@gmail.com

V. Popov[1]
D. Baida[2]
O. Baranetska[1]
K. Kryklyva[3]

STABILITY OF THE SHELL OF A METAL CYLINDRICAL TANK UNDER THE INFLUENCE OF VACUUM

[1]Vinnytsia National Technical University
[2]State University «Zhytomyr Polytechnic»
[3]Utility Company “Zhytomyrvodokanal”

In the paper have been justified the possibility of repurposing large-sized hermetic tanks of chemical production, which is in a state of idleness, for the storage and transshipment of petroleum products. Have been considered the solution of an important scientific problem of the development of methods of finite-element modeling of the stress-strain state of tanks structures for the storage of liquid petroleum products under the influence of vacuum which can occur during their emergency emptying. Detailed modeling of the stress-strain state of the tanks have been performed on the example of a tank with a volume of 20,000 m^3, built in conditions of potentially increased seismic activity. Have been given the main results of the inspection of the structure, including the measurement of geometric deviations from the project, which were acquired during long-term operation. Have been described defects and damage that occurred at various stages of the structures life cycle, including the data from measurements of losses of metal structures from corrosion. Have been identified possible forms of loss of structure stability for an idealized model of a cylindrical structure and for a model of a structure with geometry defects. Have been taken into account the specified imperfections of the tanks geometry and corrosion reduction of the wall thickness in the modeling. Have been determined the coefficients of the reserve of stability and have been revealed the effect of reducing the margin of stability with significant of the forms distortion.

Has been clarified the location of the most stressed and overloaded areas, which were identified at the previous analytical stages of research. Have been proven that the spherical frame roof of the structure cannot withstand the design loads from the vacuum 50 mm water column due to possible co-directional snow impact on the roof, not taken into account by the soviet designers. It is emphasized that the largest deformations of the structures, and also, the initialization of the initial distortions of areas that may lose stability, occurs in the area of detected geometry defects. Have been confirmed the results of the analytical determination of the permissible vacuum limit, which the construction structures of the tank can still withstand. The calculated program value of negative pressure, at which there are no signs of loss of stability, have been recommended to be entered into the technical regulations for the operation of the structure as a limit.

***Key words**: tank, petroleum products, stress-strain state, vacuum, geometry defects.*

Popov Vladimir O. – Ph.D. Docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Faculty of Construction, Civil and Environmental Engineering, Vinnytsia national technical university, Vinnytsia city, email: v.a.popov.vntu@gmail.com

Baida Denys M. – Ph.D., Docent of department of Mining Technologies and Construction named after Prof. Bakka M.T., Faculty of Mining, Nature Management and Construction, State University «Zhytomyr Polytechnic», Zhytomyr city, email: denisbayda@gmail.com.

Kryklyva Kateryna P. – Utility Company "Zhytomyrvodokanal", engineer of the department for the development and modernization of production, master of construction, Zhytomyr city, email: Katherine.kryklyva@gmail.com

Baranetska Olena S. – bachelor of civil engineering, specialist of the center for ensuring the quality of education of the Vinnytsia National Technical University, Vinnitsa city, email: alexeyielenka@gmail.com