

## НОВА КОНСТРУКЦІЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА ВЕЛИКОЇ МІСТКОСТІ

*Запропоновано нову конструктивну форму вертикального резервуара великої місткості для нафтопродуктів. Наведено основні переваги нової конструкції порівняно з традиційними. Запропоновано метод розрахунку з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності в постановці задачі на основі моментної схеми методу скінченних елементів.*

**Ключові слова:** *циліндричний резервуар, оболонкова конструкція, моментна схема методу скінченних елементів.*

**Вступ.** Із ростом споживання нафти і нафтопродуктів в усьому світі має місце тенденція до збільшення кількості і розмірів конструкцій резервуарів для їх зберігання. Існуючі традиційні конструкції вертикальних циліндричних резервуарів досягали, як правило, ємкості до 50 тис. м<sup>3</sup>. В 2003 році в Україні вперше був запроєктований вертикальний резервуар об'ємом 75 тис. м<sup>3</sup>. З 2002 року в умовах зарубіжного будівництва резервуарів з'явилися конструкції об'ємом 125 тис. м<sup>3</sup> і 160 тис. м<sup>3</sup>. В резервуарах такого об'єму в стінках виникають значні внутрішні зусилля, а для забезпечення міцності з'єднання вертикальної стінки і горизонтальних листів днища резервуара необхідне значне збільшення товщини нижнього поясу циліндричної частини. В зв'язку із складним напруженим станом і недосконалістю моделі опису характеру роботи нижнього поясу стінки під навантаженням, в нормативній літературі [1] коефіцієнт умов роботи прийнятий як  $\gamma_c=0,6$ .

На основі узагальнення техніко-економічних показників резервуарів об'ємом від 10 тис. м<sup>3</sup> до 100 тис. м<sup>3</sup>, приведених в [2], можна зробити наступний висновок. Зі збільшенням об'єму резервуара питомі витрати сталі на 1 м<sup>3</sup> корисного об'єму зменшуються. Збільшення об'єму резервуару за рахунок збільшення висоти призводить до збільшення навантаження на нижні пояси і відповідно до збільшення витрат сталі.

**Огляд досліджень і публікацій.** Найбільш складною і напруженою частиною резервуара є вузол з'єднання стінки і днища – уторний вузол. В численних публікаціях, присвячених вивченню роботи уторного вузла, розглядаються різні підходи до вирішення проблеми, які умовно можна розділити на три групи. Найбільш поширеним є метод, в якому стінка і днище розглядаються у вигляді системи двох напівнескінчених балок-смуг одиначної ширини. Обидві балки опираються на пружну основу, перша враховує просторову жорсткість оболонки а друга відображає властивості реальної основи резервуара [2, 3]. Даний метод забезпечує простоту реалізації, але є коректним тільки якщо стінка повністю опирається на ґрунтову основу. В дійсності при спіранні стінки на бетонне кільце відбувається відрив деякої частини днища від фундаменту, що принципово змінює схему роботи уторного вузла.

Другий метод базується на системі спряження пластин і оболонок. В роботі [4] уторний вузол резервуара розглядається в вигляді довгої циліндричної оболонки постійної товщини і кругового кільця, змодельованих в рамках моментної теорії оболонок. Цей метод точніший ніж перший, але громіздкий математичний апарат потребує спеціальних обчислювальних програм.

Третя група робіт базується на чисельних дослідженнях методом скінченних елементів. Широкі можливості сучасних програмних комплексів дозволяють досить точно визначити напруження в елементах уторного вузла.

**Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.** Виходячи з вимог різних нормативних документів, товщини поясів стінки резервуарів визначаються

за кільцевими напруженнями в безмоментному стані оболонки. За розрахунковий переріз приймається нижня межа поясу стінки або переріз, розміщений на 0,3 м вище від нижньої межі поясу. Останній метод також називається методом «одного футу». В основі методу «одного футу» лежить припущення, що максимальні деформації поясу виникають за межами зони крайового ефекту. Проте ефективність такого підходу справедлива лише для резервуарів невеликого об'єму – до 20 тис. м<sup>3</sup>. В дослідженні [5] показано, що при розрахунку нижнього поясу резервуарів великого об'єму за методом «одного футу» конструкція має значний запас міцності.

Недосконалість розрахункових гіпотез аналітичних методів розрахунку при проектуванні дає значний запас міцності і не відображає реальний напружено-деформований стан конструкції. Конструкції такого типу відносяться до класу сильно нелінійних механічних систем, для яких характерна значна кінематична рухомість, втрата місцевої стійкості тонколистових фрагментів, концентрація напружень в місцях примикання елементів різної жорсткості.

В даній публікації запропоновано дослідження напружено-деформованого стану оболонкової конструкції на основі моментної схеми методу скінченних елементів в геометрично і фізично нелінійні постановці.

**Постановка завдання.** При проектуванні резервуарів великої місткості проблема зменшення питомої витрати сталі є актуальною. Зменшення витрат сталі можна досягти при використанні конструктивної форми, яка дозволить уникнути значних напружень у вузлі з'єднання стінки і днища. В зв'язку з актуальністю проблеми поставлена задача вдосконалення конструктивної форми вертикального циліндричного резервуару великого діаметру.

Запропонована нова конструктивна форма вертикально резервуару полягає в наступному: з'єднання вертикальної стінки і горизонтального днища пропонується виконати за допомогою закруглення в формі четверть тору. Зменшення напружень в нижніх поясах резервуару можна досягти за рахунок введення вертикальних ребер жорсткості і висячого покриття. Об'єм запропонованих конструкцій може складати від 140 тис. м<sup>3</sup> до 300 тис. м<sup>3</sup>, що в декілька разів перевищує об'єм традиційних конструктивних форм резервуарів.

Пропонується розглянути наступну комбіновану оболонкову конструкцію. Тонколистова оболонка покриття розміщується на радіальних і кільцевих елементах, так званої «постелі», яка опирається на каркас із зовнішнього і внутрішнього опорного контуру. Опорний контур пропонується виконати із сталевих труб заповнених бетоном, тобто застосовується відома конструкція із «трубобетону».

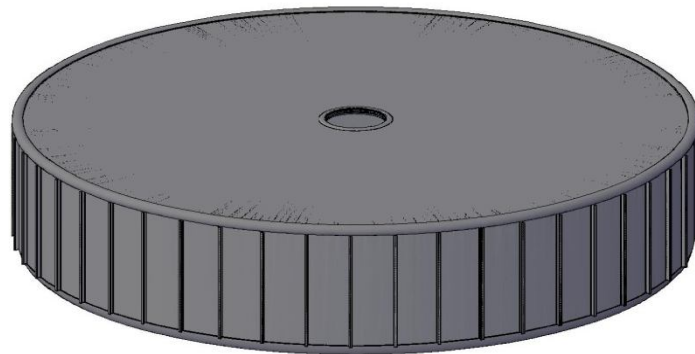
Переваги таких запропонованих тонколистових оболонкових конструкцій зумовлені:

- впровадженням уточнених розрахунків комбінованих механічних систем на основі нелінійної теорії пружності і пластичності;
- поєднанням в тонколистовому покритті несучих і захисних функцій;
- зниженням витрат матеріалу за рахунок раціонального використання тонкого сталевих листа, який працює в основному на розтяг, і конструкцій опорного контуру, що працюють на косий поперечний і позацентровий згин з різними знаками епюр згинальних моментів;
- зменшенням навантаження від покриття на стінки резервуара;
- максимальним заводським виготовленням окремих конструктивних елементів та скороченням термінів будівництва.

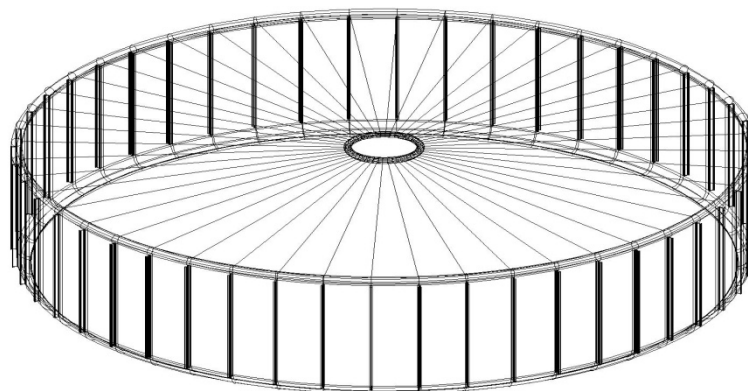
До недоліків запропонованої комбінованої конструкції відноситься висока деформативність, що вимагає певної стабілізації пролітної конструкції, та ускладненням розрахунку конструкції з урахуванням геометричної та фізичної нелінійності. Оскільки для зменшення загальних витрат сталі в конструкції резервуару не передбачений понтон, то в резервуарі необхідно встановити систему випуску надлишкових летких газів з наступним їх використанням.

Враховуючи достатньо складну форму загальної оболонкової конструкції всього резервуару і неможливість розраховувати окремо конструктивні елементи, передбачається застосування ефективного чисельного методу – моментної схеми методу скінчених елементів [6]. Передбачено вдосконалення алгоритму розрахунку для визначення напружено деформованого стану комбінованої оболонкової з урахування статичних впливів від власної ваги конструкції та гідростатичного тиску рідини, а також динамічних навантажень.

**Основний матеріал і результати.** Як один з варіантів пропонується конструкція циліндричного резервуару із постійним покриттям із висячої тонколистової оболонки з циклічно розташованими ребрами. Зовнішній вигляд конструкції резервуару об'ємом 140 000 м<sup>3</sup> наведений на рис. 1. Конструктивна схема каркасу наведена на рис. 2. Тонколистова оболонка днища має сталу товщину 4 мм, товщина листів циліндричної оболонки змінюється в межах від 4 до 24 мм. Тонка оболонка покриття комбінованої конструкції складається із тонких листів, що розміщуються на радіальних і кільцевих елементах «постелі» яка в свою чергу опирається на каркас із зовнішнього і внутрішнього опорних контурів. Розрахунок такої сильно нелінійної конструкції можливий тільки чисельними методами будівельної механіки і теорії пружності.



*Рисунок 1 – Зовнішній вигляд конструктивної схеми циліндричного резервуару об'ємом 140 тис. м<sup>3</sup>*



*Рисунок 2 – Конструктивна схема каркасу оболонкової конструкції циліндричного резервуару з висячим покриттям з тонколистової оболонки*

Для розрахунку обрано метод скінчених елементів на основі моментної схеми скінчених елементів (МССЕ), принципи якої викладені в [6, 7]. Метод скінчених елементів (МСЕ) відноситься до варіаційних методів, тому для отримання розв'язуючих рівнянь МСЕ використовується перший принцип віртуальної роботи у загальних криволінійних координатах, співвідношення нелінійної теорії пружності і пластичності представлені у приростах [6, 7]:

$$\int_V (\hat{\sigma}' + \hat{C}_4^{(e,p)} \cdot \hat{\gamma}) \cdot \delta \hat{\gamma} dV + \int_V \rho \vec{u} \cdot \delta \vec{u} dV - \int_V \vec{\rho} \cdot \delta \vec{u} dV - \int_S \vec{q} \cdot \delta \vec{u} ds = 0 \quad (1)$$

де:

$\hat{\sigma}'$  - другий тензор початкових напружень Піола-Кірхгофа;

$\hat{\gamma}$  - тензор приростів скінченних деформацій Коши-Гріна;

$\vec{u}, \vec{u}$  - вектори приростів переміщень і прискорень;

$\vec{\rho}, \vec{q}$  - узагальнені вектори об'ємних і поверхневих сил, що діють на тверде тіло.

З використанням (1) розроблені основні співвідношення методу скінченних елементів, що покладені в основу методології дослідження сильнонелінійних оболонкових систем з використанням спеціальних алгоритмів у рамках так званого поточного лагранжевого формулювання із залученням методів подовження за параметром збурення, Ньютона-Кантаровича, регуляризації та блочної релаксації [8]. При виводі співвідношень МССЕ використовуються рівняння в приростах переміщень, деформацій і напружень, а також тензорні ряди їх функціональних виразів. Це дає можливість враховувати ефекти, пов'язані з нелінійними деформаціями і зміною форми тонкостінних просторових оболонкових систем.

Результати розрахунку запропонованої конструкції приведені в [9]. Економія сталі від застосування нової конструктивної форми порівняно із класичною конструкцією [2] складає 8,7%. Досягти ефективнішого використання матеріалу можна за рахунок зміни форми циліндричної частини на торовидну. В [10] приведені результати розрахунку і оптимізація форми вертикального резервуару із заміною циліндричної частини на торовидну. За рахунок збільшення бокового провису стінки резервуару також можна досягти зменшення напружень в конструктивних елементах.

**Висновки.** Проблема зменшення напружень в уторному вузлі вертикального циліндричного резервуару є актуальною. Для оптимізації розподілу внутрішніх зусиль у вертикальному резервуарі великої місткості запропонована нова конструктивна форма. На основі проведених чисельних досліджень в геометрично нелінійній постановці запропонованої конструктивної форми можна зробити наступні висновки:

1. Нова комбінована конструкція має достатньо складну конфігурацію, топологію та вимагає певного структурного моделювання окремих конструктивних елементів з різними фізико-механічними характеристиками.
2. Застосування комбінованої оболонкової конструкції зі зміненою конструкцією уторного вузла дає значну економію витрат сталі на одиницю корисного об'єму в порівнянні із традиційною формою.
3. Використання вертикальної огорожуючої частини двоякої кривизни є доцільним, для суттєвого зменшення концентрації напружень в уторному вузлі.
4. Розроблені методи дослідження напружено деформованого стану на основі моментної схеми скінченних елементів забезпечують високу точність отриманих результатів.

#### Література

1. ДБН В.2.6-183:2011. Конструкції будівель і споруд. Резервуари вертикальні циліндричні сталеві для нафти та нафтопродуктів. Загальні технічні умови. – К.: ДП «Укрархбудінформ», 2011. – 77 с.
2. Сафарян, М.К. Металлические резервуары и газгольдеры / М.К. Сафарян. – М.: Недра, 1987. – 200с.
3. Лессиг, Е.Н Листовые металлические конструкции / Е.Н. Лессиг, Ф.В. Лилеев, А.Г. Соколов. – М.: Стройиздат, 1970. – 488 с.

4. Востров, В.К. Расчет напряжений и перемещений в уторном узле и окрайках днища резервуара / В.К. Востров, А.А. Катанов // Монтажные и специальные работы в строительстве. – 2005. – №8. – С. 22-26.

5. Еленицкий, Э.Я. Уточненный расчет прочности стенки вертикальных цилиндрических резервуаров / Э.Я. Еленицкий // Сборник докладов Международной научно-практической конференции «Новые решения конструкций, технология сооружения и ремонта стальных резервуаров». – Самара, 2007 – С. 153-163.

6. Баженов, В.А. Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / А.В. Баженов, В.К. Цыхановський, В.М. Кислоокій. – К.: КНУБА, 2000. – 388с.

7. Шимановський, О.В. Теорія і розрахунок сильно нелінійних конструкцій / О.В. Шимановський, В.К. Цыхановський. – К.: Сталь, 2005. – 432с.

8. Цыхановский, В.К. Влияние формы окончаний цилиндрической оболочки на развитие нелинейно-упругих и упруго-пластических деформаций / В.К. Цыхановский, С.М. Талах, А.И. Кордун // Зб. наук. праць Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2011 – Вип. 8. – С.43-59.

9. Цыхановський, В. К. Розрахунок на міцність великопрогонових залізобетонних оболонок із зовнішнім листовим армуванням методом скінченних елементів / В.К. Цыхановський, О.І. Кордун // Зб. наук. праць УкрНДІпроектстальконструкція ім. В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010 – Вип. 5. – С.262-269.

10. Цыхановский, В.К. Влияние кривизны вертикальной стенки цилиндрического резервуара на напряженно-деформированное состояние ограждающей конструкции / В.К. Цыхановский, С.М. Талах, А.И. Кордун // Зб. наук. праць Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2012 – Вип. 10. – С.146-156.

Надійшла до редакції 14.11.12

© О.І. Кордун

**О.И. Кордун, аспірант**

**ООО «Украинский институт стальных конструкций имени В.Н. Шимановского»**

## **НОВАЯ КОНСТРУКЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО РЕЗЕРВУАРА БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ**

*Предложена новая конструктивная форма вертикального резервуара большой вместимости для нефтепродуктов. Приведены основные преимущества новой конструкции по сравнению с традиционными. Предложен метод расчета с учетом геометрической и физической нелинейности в постановке задачи на основании моментной схемы метода конечных элементов.*

**Ключевые слова:** цилиндрический резервуар, оболочечная конструкция, моментная схема метода конечных элементов.

**O. Kordun, Post-graduate**

**LLC «V. Shimanovsky Ukrainian Institute of Steel Construction»**

## **NEW STRUCTURE OF VERTICAL LARGE VOLUME TANK**

*New structure of large volume tank for petroleum products is proposed. The main advantages of new structure in comparison with traditional structures are provided. Design method in geometrical and materially nonlinear formulation on the basis of moment scheme of finite elements method is proposed.*

**Keywords:** cylindrical tank, shell structure, bending moment scheme of finite elements method.