

---

# БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

---

## CONSTRUCTION AND CIVIL ENGINEERING

УДК 624.074.04

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2021.1.7>

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАПРУЖЕНОГО СТАНУ КОРОТКИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ РЕЗЕРВУАРІВ

---

**Смел'янова Т.А.** – кандидат технічних наук,  
старший викладач кафедри будівництва  
Херсонського державного аграрно-економічного університету  
ORCID ID: 0000-0001-5191-8418  
Scopus-Author ID: 57211208602

**Лобанова Т.Ю.** – здобувач вищої освіти другого (магістерського рівня)  
факультету архітектури та будівництва  
Херсонського державного аграрно-економічного університету

*У статті представлено застосування методики розрахунку коротких залізобетонних циліндричних резервуарів, як оболонок обертання, які працюють під дією гідростатичного або рівномірного навантаження з урахуванням крайового ефекту, на основі метода послідовних наближень. Доведено, що запропонований метода послідовних наближень, вживаний при розрахунку нерозрізних балок і рам, істотно спрощує розрахунок коротких залізобетонних циліндричних резервуарів. Наведені загальні вирази для зусиль та деформацій в короткому циліндричному резервуарі, як в безмоментній оболонці обертання, від рівномірно розподіленого навантаження по верхньому краю, від гідростатичного навантаження та власної ваги. Проведене експериментальне дослідження внутрішніх зусиль, що виникають в місці сполучення стінки і днища резервуара при шарнірному закріпленні стінки і днища та при жорсткому закріпленні, при дії гідростатичного навантаження і власної ваги резервуара. Випробування проводилися як при використанні зовнішньої кільцевої сталевий арматури, так і без неї. Проаналізована можливість застосування методу послідовних наближень до розрахунку коротких циліндричних резервуарів, та перевірено, чи доцільно використовувати цей метод при розв'язанні задачі про напружений стан коротких резервуарів, шляхом порівняння теоретичних та експериментальних результатів, а також встановлені границі використання методу до розрахунку коротких циліндричних залізобетонних резервуарів.*

**Ключові слова:** короткий циліндричний резервуар, гідростатичне навантаження, метод послідовних наближень, повне защемлення стінки в днище, пружне защемлення стінки в днище.

---

***Yemelianova T.A., Lobanova T.Yu. Experimental study of stress state parameters of short cylindrical reinforced concrete tank***

*The article presents the application of the calculation method of short reinforced concrete cylindrical tanks as shells of rotation, which work under the action of hydrostatic or uniform load taking into account the edge effect, based on the method of successive approximations. It is proved that the proposed method of successive approximations, used in the calculation of continuous beams and frames, simplifies the calculation of short reinforced concrete cylindrical tanks significantly. General expressions for forces and deformations in a short cylindrical tank as a moment less shell of rotation, from a uniformly distributed load on the upper edge, from a hydrostatic load and from own weights are given. An experimental study of the internal forces arising at the junction of the wall and bottom of the tank during the hinged fixing of the wall and bottom and during rigid fixing, under the action of hydrostatic load and the own weight of the tank are made. The tests were performed both with and without the outer annular steel reinforcement. The possibility of applying the method of successive approximations to the calculation of short cylindrical tanks is analyzed. It is checked whether it is expedient to use this method when solving the problem of stress state of short tanks, by comparing theoretical and experimental results. The limits of use of the method to calculate short cylindrical reinforced concrete tanks are became.*

**Key words:** *short cylindrical tank, hydrostatic loading, method of successive approximations, complete wall clamping in the bottom, elastic wall clamping in the bottom.*

**Постановка проблеми.** В різних галузях сучасної техніки знаходять застосування такі просторові конструкції як циліндричні резервуари. Найбільше поширення у вітчизняній практиці проектування отримали залізобетонні споруди для систем водопостачання і каналізації [1-3]. Цим пояснюється увага, яка приділяється теорії їх розрахунку на міцність і стійкість при статичних і динамічних навантаженнях.

Прагнення до зменшення ваги конструкцій та підвищенню їх якості привело до необхідності широкого використання в процесі проектування сучасних методів розрахунку параметрів напруженого стану, які найбільш повно враховують вимоги роботи конструкцій та фізичні властивості матеріалів [4-7].

Розрахунок циліндричних резервуарів часто буває пов'язаний з математичними труднощами і з великим об'ємом обчислювальних робіт, що є одним з основних перешкод до впровадження цих конструкцій. Тому розроблення методів розрахунку виникаючих зусиль і створення передумов для поліпшення техніко-економічних показників їх впливу, що істотно спрощують розрахунок зазначених резервуарів, є актуальною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класичний розрахунок коротких оболонки за методом сил або деформацій із складанням системи канонічних рівнянь трудомісткий з огляду на різке зростання числа невідомих в порівнянні з розрахунком довгої оболонки; до того ж, вплив сусіднього вузла залежить не тільки від зовнішнього навантаження та від геометрії оболонки, але і від граничних умов в цьому вузлі [7].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є аналіз можливостей застосування методу послідовних наближень до розрахунку коротких циліндричних резервуарів, та перевірити, чи доцільно використовувати цей метод при розв'язанні задачі про напружений стан коротких резервуарів, шляхом порівняння теоретичних та експериментальних результатів, а також встановити границі використання методу до розрахунку коротких циліндричних залізобетонних резервуарів.

Задачу можна спростити, якщо використати форми або складені на їх основі готові таблиці поправочних коефіцієнтів до виведених раніше значень пружних характеристик краю оболонки [8]. Іншим шляхом, спрощення задачі можна отримати використанням методу послідовних наближень.

Для резервуару, як довгої оболонки, визначаються:

а) коефіцієнт гнучкості  $\alpha = \frac{1,31}{\sqrt{r\delta}}$

б) коефіцієнт постелі пружної основи  $\beta = \frac{E\delta}{r^2}$

в) величина горизонтального зміщення  $\xi$  і кута повороту  $\varphi$  від двох одиничних станів: горизонтального розпору  $H = 1$  і моменту  $M = 1$  (рис. 1)

$$\xi_h = \frac{2\alpha}{\beta}; \varphi_h = \xi_m = \frac{2\alpha^2}{\beta}; \varphi_m = \frac{4\alpha^3}{\beta}; \xi_h = \frac{2\alpha}{\beta}; \varphi_h = \xi_m = \frac{2\alpha^2}{\beta}.$$

Для короткої оболонки за умови  $\alpha h < 3$  зміщення в опорному вузлі визначаються з урахуванням поправочних коефіцієнтів [8].

1. Якщо протилежний край вільний:

$$\xi_h = \frac{2\alpha}{\beta} C_1^{(1)} \quad \varphi_h = \xi_m = \frac{2\alpha^2}{\beta} C_2^{(1)} \quad \varphi_m = \frac{4\alpha^3}{\beta} C_3^{(1)}.$$

2. Якщо протилежний край шарнірно опертий:

$$\xi_h = \frac{2\alpha}{\beta} C_1^{(2)} \quad \varphi_h = \xi_m = \frac{2\alpha^2}{\beta} C_2^{(2)} \quad \varphi_m = \frac{4\alpha^3}{\beta} C_3^{(2)}.$$

3. Якщо протилежний край зашкелений:

$$\xi_h = \frac{2\alpha}{\beta} C_1^{(3)} \quad \varphi_h = \xi_m = \frac{2\alpha^2}{\beta} C_2^{(3)} \quad \varphi_m = \frac{4\alpha^3}{\beta} C_3^{(3)}.$$

(індекси  $h$  і  $m$  означають, що переміщення викликані відповідно  $H$  і  $M$ ).

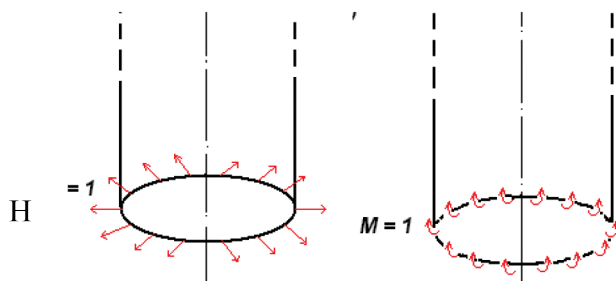


Рис. 1. Два одиничні стани довгої оболонки

Зміщення від навантаження розраховується за формулами: від рівномірно розподіленого навантаження по верхньому краю  $p$ :

$$\xi_p = \frac{p}{\beta r} \mu; \varphi_p = 0;$$

від власної ваги:

$$\xi_p = \frac{g h}{\beta r} \mu; \varphi_p = \frac{g}{\beta r} \mu; \xi_p = \frac{g h}{\beta r} \mu; \varphi_p = \frac{g}{\beta r} \mu;$$

від гідростатичного навантаження:

$$\xi_p = \frac{\gamma h}{\beta}; \varphi_p = \frac{\gamma}{\beta}$$

Згинальний момент та розтягуюче зусилля визначаються за формулами:

$$\bar{M} = \frac{\varphi_h \xi_p - \xi_h \varphi_p}{\xi_h \varphi_m - \varphi_h^2}, \quad \bar{N} = \frac{\xi_m \varphi_p - \varphi_m \xi_p}{\xi_h \varphi_m - \varphi_h^2}$$

Похибка в розрахунках згинального моменту становить 13,8%, а розтягуючі навантаження – 79%. Це пояснюється впливом крайових умов в короткій оболонці, на відміну від довгої, в якій цей вплив не суттєвий [9–11].

На зміну величини зусиль у короткій оболонці, в порівнянні з довгою, істотний вплив роблять не тільки геометричні характеристики, а й вид навантаження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Практична неможливість проведення експериментальних досліджень реальних коротких залізобетонних циліндричних резервуарів призводить до необхідності експериментального вивчення відповідних їм моделей [12].

Виявлення в експерименті нових фактів може мати нелокальний характер лише в тому випадку, коли експериментальне дослідження супроводжується ретельно проведеним теоретичним аналізом.

Обраний для дослідження циліндричний бетонний короткий резервуар складається зі стінки постійної за висотою товщини, жорстко або шарнірно з'єднаної з днищем. В такому резервуарі слід враховувати характер роботи стінки споруди під навантаженням.

Для виконання експерименту було виготовлено 6 форм для приготування коротких бетонних циліндричних резервуарів, що відповідають умові коротких оболонок обертання  $ah < 3$ , де  $a$  – коефіцієнт гнучкості,  $h$  – висота стінки резервуара (рис.2,3).



Рис. 2. Виготовлення днища резервуару



Рис. 3. Зразки набирають міцність

Першим етапом у методиці досліджень є ідеалізація матеріалу конструкції, вірніше набору його фізико-механічних параметрів [13]. Найчастіше матеріал наділяється властивостями ідеальної пружності або пластичності. Значення параметрів, що характеризують властивості матеріалу (модуль пружності  $E$ , коефіцієнт Пуассона  $\mu$ ) приймаємо за довідковими значеннями і припускаємо однаковими по всьому спорудженню. Бетонну суміш для зразків підбираємо за ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони: Методи визначення міцності по контрольним зразкам.

Навантаження на резервуар є однією з найменш вивчених компонентів, мають велику мінливість в часі і просторі, і ті розрахункові моделі, якими оперує проектна практика, досить умовні. Деякі з моделей навантаження, які використовуємо при складанні розрахункової моделі (рівномірно розподілене навантаження та зосереджена сила), є сильними фізичними абстракціями, про що треба пам'ятати при аналізі результатів розрахунку.

*Постановка експерименту.* З урахуванням того, що експериментальне дослідження коротких циліндричних резервуарів в значній мірі відстає від досліджень інших видів конструкцій, і точне рішення задачі про напружений стан таких резервуарів пов'язано з використанням складного математичного апарату, головна роль в роботі приділяється фізичному експерименту.

Метою випробувань є визначення внутрішніх зусиль у небезпечному місці короткого резервуара, який визначає напружений стан резервуара, а також чисельна оцінка їх впливу на характер руйнування. Було обрано два напрями – дослідження на основі фізичного експерименту і дослідження на основі чисельних методів будівельної механіки.

Програма досліджень полягає в наступному:

1. Дослідження внутрішніх зусиль, що виникають в місці сполучення стінки і днища резервуара, при шарнірному закріпленні стінки і днища та при жорсткому закріпленні стінки з днищем при дії гідростатичного навантаження і власної ваги резервуара.

2. Дослідження внутрішніх зусиль, що виникають в місці сполучення стінки і днища резервуара, при шарнірному закріпленні стінки і днища та при жорсткому закріпленні стінки з днищем при дії гідростатичного навантаження і власної ваги резервуара при використанні зовнішньої кільцевої сталеві арматури.

Експериментальні дослідження проводилися в лабораторії з контролю виробництва ДП «Херсонський облавтодор», яка атестована на підставі Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність», відповідає критеріям атестації вимірювальних лабораторій відповідно до «Правил уповноваження та атестації у державній метрологічній системі».

В якості досліджуваних елементів були прийняті короткі бетонні циліндричні резервуари в кількості 6 шт. з однаковими розмірами (рис.4,5,6). Геометричні розміри резервуарів: висота резервуара –  $h = 9$  см, діаметр резервуара –  $d = 32$  см, товщина стінки резервуара –  $\delta = 1$  см.

Зразки № 1, 2, 3 були виконані з шарнірним закріпленням стінки з днищем. Зразок № 2 випробовувався під дією тільки власної ваги, зразки № 1,3 – під дією власної ваги і гідростатичного тиску води.

Зразки № 4, 5, 6 були виконані з жорстким закріпленням стінок резервуара з днищем. Зразок № 4 випробовувався під дією тільки власної ваги, зразки № 5,6 – під дією власної ваги і гідростатичного тиску води.

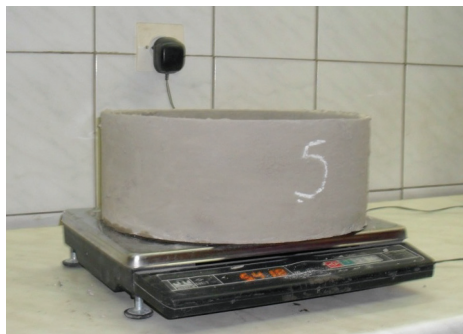
Зразки № 1, 3, 6 випробовувалися з використанням зовнішньої кільцевої сталеві арматури у вигляді хомутів з розмірами прямокутного поперечного перерізу  $1\text{ мм} \times 9\text{ мм}$ , розташованих рівномірно по висоті резервуара. Крок для всіх хомутів приймався однаковим і рівним 2 см.

Для проведення випробувань коротких циліндричних бетонних зразків на стиск використовувався прес лабораторний випробувальний гідравлічний МС-1000 (рис. 7), призначений для випробувань зразків виробів будівельних матеріалів на стиск та перевірку стандартних зразків бетонів по ГОСТ 10180, цегли та інших будівельних матеріалів по ГОСТ 12801, ISO 9001, ASTM C 109, ASTM C 39, EN 196-1, DIN 18501, DIN 51200, DIN 51223 і ін.

*Проведення випробувань.* Зразок-резервуар встановлювався на плиту преса і центрувався з фізичною віссю. Плита преса повинна всією площиною примикати до поверхні днища зразка. Граничне (руйнівне) навантаження знімаємо за показання фіксуючої стрілки. Момент руйнування зразка визначаємо по початку зворотного руху вказівної стрілки сило вимірювача при працюючому навантажувальному пристрої. Випробування зразків та характер їх руйнування показані на рис. 8-11.



*Рис. 4. Зразок № 1 з шарнірним закріпленням стінки з днищем*



*Рис. 5. Зразок № 5 з жорстким закріпленням стінок резервуара з днищем*



*Рис. 6. Зразок № 6 з жорстким закріпленням стінки з днищем та з використанням зовнішньої кільцевої сталеві арматури*



*Рис. 7. Прес лабораторний випробувальний гідравлічний MS-1000*



Рис. 8. Випробування зразка № 1



Рис. 9. Випробування зразка № 2 та характер руйнування



Рис. 10. Характер руйнування зразка № 4



Рис. 11. Випробування зразка № 5 під гідростатичним тиском

*Обробка отриманих експериментальних результатів.* Від внутрішнього гідростатичного тиску рідини стінки резервуара працюють на осьовий розтяг. Згинальні моменти виникають тільки в місцях сполучення стінки з днищем.

Гідростатичний тиск рідини на стінки круглого резервуара із збільшенням глибини зростає за лінійним законом та викликає в стінці кільцеве розтяжне зусилля  $H$ , значення якого визначається з умови рівноваги напівкільця. Стінка є осесиметричною циліндричною оболонкою і зусилля в ній можуть бути визначені за загальними формулами розрахунку тонкостінних циліндричних оболонок.

З достатньою точністю зусилля  $M$ ,  $H$  в перетинах стінки можна визначити, якщо розглянути умовно вирізану з оболонки вертикальну смугу шириною 1 м, защемлену внизу, завантажену гідростатичним тиском і підперту по всій довжині пружними силами – радіальними складовими кільцевого зусилля  $H$ . Прогин цієї смуги пропорційний пружному опору. У розрахунковій схемі таку смугу можна представити як балку на пружній основі (рис.12).

З рішень диференціальних рівнянь згину балки на пружній основі із защемленим кінцем, виходять формули для визначення розрахункових зусиль.

$$\bar{M} = \frac{r(-1 + h\alpha)\gamma - q\mu + (P + hq)\alpha\mu}{2r\alpha^3}$$

$$\bar{H} = \frac{r(\gamma - 2h\alpha\gamma) + (q - 2(P + hq)\alpha)\mu}{2r\alpha^2}$$

де:  $\beta$  – коефіцієнт постели пружної основи, кг/см<sup>2</sup>;  $\alpha$  – коефіцієнт гнучкості, см<sup>-1</sup>;  $q$  – питома вага бетону,  $q=20 \cdot 10^{-4}$  кг/см<sup>2</sup>;  $P$  – руйнівне навантаження;  $\gamma$  – питома вага води,  $\gamma=10^{-3}$  кг/см<sup>3</sup>;  $E$  – модуль пружності бетону,  $E=2,1 \cdot 10^5$  кг/см<sup>2</sup>;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона,  $\mu=0,16$  для бетону.

Порівняння отриманих експериментальних результатів з теоретичними. У даній роботі експеримент є засобом перевірки теоретичного рішення задачі про напружений стан коротких циліндричних залізобетонних резервуарів при дії гідростатичного навантаження. Результати обробки експерименту занесені в таблиці 1.

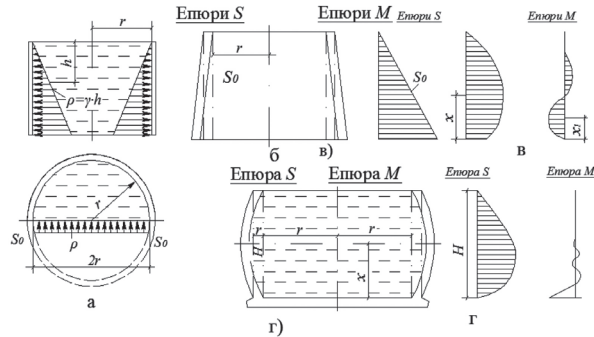


Рис. 12. До розрахунків циліндричних резервуарів:

а – визначення кільцевих розтягуючих зусиль у циліндричній стінці; б – переміщення стінки, не пов’язаної з днищем, від гідростатичного тиску рідини; в – епюра кільцевих зусиль і згинальних моментів у стінці, шарнірно пов’язаною з днищем, при урахуванні сил тертя; г – переміщення стінки, жорстко пов’язаної з днищем; епюри кільцевих зусиль  $S$  і згинальних моментів  $M$  у стінці.

Таблиця 1

Результати обробки експерименту

№ зразка	Умова закріплення	Навантаження	Руйнівне навантаження, кг	Зусилля в момент руйнування	Експериментальні значення $M$ , кгсм/см, $N$ кг/см
1	Шарнірне обпирання (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	1400	М	+66,27
				Н	-43,23
2	Шарнірне обпирання	власна вага	250	М	+11,83
				Н	-7,72
3	Шарнірне обпирання (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	1800	М	+85,20
				Н	-55,60
4	Жорстке закріплення	власна вага	750	М	+35,49
				Н	-23,15
5	Жорстке закріплення	гідростатичне, власна вага	400	М	+18,95
				Н	-12,34
6	Жорстке закріплення (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	2400	М	+113,59
				Н	-74,10



Відсоток розбіжності результатів, отриманих експериментальним шляхом, з теоретичними знаходяться в межах від 2,21% до 2,58%, що менше допустимих 5%. Це пояснюється деякою ідеалізацією розрахункової схеми при теоретичних розрахунках, а також межами допустимої похибки вимірювання навантаження і підтримки швидкості навантаження до руйнівного навантаження зразка при випробуваннях. Результати порівняння експериментальних даних з теоретичними наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

### Порівняння експериментальних результатів з теоретичними

№ зразка	Умова закріплення	Навантаження	Руйнівне навантаження кг	Зусилля в момент руйнування	Експериментальні значення М кгсм/см, Н кг/см	Теоретичні значення М кгсм/см, Н кг/см	% похибки
1	Шарнірне обпирання (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	1400	М	+66,27	+64,63	2,39
				Н	-43,23	-42,16	2,41
2	Шарнірне обпирання	власна вага	250	М	+11,83	+11,54	2,44
				Н	-7,72	-7,52	2,58
3	Шарнірне обпирання (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	1800	М	+85,2	83,09	2,38
				Н	-55,6	-54,2	2,51
4	Жорстке закріплення	власна вага	750	М	+35,49	+34,61	2,21
				Н	-23,15	-22,57	2,50
5	Жорстке закріплення	гідростатичне, власна вага	400	М	+18,95	+18,48	2,42
				Н	-12,34	-12,06	2,58
6	Жорстке закріплення (підкріплена хомутами)	гідростатичне, власна вага	2400	М	+113,59	+110,77	2,46
				Н	-74,10	-72,26	2,48

Для зразка № 5 під дією гідростатичного навантаження та власної ваги при жорсткому закріпленню стінок з днищем виконувалося порівняння експериментальних даних з результатами теоретичних розрахунків за методом послідовних наближень (табл. 3).

Похибка між експериментальними значеннями внутрішніх зусиль та значеннями, отриманими за методом послідовних наближень, склала приблизно 1,3%, що значно менше допустимих 5%. Це підтверджує можливість використання зазначеного методу при розрахунку коротких циліндричних резервуарів.

Ця невідповідність також посилюється особливостями поведінки бетону під навантаженням. Такі явища, як силова анізотропія, зміцнення бетону і істотна відмінність в міцності на стиск і розтяг не дозволяють розробити єдиного коректного критерію міцності для всіх напружених станів таких конструкцій.

Однозначно, використання зовнішньої кільцевої сталевий арматури є дуже доцільним. Так наприклад, за отриманими результатами згинальний момент

в місцях сполучення стінок із днищем при жорсткому їх затисканні підвищується на 78%, а окружне розтяжне зусилля – на 83%. Це значно знижує тріщиностійкість стінок і зменшує витрати бетону за рахунок використання високоміцних матеріалів.

Таблиця 3

**Порівняння експериментальних даних з результатами теоретичних розрахунків за методом послідовних наближень**

№ зразка	Руйнівне навантаження, кг	Зусилля в момент руйнування	Експериментальні значення, М кгсм/см, Н кг/см	Теоретичні значення М кгсм/см, Н кг/см	Значення за методом послідовних наближень	% похибки
5	400	М	+18,95	+18,48	+18,73	1,2
		Н	-12,34	-12,06	-12,15	1,5

**Висновки і пропозиції.** Проведені випробування дозволяють зробити наступні висновки. При жорсткому защемленні стінки з днищем за відсутності гідростатичного навантаження величина моменту підвищується на 60%, значення внутрішнього кільцевого зусилля – на 63% порівняно з шарнірним обпиранням стінки з днищем. При дії гідростатичного навантаження в резервуарі з жорстким закріпленням значення моменту знизилося на 46%, а значення внутрішнього кільцевого зусилля – на 40%. Похибка в межах допустимих 5% між експериментальними значеннями внутрішніх зусиль та значеннями, отриманими за методом послідовних наближень підтверджує можливість використання зазначеного методу при розрахунку коротких циліндричних резервуарів.

**СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:**

1. Бессонов В.С. Вертикальный резервуар большой емкости. *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1983. № 2. С. 5–8.
2. Кондаков Г.П. Проблемы отечественного резервуаростроения и возможные пути их решения. *Промышленное и гражданское строительство*. 1988. № 5. С. 24–26.
3. Кулахметьев Р.Р. Предельные состояния и срок службы резервуаров. *Промышленное и гражданское строительство*. 2003. № 6. С. 28–30.
4. Овечкин А.М. Расчет железобетонных осесимметричных конструкций (оболочек). Москва : Госстройиздат. 1961.
5. Соболев Ю.В., Купрейшвили С.М. Проектирование металлических вертикальных цилиндрических резервуаров минимальной массы. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 1. С. 17–20.
6. Кабриц С.А., Михайловский Е.И., Товстик П.Е., Черных К.Ф., Шамина В.А. Общая нелинейная теория упругих оболочек / Под ред. Черных К.Ф., Кабрица С.А. Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербур. ун-та, 2002. 388 с.
7. Байков В.Н. Проектирование железобетонных тонкостенных пространственных конструкций. Москва : Стройиздат. 1990. 230 с.
8. Никиреев В.М., Шадурский В.Л. Практические методы расчета оболочек. Москва : Издательство литературы по строительству. 1966. 270 с.
9. Грудев И.Д. Нелинейный краевой эффект в вертикальном цилиндрическом резервуаре. *Промышленное и гражданское строительство*. 1999. № 5. С. 23–24.
10. Нехаев Г.А. К вопросу о расчете сопряжения стенки с днищем вертикального цилиндрического резервуара. *Известия Тульского государственного*

университета. Серия «Технология, механика и долговечность строительных материалов, конструкций и сооружений». 2002. № 3. С. 127–131.

11. Соболев Ю.В. К расчету узла сопряжения стенки с днищем металлического цилиндрического резервуара. *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1986. № 1. С. 13–18.

12. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. Киев : Изд-во «Сталь». 2002. 600 с.

13. ДСТУ Б В.2.7-214:2009. Бетони : Методи визначення міцності по контрольним зразкам. 2010.

#### REFERENCES:

1. Bessonov V.S. (1983) Vertikal'nyy rezervuar bol'shoy yemkosti. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. № 2. P. 5–8.

2. Kondakov G.P. (1988) Problemy otechestvennogo rezervuarostroyeniya i vozmozhnyye puti ikh resheniya. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. № 5. P. 24–26.

3. Kulakhmet'yev R.R. (2003) Predel'nyye sostoyaniya i srok sluzhby rezervuarov. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. №6. P. 28–30.

4. Ovechkin A.M. (1961) Raschet zhelezobetonnykh osesimmetrichnykh konstruksiy (obolochek). Moscow : Gosstroyizdat.

5. Sobolev YU.V., Kupreyshvili S.M. (1986) Proyektirovaniye metallicheskiykh vertikal'nykh tsilindricheskikh rezervuarov minimal'noy massy. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. № 1. P. 17–20.

6. Kabrits S.A., Mikhaylovskiy Ye.I., Tovstik P.Ye., Chernykh K.F., Shamina V.A. (2002) Obshchaya nelineynaya teoriya uprugikh obolochek / Pod red. Chernykh K. F., Kabritsa S. A. SPb.: Izd-vo S.-Peterb. un-ta, 388 s.

7. Baykov V.N. (1990) Proyektirovaniye zhelezobetonnykh tonkostennykh prostranstvennykh konstruksiy. Moscow : Stroyizdat. 230 s.

8. Nikireyev V.M., Shadurskiy V.L. (1966) Prakticheskiye metody rascheta obolochek. Moscow : Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvo. 270 s.

9. Grudev I.D. (1999) Nelineynyy krayevoy effekt v vertikal'nom tsilindricheskom rezervuare. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. № 5. P. 23–24.

10. Nekhayev G.A. (2002) K voprosu o raschete sopryazheniya stenki s dnishchem vertikal'nogo tsilindricheskogo rezervuara. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Tekhnologiya, mekhanika i dolgovечnost' stroitel'nykh materialov, konstruksiy i sooruzheniy"*. № 3. P. 127–131.

11. Sobolev YU.V. (1986) K raschetu uzla sopryazheniya stenki s dnishchem metallicheskogo tsilindricheskogo rezervuara. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. № 1. P. 13–18.

12. Perel'muter A. V., Slivker V. I. (2002) Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnosti ikh analiza. Kiyev: Izd-vo "Stal". 600 s. [in Ukrainian]

13. DSTU B V.2.7-214:2009. (2010) Betony : Metody vyznachennya mitsnosti po kontrol'nym zrazkam [in Ukrainian].