
ГІДРОТЕХНІЧНЕ БУДІВНИЦТВО, ВОДНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ВОДНІ ТЕХНОЛОГІЇ

HYDRAULIC CONSTRUCTION,
WATER ENGINEERING AND WATER TECHNOLOGIES

УДК 624.074.04

DOI <https://doi.org/10.32851/tnv-tech.2022.2.6>

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ НЕСУЧОЇ ЗДАТНОСТІ КОРОТКОГО ЦИЛІНДРИЧНОГО РЕЗЕРВУАРУ З ГНУЧКИМ ДНИЩЕМ НА ЖОРСТКІЙ ОСНОВІ

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

Ворона А. Р. – студентка факультету архітектури та будівництва
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0003-3373-4003

У статті представлено застосування метода розподілення моментів на основі поєднання моментної та безмоментної теорій, до розрахунку короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі під дією гідростатичного або рівномірного навантаження.

Обґрунтовано, що наближений розрахунок коротких циліндричних резервуарів, як осесиметричних задач, зводиться до розрахунку балки – смужки на пружній основі зі змінним коефіцієнтом постелі. Показано, що для циліндра зусилля і деформації від крайового ефекту можуть бути представлені у вигляді функцій від рівномірно розподілених моментів і поперечних сил, що діють по краю оболонки. Доведено, що за допомогою пружних коефіцієнтів можна в простій формі виразити значення реакцій стінок циліндричних резервуарів, викликані різного вигляду навантаженнями за різних граничних умов.

Проаналізована можливість застосування методу розподілу моментів до розрахунку коротких циліндричних резервуарів з гнучким днищем на жорсткій основі під дією гідростатичного або рівномірного навантаження. Доведено, що урахування гнучкості днища при жорсткій основі призводить до більш раціонального проектування. На основі отриманої методики виконано практичний розрахунок циліндричного сталевого резервуару при гідростатичному навантаженні на масивній бетонній основі.

Розроблена комп'ютерна програма для розрахунку короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі. Комп'ютерна програма містить алгоритм визначення зусиль, що виникають у місті сполучення стінки резервуару з днищем, побудований на запропонованій математичній моделі розподілення моментів.

Програма призначена для дослідження несучої здатності коротких циліндричних резервуарів з плоским гнучким днищем на жорсткій основі, як оболонки обертання з урахуванням крайового ефекту, які працюють під дією гідростатичного або рівномірного навантаження, з урахуванням факторів геометричної і фізичної нелінійності.

Ключові слова: короткій циліндричний резервуар, гідростатичне навантаження, метод розподілення моментів, пружне заземлення стінки в днище, гнучке днище на жорсткій основі, крайовий ефект.

Yemelianova T. A., Vorona A. R. Computer simulation of the carrying capacity of a short cylindrical tank with a flexible bottom on a rigid base

The article presents the application of the method of moment distribution based on a combination of moment and moment less theories to the calculation of a short cylindrical tank with a flexible bottom on a rigid basis under the action of hydrostatic or uniform load.

The approximate calculation of short cylindrical tanks, as axisymmetric problems, is reduced to the calculation of beams – strips on an elastic basis with a variable modulus of the elastic foundation are substantiated. The forces and deformations for a cylinder from the edge effect can be represented as functions of uniformly distributed moments and transverse forces acting on the edge of the shell is shown. It is proved the values of the reactions of the walls of cylindrical tanks in a simple form caused by different types of loads under different boundary conditions it is possible to express with the help of elastic coefficients.

The possibility of applying the method of moment distribution to the calculation of short cylindrical tanks with a flexible bottom on a rigid basis under the action of hydrostatic or uniform load is analyzed. It is proved that taking into account the flexibility of the bottom with a rigid base leads to a more rational design. On the basis of the received technique the practical calculation of the cylindrical steel tank at hydrostatic loading on a massive concrete basis is executed.

A computer program has been developed to calculate a short cylindrical tank with a flexible bottom on a rigid base. The computer program contains an algorithm for determining the forces arising in the place of connection of the tank wall with the bottom, based on the proposed mathematical model of the distribution of moments.

The program is designed to study the load-bearing capacity of short cylindrical tanks with a flat flexible bottom on a rigid base, as shells rotating with the edge effect, operating under hydrostatic or uniform load, taking into account factors of geometric and physical nonlinearity.

Key words: short cylindrical tank, hydrostatic loading, method of distribution of moments, elastic clamping of a wall in the bottom, flexible bottom on a rigid basis, edge effect.

Постановка проблеми. Застосування коротких циліндричних резервуарів в будівництві отримало значний розвиток з тих пір, як були створені теоретичні основи для визначення їх несучої здатності, розроблені методи розрахунку виникаючих зусиль і створені технологічні передумови для поліпшення техніко-економічних показників [1, 2, 3].

Круглі в плані резервуари можна розглядати як циліндричні оболонки із застосуванням безмоментної теорії з врахуванням крайового ефекту в місцях сполучення стін з днищем [4, 5, 6]. Доведено, що запропонований метод розподілення моментів на основі поєднання моментної та безмоментної теорій, вживаний при розрахунку нерозрізних балок і рам, істотно спрощує розрахунок коротких циліндричних резервуарів [7, с. 51].

Розрахунок несучої здатності циліндричних резервуарів пов'язаний з великим об'ємом математичних розрахунків. Сучасні програмні комплекси розрахунку оболонки обертання, розраховані на вирішення широкого кола завдань, не можуть з достатнім ступенем точності проводити дослідження несучої здатності зазначених оболонки з урахуванням різних граничних умов [8, 9]. Тому розроблення комп'ютерних програм, які істотно спрощують розрахунок зазначених оболонки, є актуальною задачею.

Мета дослідження. Проаналізувати можливість застосування методу розподілення моментів до розрахунку коротких циліндричних резервуарів з гнучким днищем на жорсткій основі та розробити комп'ютерну програму для розрахунку

короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі, яка містить алгоритм визначення зусиль, що виникають у місці сполучення стіни з днищем, побудований на запропонованій математичній моделі розподілення моментів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зусилля і деформації в довільній точці циліндричного резервуару можуть бути отримані складанням відповідних значень від безмоментного стану і від крайового ефекту (рис. 1).

Для циліндра зусилля і деформації від крайового ефекту можуть бути представлені у вигляді функцій від рівномірно розподілених моментів і поперечних сил, що діють по краю оболонки [10, 11]; ця залежність відома з теорії балки на пружній основі з постійним коефіцієнтом постелі, по краю якої діють момент і зосереджена сила.

Наближений розрахунок коротких циліндричних резервуарів, як осесиметричних задач, зводяться до розрахунку балки – смужки на пружній основі зі змінним коефіцієнтом постелі. За висотою резервуар розбивається на декілька не дуже коротких елементів – кільць та підбираються по кожній лінії перерізу («вузлу») замінюючі сферичні оболонки з відповідними θ і R . Обчислюються їх характеристики. Моменти і зусилля визначаються шляхом розподілу моментів за лініями перерізів. При визначенні моментів, зусиль і деформацій між окремими лініями перерізів («вузлами») коефіцієнт постелі приймається постійним.

За допомогою пружних коефіцієнтів можна в простій формі виразити значення реакцій стінок циліндричних резервуарів, викликані різного вигляду навантаженнями за різних граничних умов [12].

В роботі [7] проаналізована можливість застосування зазначеного методу 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.

Виклад основного матеріалу дослідження. Робота днища наближається до схеми гнучкої плити на жорсткій основі, якщо воно, наприклад, виконане з листової сталі і резервуар покоїться на масивній (наприклад бетонній) основі. Вузловий момент може істотно відрізнятись від моменту затискання стінки і, як правило, має менше значення. Задача може бути вирішена заміною круглої плити короткою балкою на двох опорах, що розраховується засобами елементарної статyki [13].

Під дією гідростатичного тиску на стінку вузол повертається і днище відстає від жорсткої основи; з іншого боку, тиск рідини на дно прагне притиснути його до основи (рис. 2).

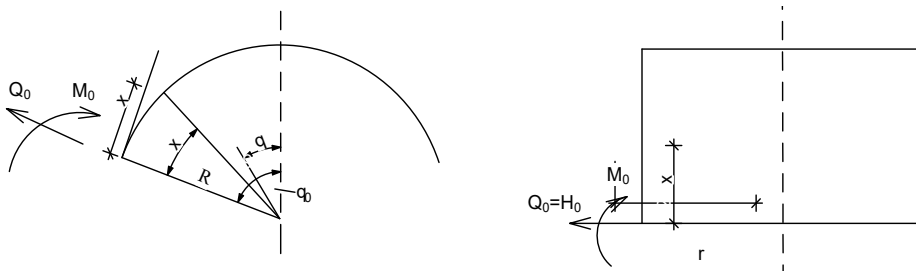


Рис. 1. Розрахункова схема для визначення зусиль і деформацій в довільній точці короткого резервуару

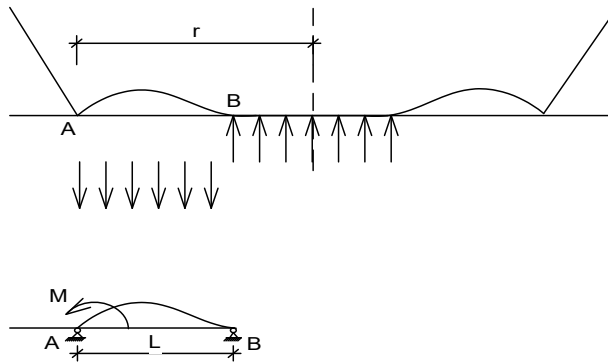


Рис. 2. Розрахункова схема напружено-деформованого стану днища

Невідому довжину ділянки відставання днища, яка замінюється балкою на двох опорах, а також величину вузлового моменту можна знайти з умови, що кут повороту опори В під дією рівномірно розподіленого навантаження p і моменту M у вузлу А рівний нулю. Замінімо жорсткість EI балки циліндричною жорсткістю

$$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}.$$

Визначимо кути повороту балки як ділені на D «реакції» від епюри моментів:

$$"A" = \frac{1}{3}Ml - \frac{pl^3}{24}; \quad "B" = \frac{1}{6}Ml - \frac{pl^3}{24}.$$

З умови «В» = 0, отримуємо

$$l = 2\sqrt{\frac{M}{p}}. \quad (1)$$

Кут повороту

$$-\varphi = \frac{"A"}{D} = \frac{1}{D}\left(\frac{Ml}{3} - \frac{pl^3}{24}\right)$$

або, підставивши (1):

$$-\varphi = \frac{1}{3D}\sqrt{\frac{M^3}{p}}. \quad (2)$$

Умови спільності відповідно лінійній і кутовій деформації стінки і днища дозволяють скласти два рівняння для визначення M і H в нижньому вузлі стінки; нехтуючи лінійною деформацією днища, отримаємо:

$$\left. \begin{aligned} \xi_{hCT} H + \xi_{mCT} M + \xi_{pCT} &= 0; \\ \varphi_{hCT} H + \varphi_{mCT} M + \varphi_{pCT} &= \varphi_{дн} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Значення ξ і φ визначені формулами [7, с. 44]:

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

Система рівняння (3) вирішується шляхом підбору.

На основі отриманої методики розрахунку короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі, яка побудована на запропонованому методі поєднання моментної та безмоментної теорій, виконано практичний розрахунок циліндричного сталевого резервуару при гідростатичному навантаженні на масивній бетонній основі [14].

Розрахунок зусиль, що виникають у місці сполучення стіни з днищем (рис. 3), момент M і распор H в нижньому вузлу стінки, визначалися при зазначених вихідних даних: $r = 6$ м; $h = 10$ м; $E = 210000$ кг/см²; $\mu = 0,3$; $\gamma = 1000$ кг/см³ = $1 \cdot 10^{-3}$ кг/см³; $\delta_{ст} = 8$ мм; $\delta_{дн} = 8$ мм.

Згідно [7, с. 44] коефіцієнт гнучкості та коефіцієнт постелі для стінки резервуара визначалися за формулами:

$$\alpha = \frac{1,29}{\sqrt{r \cdot \delta}} \quad \alpha = \frac{1,29}{\sqrt{600 \cdot 0,08}} = 5,888 \cdot 10^{-2} \text{ см}^{-1};$$

$$\beta = \frac{E\delta}{r^2} = \frac{210000 \cdot 0,8}{6^2 \cdot 10^4} = 4,667 \text{ кг/см}^3$$

Пружні характеристики визначаємо за формулами (4).

Для приблизної оцінки M і H визначимо їх значення для випадку затискання низу стінки [7, с. 44]:

$$\overline{M}_{cm} = \gamma \frac{\alpha h - 1}{2\alpha^3} = 141,8 \approx 142 \text{ кгсм/см}$$

$$\overline{H}_{cm} = -\gamma \frac{2\alpha h - 1}{2\alpha^2} = -16,8 \text{ кгсм/см}$$

Для днища по формулі (2):

$$-\varphi = \frac{1}{3D} \sqrt{\frac{M_3}{p}} = 0,3385 \cdot 10^{-5} \sqrt{M^3},$$

$$\text{де } \frac{1}{3D} = \frac{4(1-\mu^2)}{E\delta^3} = \frac{4 \cdot 0,91}{2,1 \cdot 10^6 \cdot 8^3} = 0,3385 \cdot 10^{-5}, \quad p = 10000 \text{ кг/м}^2.$$

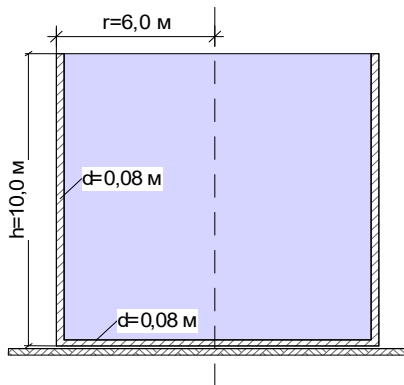


Рис. 3. Схема циліндричного резервуара з гнучким днищем на жорсткій основі

Підставимо знайдені значення в (3)

$$2,523 \cdot 10^{-2} H + 0,149 \cdot 10^{-2} M + 21,429 \cdot 10^{-2} = 0.$$

Звідси $H = -0,059$, $M = -8,493$.

Підставимо в друге рівняння системи (3)

$$-0,879 \cdot 10^{-4} M - 126,54 \cdot 10^{-4} + 1,75 \cdot 10^{-4} M + 0,03385 \cdot 10^{-4} \sqrt{M^3} + 2,14 \cdot 10^{-4} = 0$$

$$\text{або } 0,871M + 0,03385\sqrt{M^3} = 124,4.$$

Визначаємо M шляхом підбору. Відомо, що $M < 142$. Почнемо підбір із значення $M = 100$ кг см/см.

$$M = 100 \cdot 87,1 + 33,9 = 121;$$

$$M = 102 \cdot 88,8 + 34,9 = 123,7;$$

$$M = 103 \cdot 89,7 + 35,4 = 125,1;$$

$$M = 102,5 \cdot 89,3 + 35,1 = 124,4.$$

Звідси витікає, що $M = 102,5$ кг см/см.

$$H = -0,059 \cdot 102,5 - 8,49 = -14,54 \text{ кг/см.}$$

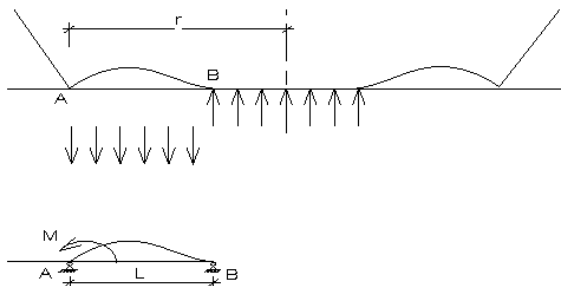
Згідно виразу (1)

$$l = 2\sqrt{\frac{M}{p}} = 2\sqrt{\frac{102,5}{1}} = 20,5 \text{ см.}$$

В комп'ютерному середовищі Wolfram Mathematica 11.0 [15] розроблена комп'ютерна програма для розрахунку резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі, що містить алгоритм визначення зусиль, що виникають у місті сполучення стіни з днищем, побудований на запропонованій математичній моделі.

Програма призначена для дослідження несучої здатності коротких циліндричних резервуарів з плоским гнучким днищем на жорсткій основі, як оболонок обертання з урахуванням крайового ефекту, які працюють під дією гідростатичного або рівномірного навантаження, з урахуванням факторів геометричної і фізичної нелінійності.

Програма для розрахунку резервуара з плоским гнучким днищем на жорсткій основі



Позначено : h - висота циліндричної частини резервуару ;

x_k - відстань від верхнього краю резервуару до рухоного вузла ; γ - питома вага води ;

E - модуль пружності І роду сталі ; δ_k - товщина стінки циліндричної частини резервуару ;

r - радіус циліндричної частини резервуару ; μ - коефіцієнт Пуассона ;

I - згинальна жорсткість кільцевої частини резервуару;
 F - приведена площа перерізу кільцевої частини резервуару;
 δ_y - товщина стінки конусної частини резервуару; r_y - радіус конусної частини резервуару;
 θ - кут між радіусом r та дотичною до меридіану в рухоному вузлі;
 x_y - відстань від вершини конусу резервуару до рухоного вузла;
 h_y - висота усіченої частини конуса;
 q - власна вага конусної частини резервуару.

Частина I. Наближений розрахунок моментів заземлення та згинальних жорсткостей :

$J = \{h \rightarrow 1000, y \rightarrow 1 \times 10^{-3}, E \rightarrow 2.1 \times 10^6, \delta_c \rightarrow 8 \times 10^{-1}, \delta_n \rightarrow 8 \times 10^{-1}, r \rightarrow 600, \mu \rightarrow 0.3, p \rightarrow 1\};$

$B = \text{ReplaceAll}[\{\beta \rightarrow \frac{E \delta_c}{r^2}, \alpha \rightarrow \frac{1.29}{\sqrt{r \delta_c}}\}, J]; B = \text{ReplaceAll}[\{\alpha^2, \alpha^3, \alpha^4\}, B];$

$W = \text{ReplaceAll}[\{\xi_n \rightarrow \frac{2 \alpha}{\beta}, \xi_m \rightarrow \frac{2 \alpha^2}{\beta}, \xi_p \rightarrow \frac{y h}{\beta}\}, J]; z = \text{ReplaceAll}[W, B];$

$Z = \text{ReplaceAll}[\{\phi_n \rightarrow \frac{2 \alpha^2}{\beta}, \phi_m \rightarrow \frac{4 \alpha^3}{\beta}, \phi_p \rightarrow \frac{y}{\beta}\}, B]; u = \text{ReplaceAll}[Z, J];$

$U = \text{ReplaceAll}[\{\bar{M}_{CT} \rightarrow y \times \frac{(\alpha h - 1)}{2 \alpha^3}, \bar{H}_{CT} \rightarrow -y \times \frac{(2 \alpha h - 1)}{2 \alpha^2}\}, J]; G = \text{ReplaceAll}[U, B];$

$\Gamma = \text{ReplaceAll}[d \rightarrow \frac{4(1 - \mu^2)}{E \delta_n^3}, J]; r = \text{ReplaceAll}[\theta \rightarrow d \sqrt{\frac{M^3}{p}}, \Gamma];$

$B = \text{ReplaceAll}[\xi_n H + \xi_m M + \xi_p = 0, z]; \mathcal{B} = \text{Solve}[B, H]; W = \text{Simplify}[\mathcal{B}];$

$y = \text{ReplaceAll}[\phi_n H + \phi_m M + \phi_p + \theta = 0, u]; V = \text{ReplaceAll}[y, r]; Y = \text{ReplaceAll}[V, J];$

$w = \text{ReplaceAll}[Y, W]; f = \text{Simplify}[w]; \{G, f, \mathcal{B}\}$

$\{\{\bar{M}_{CT} \rightarrow 141.773, \bar{H}_{CT} \rightarrow -16.8394\},$

$\{25.8415 M + 1. \sqrt{M^3} = 3663.62\}, \{(H \rightarrow 39.6285 (-0.214286 - 0.0014858 M))\}\}$

$B = \text{ReplaceAll}[\xi_n H + \xi_m M + \xi_p = 0, z]; \mathcal{B} = \text{Solve}[B, H]; W = \text{Simplify}[\mathcal{B}];$

$y = \text{ReplaceAll}[\phi_n H + \phi_m M + \phi_p + \theta = 0, u]; V = \text{ReplaceAll}[y, r]; Y = \text{ReplaceAll}[V, J];$

$w = \text{ReplaceAll}[Y, W]; f = \text{Simplify}[w]; \{G, f, \mathcal{B}\}$

$\{\{\bar{M}_{CT} \rightarrow 141.773, \bar{H}_{CT} \rightarrow -16.8394\},$

$\{25.8415 M + 1. \sqrt{M^3} = 3663.62\}, \{(H \rightarrow 39.6285 (-0.214286 - 0.0014858 M))\}\}$

Частина II. Визначення моменту M методом підбору

$\text{Do}[\text{Print}[25.84153822523533` M + 0.9999999999999999` \sqrt{M^3} - 3663.6242594197674`, M],$

$\{M, 101.942, 101.943, 0.0001\}]$

-0.015198101.942

Частина III. Визначення моментів M і H та невідомої довжини отставання днища

$J = \{M \rightarrow 101.942, h \rightarrow 1000, y \rightarrow 1 \times 10^{-3}, E \rightarrow 2.1 \times 10^6, \delta_c \rightarrow 8 \times 10^{-1}, \delta_n \rightarrow 8 \times 10^{-1},$

$r \rightarrow 600, \mu \rightarrow 0.3, p \rightarrow 1\};$

$q =$

$\text{ReplaceAll}[H \rightarrow 39.62850545257016` (-0.21428571428571427` - 0.0014858035714285713` M),$

$J]; q = \text{ReplaceAll}[1 \rightarrow 2 \sqrt{\frac{M}{p}}, J]; i = \text{ReplaceAll}[M \rightarrow M, J]; \{i, q, q\}$

$\{M \rightarrow 101.942, H \rightarrow -14.4942, 1 \rightarrow 20.1933\}$

Висновки і пропозиції. Проаналізована можливість застосування методу розподілення моментів до розрахунку коротких циліндричних резервуарів з гнучким днищем на жорсткій основі: при наближеному розрахунку циліндричних резервуарів як осесиметричних задач, останні зводяться до розрахунку балки – смужки на пружній основі зі змінним коефіцієнтом постелі; зусилля і деформації в довільній точці циліндричного резервуару можуть бути отримані складанням відповідних значень від безмоментного стану і від крайового ефекту; урахування гнучкості днища при жорсткій основі призводить до більш раціонального проектування; зменшення товщини днища хоча і приводить до зменшення вузлового моменту, але викликає збільшення згинального напруження.

Розроблена комп'ютерна програма для розрахунку короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі, яка містить алгоритм визначення зусиль, що виникають у місті сполучення стіни з днищем, побудований на запропонованій математичній моделі розподілення моментів. Комп'ютерна програма містить мінімальний обсяг вихідної інформації, необхідний для вирішення задачі, що дозволяє активно використовувати розроблену програму в практиці проектування зазначених циліндричних резервуарів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Бессонов В.С. Вертикальный резервуар большой емкости. *Известия ВУЗов. Строительство и архитектура*. 1983. № 2. С. 5–8.
2. Кулахметьев Р.Р. Предельные состояния и срок службы резервуаров. *Промышленное и гражданское строительство*. 2003. № 6. С. 28–30.
3. Соболев Ю.В., Купрейшвили С.М. Проектирование металлических вертикальных цилиндрических резервуаров минимальной массы. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1986. № 1. С. 17–20.
4. 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. СПб. : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. 388 с.
5. Никиреев В.М., Шадурский В.Л. Практические методы расчета оболочек. Москва: Издательство литературы по строительству. 1966. 270 с.
6. Грудев И. Д. Нелинейный краевой эффект в вертикальном цилиндрическом резервуаре. *Промышленное и гражданское строительство*. 1999. № 5. С. 23–24.
7. Ємел'янова Т.А., Лобанова Т.Ю. Експериментальне дослідження параметрів напруженого стану коротких циліндричних залізобетонних резервуарів. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2021. Вип. 1. С. 42–53.
8. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможности их анализа. Киев : Изд-во «Сталь». 2002. 600 с.
9. Ємел'янова Т.А. Розробка комп'ютерної програми для дослідження напруженого стану в точці тіла. *Будівельні матеріали, конструкції та споруди третього тисячоліття: зб. наук. пр.* Херсон : ХДАЕУ, Вип. 2. 2020. С. 30–34.
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. Еленицкий Э.Я. Расчет узла сопряжения стенки и днища вертикальных цилиндрических стальных резервуаров. *Строительная механика и расчет сооружений*. 2007. № 4. С. 2–7.
12. Ємел'янова Т.А. Особливості розрахунку циліндричних резервуарів при різних умовах обпирання стінки. *Будівельні матеріали, конструкції та споруди третього тисячоліття: зб. наук. пр.* Херсон : ХДАЕУ, Вип. 3. 2021. С. 8–12.

13. Ворона А., Ємел'янова Т. Математичне моделювання напружено-деформованого стану короткого циліндричного резервуару з гнучким днищем на жорсткій основі. *Сучасна наука: стан та перспективи розвитку: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених з нагоди Дня працівника сільського господарства*. Херсон: ХДАЕУ, 2021. С. 297–299.

14. Ємел'янова Т.А., Ворона А.Р. Методика розрахунку циліндричного резервуару з плоским гнучким днищем на жорсткій основі. *Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє: матеріали IV Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих вчених «Гідротехнічне будівництво: минуле, сьогодення, майбутнє»*. Херсон : ХДАЕУ, 2021. Вип. 4. С. 18–22.

15. Дьяконов В. П. *Mathematica 5.1/5.2/6. Программирование и математические вычисления*. Москва : ДМК-Пресс, 2008. 576 с.

REFERENCES:

1. Bessonov, V.S. (1983). Vertikal'nyy rezervuar bol'shoy yemkosti [Large capacity vertical tank]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura* [Proceedings of universities. Construction and architecture], no. 2, 5–8. [in Russian].

2. Kulakhmet'yev, R.R. (2003). Predel'nyye sostoyaniya i srok sluzhby rezervuarov [Limit states and service life of tanks]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction], no. 6, 28–30. [in Russian].

3. Sobolev, Yu. V., Kupreyshvili, S.M. (1986). Proyektirovaniye metallicheskiikh vertikal'nykh tsilindricheskiikh rezervuarov minimal'noy massy [Design of metal vertical cylindrical tanks of minimum weight]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and calculation of structures], no 1, 17–20 [in Russian].

4. Kabrits, S.A., Mikhaylovskiy, Ye.I., Tovstik, P.Ye., Chernykh, K.F. and Shamina, V.A. (2002). *Obshchaya nelineynaya teoriya uprugikh obolochek* [General nonlinear theory of elastic shells]. St. Petersburg : Publishing house S.-Peterb. University [in Russian].

5. Nikireyev, V.M., Shadurskiy, V.L. (1966). *Prakticheskiye metody rascheta obolochek* [Practical methods for calculating shells]. Moskva. Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu. [in Russian].

6. Grudev, I.D. (1999). Nelineynyy krayevoy effekt v vertikal'nom tsilindricheskom rezervuare [Nonlinear edge effect in a vertical cylindrical tank]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil construction], no. 5, 23–24 [in Russian].

7. Yemel'yanova, T.A., Lobanova, T.YU. (2021). Eksperymental'ne doslidzhennya parametriv napruzhenoho stanu korotkykh tsylindrychnykh zalizobetonnykh rezervuariv [Experimental study of stress parameters of short cylindrical reinforced concrete tanks]. *Tavriys'kyi naukovyy visnyk. Seriya: Tekhnichni nauky* [Taurian Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences], no. 1, 42–53 [in Ukrainian].

8. Perel'muter, A.V., Slivker, V.I. (2002). Raschetnyye modeli sooruzheniy i vozmozhnosti ikh analiza [Calculation models of structures and the possibility of their analysis]. Kyiv, Stal' [in Russian].

9. Yemel'yanova, T.A. (2020). Rozrobka komp'yuternoyi prohramy dlya doslidzhennya napruzhenoho stanu v tochtsi tila [Development of a computer program for the study of stress in the body]. *Budivel'ni materialy, konstruktsiyi ta sporudy tret'oho tysyacholittya* [Building materials, structures and structures of the third millennium], no. 2, 30–34 [in Ukrainian].

10. Nekhayev, G.A. (2002). K voprosu o raschete sopryazheniya stenki s dnishchem vertikal'nogo tsilindricheskogo rezervuara [On the issue of calculating the interface between the wall and the bottom of a vertical cylindrical tank]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya «Tekhnologiya, mekhanika i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktsiy i sooruzheniy»* [News of the Tula State University.

Series "Technology, mechanics and durability of building materials, structures and structures"], no. 3, 127–131. [in Russian].

11. Yelenitskiy, E.Ya. (2007). Raschet uzla sopryazheniya stenki i dnishcha vertikal'nykh tsilindricheskikh stal'nykh rezervuarov [Calculation of the junction of the wall and bottom of vertical cylindrical steel tanks]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and calculation of structures.], no. 4, 2–7. [in Russian].

12. Yemel'yanova, T.A. (2021). Osoblyvosti rozrakhunku tsylindrychnykh rezervuariv pry riznykh umovakh obpyrannya stinky [Features of calculation of cylindrical tanks under different conditions of wall support]. *Budivel'ni materialy, konstruktsiyi ta sporudy tret'oho tysyacholittya* [Building materials, structures and structures of the third millennium], no. 3, 8–12. [in Ukrainian].

13. Vorona, A., Yemel'yanova, T. (2021). Matematychno modelyuvannya napruzhenno-deformovanoho stanu korotkoho tsylindrychnoho rezervuaru z hnuchkym dnyshchem na zhorstkiy osnovi [Mathematical modeling of the stress-strain state of a short cylindrical tank with a flexible bottom on a rigid base]. *Suchasna nauka: stan ta perspektyvy rozvytku* [Modern science: state and prospects of development]. 297–299 [in Ukrainian].

14. Yemel'yanova T.A., Vorona A.R. (2021). Metodyka rozrakhunku tsylindrychnoho rezervuaru z ploskym hnuchkym dnyshchem na zhorstkiy osnovi [Method of calculating a cylindrical tank with a flat flexible bottom on a rigid base]. *Hidrotekhnichne budivnytstvo: mynule, s'ohodennya, maybutnye* [Hydraulic construction: past, present, future], no. 4, 18–22. [in Ukrainian].

15. D'yakonov, V. P. (2008). *Mathematica 5.1/5.2/6. Programmirovaniye i matematicheskiye vychisleniya* [Programming and mathematical calculations]. Moscow, DMK-Press [in Russian].