

DOI: <https://doi.org/10.32347/2077-3455.2025.71.670-680>

УДК 624.04

Сур'янінов Микола Георгійович,

доктор технічних наук, професор кафедри будівельної механіки

Одеської державної академії будівництва та архітектури

sng@odaba.edu.ua

<http://orcid.org/0000-0003-2592-5221>

Сур'янінов Вячеслав Миколайович,

асистент кафедри залізобетонних конструкцій та транспортних споруд

Одеської державної академії будівництва та архітектури

citykboss@odaba.edu.ua

<http://orcid.org/0009-0006-9620-4287>

РОЗРАХУНОК ЦИЛІНДРИЧНОГО КОЛОДЯЗЯ ЧИСЕЛЬНО- АНАЛІТИЧНИМ МЕТОДОМ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Анотація: розроблено алгоритм застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку залізобетонних та фібробетонних циліндричних колодязів, які з точки зору будівельної механіки є довгими циліндричними оболонками. Для аналізу роботи циліндричних оболонок рекомендувалося кілька способів. Аналіз літератури показує, що розробці нових методів розрахунку залізобетонних та сталеві фібробетонних циліндричних оболонок приділяється дуже мало уваги, тому цей напрямок є актуальним. Сутність запропонованого методу полягає в початковій дискретизації лінійної системи на найпростіші модулі. Після аналізу стану всіх модулів системи виконується їх синтез і зворотний перехід до системи, що розглядається. Під модулем розуміється стрижень – для стрижневих систем та узагальнений стрижень – для пластинчастих та оболонкових систем. Кожен модуль як одномірне фізичне тіло має тільки дві граничні точки. Метод спирається на вирішення диференціальних рівнянь завдання у вигляді методів початкових параметрів. Рішення задачі зводиться до розв'язання однієї системи лінійних рівнянь алгебри і обчислення напружено-деформованого стану у внутрішніх точках стрижнів за співвідношенням методу початкових параметрів. Така схема рішення забезпечує отримання дуже точних і достовірних результатів, які можна уявити засобами MATLAB або іншого середовища.

Реалізація запропонованого методу дозволяє отримати кінематичні та статичні параметри напружено-деформованого стану оболонки залізобетонних або фібробетонних циліндричних колодязів при будь-яких навантаженнях та граничних умовах.

Надалі авторами планується розв'язання поставленої задачі методом скінченних елементів у якийсь інженерній програмі (наприклад, у пакеті ANSYS) з метою оцінки точності розробленого алгоритму.

Ключові слова: залізобетон; фібробетон; колодязь; циліндрична оболонка; метод граничних елементів.

Вступ. Елементи круглої або кільцевої форми перерізу використовуються в багатьох інженерних спорудах, таких як напірні та безнапірні труби, опори ліній електропередач, водонапірні вежі, колодязі різного призначення тощо. Конструктивні рішення таких елементів та діючі експлуатаційні навантаження дуже різноманітні, що зумовлює різноманітність методів їх розрахунку та необхідність удосконалення існуючих та розробку принципово нових методів розрахунку. Якщо говорити про колодязі, то вони найчастіше мають циліндричну форму і з погляду будівельної механіки є довгими циліндричними оболонками, виготовленими з бетону. Сучасне будівництво, безумовно, вимагає нових ефективних матеріалів. Одним із них є сталеві фібробетон, який дозволяє покращити такі характеристики бетону, як тріщиностійкість, морозостійкість, міцність на розтяг, вигин, кручення та ін. Застосування фібри дозволяє змінити характер процесу руйнування. На відміну від звичайного бетону, в якому цей процес відбувається практично миттєво, у фібробетоні не відбувається крихкого руйнування, і конструкція продовжує чинити опір навантаженню, а характер руйнування змінюється з крихкого на в'язкий.

Аналіз попередніх досліджень. Методи розрахунку бетонних та фібробетонних колодязів є предметом багатьох досліджень [1-7]. Особливе місце займають колодязі циліндричної форми, які є довгими циліндричними оболонками. Для аналізу роботи циліндричних оболонок рекомендувалося кілька способів. Якщо відношення довжини оболонки до найменшого розміру поперечного перерізу перевищує чотири, можуть використовуватися спрощені рівняння, виведені Шорером. Найбільш повна система рівнянь, що потребує великої обчислювальної роботи, була сформульована Дженкінсом. Основні аналітичні методи їх розрахунку розроблені у минулому столітті. Це безмоментна та моментна теорії оболонок, напівмоментна теорія В. З. Власова [8]. Питання міцності та тріщиностійкості залізобетонних циліндричних оболонок давно привертають увагу вчених [9]. Цей інтерес не слабшає і зараз. Відмітимо роботи [10-13].

Проектування та розрахунок колодязів регламентується відповідними нормативними документами. У нашій країні це ДСТУ Б В. 2.6-106: 2010 [14]. У кількох країнах колишнього СРСР це Міждержавний стандарт [15]. У європейських країнах — EN1992-1-4 [16].

Аналіз літератури показує, що розробці нових методів розрахунку залізобетонних та сталевібробетонних циліндричних оболонок приділяється дуже мало уваги, тому цей напрямок є досить актуальним.

Мета. Метою роботи є застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів (ЧА МГЕ) до розрахунку залізобетонних та фібробетонних циліндричних колодязів.

Матеріали та методи дослідження. Для досягнення поставленої мети використовуються методи математичного аналізу, теорія матриць, методи будівельної механіки. Розрахункові схеми колодязних кілець відповідають конструкціям із залізобетону та фібробетону, експериментально дослідженим на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Результати та обговорення.

Розглянемо залізобетонний опускний колодязь циліндричної форми (рис. 1). З точки зору будівельної механіки такий колодязь являє собою замкнуту кругову циліндричну оболонку постійної товщини, навантажену по всій поверхні рівномірним нормальним тиском. Алгоритм розрахунку не залежить від величини і напрямку рівномірного тиску, тому для зручності будемо вважати, що оболонка колодязя — це жорстко защемлена по торцях циліндрична оболонка постійної жорсткості під дією рівномірного зовнішнього тиску. Балкова модель такої оболонки представлена на рис. 2.



Рис. 1. Опускний колодязь

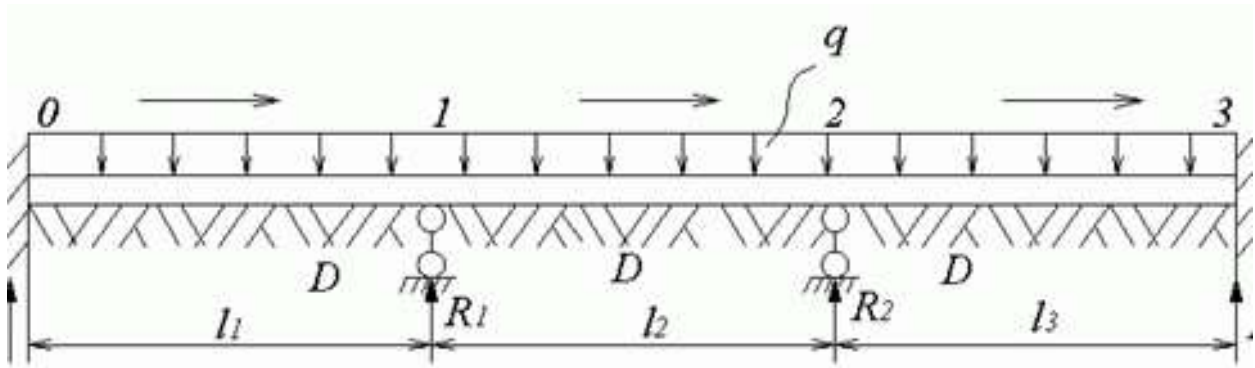


Рис. 2. Замкнена кругова циліндрична оболонка, навантажена рівномірно розподіленим тиском

Сутність ЧА МГЕ полягає в початковій дискретизації лінійної системи на найпростіші модулі. Після аналізу стану всіх модулів системи виконується їх синтез і зворотний перехід до системи, що розглядається. Під модулем розуміється стрижень – для стрижневих систем та узагальнений стрижень – для пластинчастих та оболонкових систем. Кожен модуль як одномірне фізичне тіло має тільки дві граничні точки — $x = 0$ і $x = l$. Метод спирається на вирішення диференціальних рівнянь завдання у вигляді методів початкових параметрів.

Якщо координаті x кожного стрижня дати граничне значення l_i , то можна виконати достатнє просте перетворення за схемою

$$\begin{aligned} \vec{Y}(l) &= \bar{A}(l)\vec{X}(0) + \vec{B}(l) \rightarrow \bar{A}(l)\vec{X}(0) - \vec{Y}(l) = \\ &= -\vec{B}(l) \rightarrow \bar{A}_*(l)\vec{X}_*(0, l) = -\vec{B}(l), \end{aligned} \quad (1)$$

де кінцеві граничні параметри матриці $\vec{Y}$ переносяться на місце нульових параметрів вектора $\vec{X}$. При цьому ці вектори доповнюються рівняннями рівноваги та спільності переміщень вузлових точок та граничними умовами. Наприкінці схеми перетворень (1) виходить система лінійних алгебраїчних рівнянь щодо початкових і кінцевих параметрів всіх стрижнів конструкції. Після обчислення початкових параметрів стрижнів їх напружено деформований стан визначається за матричним рівнянням

$$\vec{Y}(x) = \bar{A}(x)\vec{X}(0) + \vec{B}(x). \quad (2)$$

Таким чином, рішення прямих завдань будівельної механіки стрижневих систем в ЧА МГЕ зводиться до вирішення однієї системи лінійних рівнянь алгебри і обчисленню напружено-деформованого стану у внутрішніх точках стрижнів за співвідношенням методу початкових параметрів. Така схема рішення забезпечує отримання дуже точних і достовірних результатів, які можна уявити засобами MATLAB (або іншого середовища) у вигляді звичайних епюр, форм вільних коливань, втрат стійкості тощо.

Головною операцією в схемі (1) є перенесення параметрів з $\vec{Y}$ до $\vec{X}$. Процес перенесення кінцевих параметрів вектора $\vec{Y}$ до вектору $\vec{X}$ оснований на наступних положеннях. Вектори будь-якої стрижневої (і не стрижневої) конструкції при граничному значенні координати $x = l_i$ будуть містити 3 групи параметрів. Перша група – це нульові граничні параметри, що визначається заданими умовами спирання (крайовими умовами). Друга група – залежні параметри, пов'язані між собою рівняннями рівноваги та спільності переміщень вузлів конструкції. Третя група граничних параметрів не пов'язана між собою. Ці параметри умовно можна назвати незалежними. Перенесення параметрів з вектора $\vec{Y}$ до вектору $\vec{X}$ повинен компенсуватися ненульовими елементами матриці $\bar{A}$, інакше порушується вихідне рівняння схеми (1).

Очевидно, що незалежні параметри вектора $\vec{Y}$ повинні бути перенесені на місце нульових параметрів вектора $\vec{X}$, а залежні параметри переносяться відповідно до рівнянь їх зв'язку.

Перед операцією перенесення параметрів необхідно звільнити поля матриці $\bar{A}$ від елементів, пов'язаних з нульовими параметрами вектора $\vec{X}$, тобто обнулити стовпці матриці $\bar{A}$, номери яких дорівнюють номерам нульових рядків вектору $\vec{X}$.

Далі в матрицю $\bar{A}$ вводяться ненульові компенсуючі елементи та перетворення за схемою (1) завершені, оскільки в матриці $\bar{B}$ змінюються лише знаки елементів.

Для реалізації розроблених алгоритмів можна використовувати середовище MATLAB, DELPHI та інших.

Детальний опис методу та приклади його реалізації можна знайти у [17-19].

Алгоритм розрахунку циліндричної оболонки полягає в наступному:

1. Розбиваємо оболонку (замінюючу її балку) на три стрижні (модулі) і стрілками вказуємо початок і кінець кожного з них.

2. Формуємо матриці початкових та кінцевих параметрів та вектор навантаження, враховуючи в них граничні умови, рівняння рівноваги та рівняння сумісності переміщень вузлів 1 та 2.

3. Рівняння крайової задачі для циліндричної оболонки за методом граничних елементів набуває вигляду

$$\bar{A}\vec{X}_* = \vec{B}, \quad (3)$$

де

$$\vec{X}_* = \begin{pmatrix} Q^{0-1}(l_1) \\ Q^{1-2}(l_2) \\ M^{0-1}(0) \\ ;Q^{0-1}(0) \\ M^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \\ Q^{2-3}(l_3) \\ D\phi^{1-2}(0) \\ M^{1-2}(0) \\ Q^{1-2}(0) \end{pmatrix}; \quad \vec{B} = \begin{pmatrix} B_{11}^{0-1}(l_1) \\ B_{21}^{0-1}(l_1) \\ B_{31}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{0-1}(l_1) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{21}^{1-2}(l_2) \\ B_{31}^{1-2}(l_2) \\ B_{41}^{1-2}(l_2) \\ B_{11}^{2-3}(l_3) \\ B_{21}^{2-3}(l_3) \\ B_{31}^{2-3}(l_3) \\ B_{41}^{2-3}(l_3) \end{pmatrix}.$$

Матриця фундаментальних функцій $\bar{A}$ після вказаних вище перетворень має вигляд

$$\bar{A} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{22} & -A_{23} & -A_{24} & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -A_{32} & A_{33} & A_{34} & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -A_{42} & A_{43} & A_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & A_{12} & -A_{13} & -A_{14} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Аналitичні вирази фундаментальних функцій (компонентів цієї матриці) отримани в [17] для всіх можливих коренів характеристичного рівняння, відповідного до дифференціального рівняння задачі.

4. Вирішуючи систему (3), отримуємо кінематичні та статичні параметри напружено-деформованого стану оболонки.

Висновки Таким чином, розроблено алгоритм застосування чисельно-аналітичного методу граничних елементів до розрахунку залізобетонних та фібробетонних циліндричних колодязів. Рішення задачі зводиться до розв'язання однієї системи лінійних рівнянь алгебри і обчислення напружено-деформованого стану у внутрішніх точках стрижнів за співвідношенням методу початкових параметрів. Така схема рішення забезпечує отримання дуже точних і достовірних результатів, які можна уявити засобами MATLAB або іншого середовища. Реалізація запропонованого методу дозволяє отримати кінематичні та статичні параметри напружено-деформованого стану оболонки залізобетонних або фібробетонних циліндричних колодязів при будь-яких навантаженнях та граничних умовах.

Надалі авторами планується розв'язання поставленої задачі методом скінченних елементів у якийсь інженерній програмі (наприклад, у пакеті ANSYS) з метою оцінки точності розробленого алгоритму.

Список літератури:

1. Dick, C. P., Korkolis, Y. P. Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test // International Journal of Solids and Structures. 2014. Vol.51, № 18. P. 3042–3057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.04.023> (англійською).
2. Szymczak-Graczyk A. Selected aspects of the design and construction of reinforced concrete sunk wells // Acta Scientiarum Polonorum. Architectura. 2022. Vol. 21, No. 3. P. 43–54. DOI: <https://doi.org/10.22630/ASPA.2022.21.3.21> (англійською).
3. Давиденко М. О. Розрахунок міцності фібробетонних елементів кільцевого перерізу нормального до поздовжньої осі за деформаційним методом // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. Вип. 196 (3). С. 105–108.
4. Андрійчук О. В. Робота і розрахунок елементів кільцевого перерізу зі сталеві фібробетону при повторних навантаженнях: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди». Львів, 2008. 20 с.
5. Андрійчук О.В., Бабич Є.М. Сталеві фібробетонні безнапірні труби: монографія. Луцьк: РВВ Луцького НТУ, 2012. 150 с.

6. Бабич Є. М., Андрійчук О. В. Вплив повторних навантажень на роботу сталевібробетонних елементів кільцевого перерізу. // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. пр. Рівне: НУВГП, 2010. Вип. 20. С. 125–132.
7. Бабич Є. М., Дробишинець С. Я. Робота і розрахунок згинальних сталевібробетонних елементів: монографія. Луцьк: ЛНТУ, 2012. 194 с.
8. Крутій Ю. С., Сур'янінов М. Г., Чучмай О. М. Методи розрахунку циліндричних оболонок: монографія. Одеса: ОДАБА, 2018. 182 с.
9. Кан С. Н., Каплан Ю. І. Розрахунок циліндричних оболонок покриттів будівель. К.: Вища школа, 1973. 244 с.
10. Tanaka M., Mashita K. 集中荷重を受ける単配筋鉄筋コンクリート造円筒殻の修復耐力 [Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load] // Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ). 2010. Vol. 75, No. 655. P. 1681–1689. DOI: <https://doi.org/10.3130/aijs.75.1681> (японською).
11. Карпов В. В., Семенов А. А. Математическая модель деформирования подкрепленных ортотропных оболочек вращения [Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution] // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 5(40). С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.40.11> (російською).
12. Li S., Kim D. K., Liang Q. Q. Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment // Engineering Structures. 2022. Vol. 272. Article 114988. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988> (англійською).
13. Li R., Yang M., Liang B. A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses // Structures. 2023. Vol. 52. P. 146–157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130> (англійською).
14. ДСТУ Б В.2.6-106:2010. Конструкції бетонні і залізобетонні для колодязів каналізаційних, водопровідних і газопровідних мереж. Київ : Мінрегіон України, 2011. 24 с.
15. RILEM TC 162-TDF. Test and design methods for steel fibre reinforced concrete. Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: principles and applications // Materials and Structures / Matériaux et Constructions. 2002. Vol.35, June. P. 262–278. (англійською).
16. EN 1992-1-4: Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels: European Committee for Standardization, 2006. 67 p. (англійською).

17. Дащенко А. Ф., Коломієць Л. В., Оробей В. Ф., Сур'янінов М. Г. Чисельно-аналітичний метод граничних елементів: у 2 т. Т. 1. Одеса: ВМВ, 2010. 416 с. Т.2. Одеса: ВМВ, 2010. 512 с.
18. Оробей В. Ф., Сур'янінов М. Г. Практикум щодо вирішення крайових завдань механіки : навч. посіб. для студентів техн. спец. Одеса: Астропринт, 2011. 408 с.
19. Сур'янінов М. Г., Крутій Ю. С. Згин кругової циліндричної оболонки зі змінною товщиною // Вісник Хмельницького національного університету. 2016. № 2 (235). С. 116–121.

Referenses

1. Dick, C.P., & Korkolis, Y.P. (2014). Mechanics and full-field deformation study of the Ring Hoop Tension Test. *International Journal of Solids and Structures*, 51(18), 3042–3057. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2014.04.023>. (in English)
2. Szymczak-Graczyk, A. (2022). Selected aspects of the design and construction of reinforced concrete sunk wells. *Acta Scientiarum Polonorum. Architectura*, 21(3), 43–54. <https://doi.org/10.22630/ASPA.2022.21.3.21> (in English)
3. Davydenko, M. O. (2014). Rozrakhunok mitsnosti fibrobetonnykh elementiv kiltsevoho pererizu normalnoho do pozdovzhnoi osi za deformatsiynym metodom (Strength calculation of fiber concrete ring-shaped elements perpendicular to the longitudinal axis using the deformation method). *Naukovyi visnyk Natsionalnoho universytetu biorresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy. Seriya: Tekhnika ta enerhetyka APK*, (196)3, 105–108. (in Ukrainian)
4. Andriichuk, O. V. (2008). Robota i rozrakhunok elementiv kiltsevoho pererizu zi stalefibrobetonu pry povtornykh navantazhenniakh: avtoreferat dysertatsii na zdobuttia naukovooho stupenia kandydata tekhnichnykh nauk [Performance and calculation of ring-section elements made of steel fiber concrete under repeated loads: Abstract of dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences]. Lviv, 20 p. (in Ukrainian)
5. Andriichuk, O. V., & Babych, Ye. M. (2012). Stalefibrobetonni beznapiirni truby: monohrafiia [Steel fiber reinforced non-pressure pipes: Monograph]. Lutsk: RVV Lutsk National Technical University. (in Ukrainian)
6. Babych, Ye. M., & Andriichuk, O. V. (2010). Vplyv povtornykh navantazhen' na robotu stalefibrobetonnykh elementiv kil'tsevoho pererizu [Effect of repeated loads on the behavior of steel fiber reinforced circular elements]. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy*. (20), 125–132. (in Ukrainian)
7. Babych, Ye. M., & Drobishynets', S. Ya. (2012). Robota i rozrakhunok zhynal'nykh stalefibrobetonnykh elementiv: Monohrafiia [Behavior and design of

flexural steel-fiber-reinforced concrete elements: Monograph]. Lutsk: LNTU. (in Ukrainian)

8. Krutii, Yu. S., Suriianinov, M. H., & Chuchmai, O. M. (2018). Metody rozrakhunku tsylindrychnykh obolonok: Monohrafiia [Methods of calculating cylindrical shells: Monograph]. Odesa: ODABA. (in Ukrainian)

9. Kan, S. N., & Kaplan, Yu. I. (1973). Rozrakhunok tsylindrychnykh obolonok pokryttiv budivel [Calculation of cylindrical shells for building roofs]. Kyiv: Vyscha shkola. (in Ukrainian)

10. Tanaka, M., & Mashita, K. (2010). Retrofitted strength of concrete cylindrical shells reinforced with single layer under concentrated load. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), 75(655), 1681–1689. <https://doi.org/10.3130/aijs.75.1681> (in Japanese).

11. Karpov, V. V., & Semenov, A. A. (2013). Mathematical model of deformation of orthotropic reinforced shells of revolution. Magazine of Civil Engineering, (5), 100–106. <https://doi.org/10.5862/MCE.40.11> (in Russian)

12. Li, S., Kim, D. K., & Liang, Q. Q. (2022). Fibre-Based modelling for predicting the progressive collapse of cylindrical shells under combined axial compression and bending moment. Engineering Structures, 272, 114988. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114988> (in English)

13. Li, R., Yang, M., & Liang, B. (2023). A new and convenient method for strength evaluation of cracked cylindrical shell based on the ratio of crack tip stresses. Structures, 52, 146–157. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.03.130> (in English)

14. Derzhavniy standart Ukrainy. (2011). DSTU B V.2.6-106:2010. Konstruktsii betonni i zalizobetonni dlia kolodiaziv kanalizatsiinykh, vodoprovodnykh i hazoprovodnykh merezh (Concrete and reinforced concrete structures for sewerage, water supply and gas pipeline networks). Kyiv: Minrehion Ukrainy. (in Ukrainian)

15. RILEM TC 162-TDF. (2002). Design of steel fibre reinforced concrete using the σ -w method: Principles and applications. Materials and Structures / Matériaux et Constructions, 35(June), 262–278. <https://www.rilem.net/images/publis/1337.pdf> (in English)

16. EN 1992-1-4. (2006). Eurocode 2: Design of concrete structures. Brussels: European Committee for Standardization. (in English)

17. Dashchenko, A. F., Kolomiiets, L. V., Orobei, V. F., & Sur'ianinov, M. H. (2010). Chyslenno-analitychnyi metod hranichnykh elementiv [Numerical-analytical boundary element method] (Vol. 1). Odesa: VMV. (Vol. 2). Odesa: VMV. (in Ukrainian)

18. Orobei, V. F., & Sur'ianinov, M. H. (2011). Praktykum shchodo vyryshennia kraiovykh zavdan mekhaniky [Workshop on solving boundary value problems in mechanics]. Odesa: Astroprint. (in Ukrainian)

19. Surianinov, M.G. & Krutii, Yu. S. (2016) Zgin krugovoyi tsilindrichnoyi obolonki zi zminnoyu tovschinoyu. [Bending of a circular cylindrical shell with a changeable thickness] // Bulletin of Khmelnytsky National University, (2[235]), 116–121. (in Ukrainian)

Abstract

Mykola Surianinov, Doctor of Science, Professor, Head of the Department of Structural Mechanics, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Vyacheslav Surianinov, Assistant Professor, Department of Reinforced Concrete Structures and Transport Facilities, Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture.

Calculation of a cylindrical well by the numerical-analytical boundary element method

The paper developed an algorithm for applying the numerical-analytical method of boundary elements to the calculation of reinforced concrete and fiber-reinforced concrete cylindrical wells, which from the point of view of structural mechanics are long cylindrical shells. Several methods were recommended for analyzing the operation of cylindrical shells. An analysis of the literature shows that very little attention is paid to the development of new methods for calculating reinforced concrete and steel-fiber-reinforced concrete cylindrical shells, therefore this direction is relevant. The essence of the proposed method lies in the initial discretization of the linear system into the simplest modules. After analyzing the state of all modules of the system, their synthesis and reverse transition to the system under consideration are performed. A module is understood as a rod - for rod systems and a generalized rod - for plate and shell systems. Each module as a one-dimensional physical body has only two boundary points. The method is based on solving the differential equations of the problem in the form of initial parameter methods. The solution of the problem is reduced to solving one system of linear algebra equations and calculating the stress-strain state at the internal points of the rods according to the ratio of the initial parameter method. Such a solution scheme provides very accurate and reliable results that can be presented using MATLAB or another environment. The implementation of the proposed method allows you to obtain kinematic and static parameters of the stress-strain state of the shell of reinforced concrete or fiber-reinforced concrete cylindrical wells under any loads and boundary conditions. In the future, the authors plan to solve the problem using the finite element method in some engineering program (for example, in the ANSYS package) in order to assess the accuracy of the developed algorithm.

Keywords: reinforced concrete; fiber-reinforced concrete; well; cylindrical shell; boundary element method.