

DOI: 10.32347/2076-815X.2023.83.314-324

УДК 624.04

д.т.н., професор Сур'янінов М.Г.,

sng@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0003-2592-5221,

к.т.н., доцент Неутов С.П.,

neutov.stepan@ogasa.org.ua, ORCID: 0000-0002-0132-124X,

Бурдейний Ю.С., yura.porosyuk97@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6310-8997,

Метлицький В.В., metlizkiy98@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1668-9936,

Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса

## ПОСИЛЕННЯ ДОВГОЇ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ СТАЛЕВОЮ ФІБРОЮ

Запропоновано методику експериментального дослідження довгих циліндричних оболонок з метою визначення їх напружено-деформованого стану, несучої здатності та тріщиностійкості. Для реалізації поставленого завдання авторами розроблено спеціальний стенд. Для випробувань виготовлено вісім моделей циліндричної оболонки — 4 із залізобетону та 4 із фібробетону. Фібробетонні зразки-оболонки мають додаткове дисперсне армування сталеву фібрую із загнутими кінцями у кількості 1% за обсягом бетону. Одночасно із зразками-оболонками виготовлялися контрольні зразки призми та кубів для визначення фізико-механічних характеристик бетону. Експериментальні та контрольні зразки витримували в однакових температурно-вологих умовах протягом 28 діб при температурі 16...20°. Для визначення фізико-механічних характеристик бетону в кожній серії було випробувано по шість контрольних кубів розміром 100x100x100 мм та три призми розміром 100x100x400 мм. Випробування контрольних зразків виконано за ДСТУ Б В.2.7-214:2009. За результатами цих випробувань встановлено, що бетон зразків-оболонок представлений класом С20/25 за міцністю на стиск. В роботі представлені результати випробувань циліндричної фібробетонної оболонки, товщина якої 45 мм. Оболонка була шарнірно закріплена в чотирьох точках і навантажена вертикальним розподіленим навантаженням, прикладеним по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і тільки по тілу оболонки. Випробування показали, що здатність оболонки, що несе, склала 128,6 кН, а перша тріщина утворилася при навантаженні 64,3 кН, що становить 50,0 % несучої здатності. До моменту втрати несучої здатності в оболонці утворилося 10 тріщин з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм та максимальною кінцевою шириною розкриття 0,7 мм. Виконано комп'ютерне моделювання оболонки та розрахунки з використанням ліцензійного програмного забезпечення ANSYS 17.1. Несуча здатність,

визначена ANSYS, становила 120,2 кН, що на 6,5 % менше, ніж у експерименті. Методика випробувань та розроблений стенд мають універсальний характер, і будуть використані для проведення подальших досліджень.

*Ключові слова:* фібра; сталеві фібробетон; експеримент; стенд для випробувань; циліндрична оболонка; несуча здатність; тріщина; ANSYS.

**Вступ.** Тонкостінні просторові системи у формі циліндричних оболонок знаходять широке застосування в різних галузях сучасної техніки: у будівництві, автомобілебудуванні, суднобудуванні, авіації, військовій справі та багатьох інших галузях. Завдяки криволінійній формі, оболонки працюють як просторові елементи, і мають високі характеристики міцності, що дозволяє створювати з них легкі і міцні конструкції.

Результати досліджень з теорії тонких оболонок, викладені у низці монографій [1-4], отримані, переважно, виходячи з гіпотез Кірхгофа – Лява [3]. О.Л. Гольденвейзер запропонував нове формулювання кінематичних та статичних положень, відмінне від гіпотез Кірхгофа – Лява. Він отримав нові співвідношення пружності, які від висловів А.І. Лур'є з урахуванням поперечної стисливості оболонки [2].

**Аналіз попередніх досліджень.** Теорія оболонок розвивається з кінця ХІХ століття. Кількість опублікованих досліджень у цій галузі дуже велика. Існує ряд докладних оглядових публікацій з цього питання [5-7]. Важливу роль розвитку теорії оболонок зіграли роботи А.І. Лур'є [8], В.В. Новожилова та Р.М. Фінкельштейна [9], присвячені коректуванню похибки гіпотез Кірхгофа - Лява. У роботі [10] представлено тензорне викладення основних рівнянь теорії оболонок з використанням гіпотези Кірхгофа - Лява. Зважаючи на складність визначення напружено-деформованого стану оболонкових конструкцій, часто використовуються чисельні методи, найчастіше — метод скінчених елементів (МСЕ) [11-13].

З досліджень останніх років відзначимо роботу [14], де було вивчено поведінку довгих циліндричних сталевих оболонок при комбінованому згині та рівномірному окружному тиску. Результати експериментів порівняно з результатами комп'ютерного моделювання.

У роботі [15] оцінювалася кільцева деформація тонкостінних циліндричних оболонок із фібробетонного композиту при внутрішньому гідростатичному навантаженні. Результати показали, що використання фібри збільшило міцність на стиск та вигин на 27 та 32% відповідно. Противібуховому проектуванню циліндричних оболонок з урахуванням форми будівлі та форми вибухових хвиль присвячена стаття [16].

Аналіз літератури показав, що у сучасних дослідженнях циліндричних оболонки, як аналітичних, і експериментальних, переважають роботи, пов'язані з стійкістю. Експериментальним дослідженням залізобетонних та сталевібробетонних циліндричних оболонки приділяється дуже мало уваги, тому цей напрямок є досить актуальним.

**Мета.** Метою роботи була розробка методики експериментального визначення напружено-деформованого стану, несучої здатності та тріщиностійкості довгих циліндричних оболонки з додатковим дисперсним армуванням сталеву фібру.

**Матеріали та методи дослідження.** Всі дослідження проводилися на базі лабораторії кафедри будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури. Для виготовлення зразків матеріалу під час замішування бетонної маси рівномірно додавалася фібра, загальний обсяг якої становив 1% від самого виробу. Цей обсяг був визначений як найбільш оптимальний в ході попередніх досліджень [17]. Випробування проводилися на призмах і кубах, розмірами 100x100x400 мм і 100x100x100 мм відповідно, витриманих 28 доби. Призми і куби виготовлені згідно з нормативними документами [18]. Виготовлене по 4 групи призм і кубиків. По одній — зі звичайного бетону (з розмірами великого заповнювача до 10 мм) класу С20/25, і ще по три — з різними типами фібри (анкерна, плющена і хвиляста). Кожна група складалася із шести зразків.

Для дослідження циліндричних оболонки використано експериментальні методи механіки, метод тензометрування.

#### **Результати та обговорення.**

Для проведення експериментальних досліджень було розроблено спеціальний стенд [19].

Основна ідея при проектуванні конструкції стенду полягала у створенні можливості визначення несучої здатності циліндричних оболонки. При цьому необхідно було забезпечити додаток по всій поверхні оболонки рівномірно розподіленого навантаження, що відповідає реальним умовам її роботи. Передбачено використання блокової системи навантаження, що дозволяє не тільки виміряти деформації на різних рівнях поверхні оболонки, а й відстежувати процес утворення (зародження) та розвитку тріщин на всіх етапах навантаження з можливістю вимірювання ширини їх розкриття.

Стенд складається з чотирьох опорних стояків 8, на які спирається плита 1 (рис. 1). Досліджувана оболонка бортовими елементами по краях спирається на чотири металеві пластини 11, які лежать на плиті навантаження 1. На верхню поверхню оболонки 5, що випробовується, укладають чотири гнучких металевих листа з жерсті 10, до яких прикріплені передавальні бруски 9. На

листах з жерсті лежать ланцюга .Навантаження прикладається за допомогою двох силових блоків. Кожен блок складається з двох балок навантаження 2, підвішених до ланцюгів навантаження. На балки навантаження спираються передавальні балки 3, на яких розташовуються гідравлічні домкрати 6. Гідравлічні домкрати послідовно підключені один до одного і керуються однією насосною станцією. На домкрати встановлені зразкові (500кН) динамометри, які фіксують навантаження до оболонки. Зразкові динамометри упираються в плиту навантаження 1.

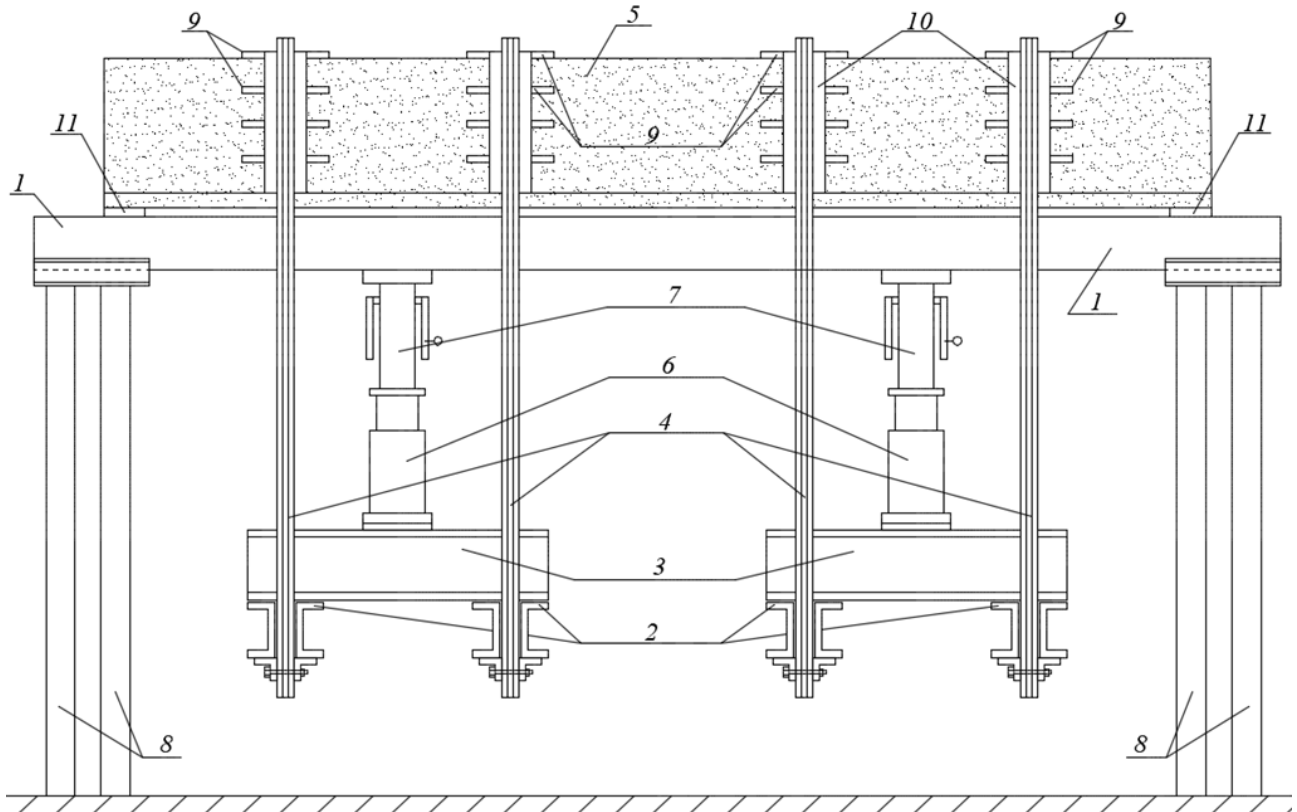


Рис. 1. Випробувальний стенд

Випробування оболонки на стенді виконується в наступному порядку: оболонку 5 встановлюють на раму навантаження 1, яка спирається на чотири опорні стійки 8. На верхню поверхню оболонки, що випробовується, укладають гнучкі металеві листи з жерсті 11, до яких через кожні 10 см за допомогою шурупів прикріплені передавальні бруси 9. Лист з жерсті в силу малої жорсткості приймає обрис зовнішньої поверхні оболонки 5 і дозволяє ланцюгам навантаження вільно ковзати по поверхні оболонки. На листи з жерсті укладають ланцюги навантаження 4, які охоплюють оболонку. Довжина кожного кола 4,8 метра, міцність на розрив 250 кН. У процесі застосування навантаження балки навантаження 2 за допомогою гідравлічних домкратів 6 зміщуються щодо рами навантаження 1, на яку спирається оболонка. Переміщення балок навантаження призводить до того, що всі чотири ланцюги

навантаження, що охоплюють оболонку, натягуються і передають рівномірно розподілене навантаження на поверхню. Процес навантаження починається після зняття нульових (початкових) показань на всіх без винятку вимірювальних приладах. Навантаження здійснюється ступенями, кожен ступінь закінчується п'ятихвилинною витримкою з фіксацією всіх параметрів.

З метою отримання повної та достовірної картини деформації поверхні оболонки у кожному з трьох зон, розташованих між ланцюгами навантаження, закріплені по 4 індикатори годинного типу з ціною поділу 0,01мм. Три індикатори (перший, п'ятий та дев'ятий) закріплені на бортовому елементі оболонки. Кожен четвертий з дванадцяти закріплений на гребені оболонки. Два середні індикатори з кожної четвірки (2 і 3; 6 і 7; 10 і 11) розташовані на рівнях  $1/3$  і  $2/3$  стріли підйому оболонки відповідно (рис. 2).

Крім індикаторів, на оболонку наклеєні тензометричні датчики, за допомогою яких відстежувалися деформації на верхній та нижній поверхнях. Процес навантаження закінчувався тоді, коли випробувана оболонка втрачала здатність чинити опір зовнішньому навантаженню. Величина навантаження, що відповідає цьому моменту, бралася за несучу здатність оболонки.

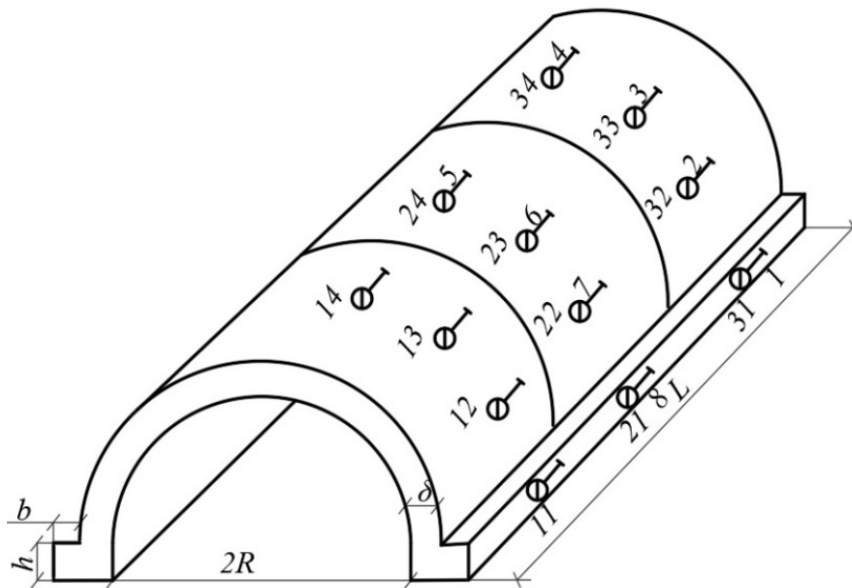
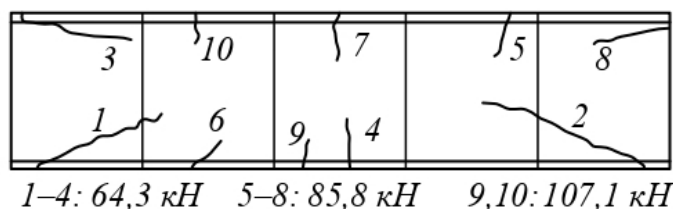


Рис. 2. Розташування вимірювальних приладів

Відповідно до програми випробувань циліндричних оболонок у рамках Науково-дослідної роботи "Аналітичні, комп'ютерні та експериментальні дослідження напружено-деформованого стану фібробетонних конструкцій" (реєстраційний номер 0121U111755) на кафедрі будівельної механіки Одеської державної академії будівництва та архітектури було виготовлено вісім моделей циліндричної оболонки (рис. 2) — 4 із залізобетону (зразки Б1-Б4) та 4 з фібробетону (зразки ФБ1-ФБ4). Фібробетонні зразки-оболонки мають додаткове дисперсне армування сталевією фіброю із загнутими кінцями [18],

яка додавалася на етапі замішування бетонної суміші в кількості 1% за обсягом бетону. Усі зразки-оболонки мали постійну довжину  $L = 2450\text{мм}$  і радіус поперечного перерізу  $R = 270\text{мм}$ , а варіювалися товщина оболонки  $\delta$  та розміри поперечного перерізу бортових елементів  $b, h$ . У цій роботі наводяться результати випробувань залізобетонної оболонки ФБ1, товщина якої  $\delta = 45\text{мм}$ , а розміри поперечного перерізу бортових елементів  $b = 45\text{мм}$ ,  $h = 60\text{мм}$ .

Розподілене навантаження (вертикальне) було прикладено по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і лише тілом оболонки, тобто. бортові елементи не навантажені. Оболонка шарнірно спирається з кутів на пластини  $100 \times 100\text{мм}$ . У середині кожного опорного елемента по два арматурні стрижні діаметром 10мм. Несуча здатність оболонки становила 128,6 кН, а перша тріщина утворилася при навантаженні 64,3 кН, що становить 50,0% несучої здатності. До моменту втрати несучої здатності в оболонці утворилося 10 тріщин (рис. 3) з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм. Кінцева ширина розкриття тріщин наведена у табл. 1.



1-4: 64,3 кН 5-8: 85,8 кН 9,10: 107,1 кН

Рис. 3. Розташування тріщин

Таблиця 1

Результати випробувань фібробетонної оболонки

Ступень навантаження	Величина навантаження, кН	Номер тріщини	Кінцева ширина розкриття, мм
1	21,4		
2	42,9		
3	53,6		
4	<b>64,3</b>	1-4	1 — 0,3; 2 — 0,3; 3 — 0,2; 4 — 0,7
5	74,9		
6	85,8	5-8	5 — 0,05; 6 — 0,05; 7 — 0,5; 8 — 0,2
7	96,4		
8	107,1	9, 10	9 — 0,1; 10 — 0,05
9	117,8		
10	128,6		

Комп'ютерне моделювання оболонки та розрахунки виконані за допомогою ліцензійного програмного забезпечення ANSYS 17.1 [20] (ліцензія ANSYS Academic Research Mechanical, Flex ID 4abef353, від 30.05.2016). Несуча здатність, визначена ANSYS, становила 120,2 кН, що на 6,5 % менше, ніж у експерименті.

### **Висновки**

Таким чином, виконано експериментальні дослідження довгих циліндричних оболонок з метою визначення їх напружено-деформованого стану, несучої здатності та тріщиностійкості. Для реалізації поставленого завдання авторами розроблено спеціальний стенд. Для випробувань виготовлено вісім моделей циліндричної оболонки — 4 із залізобетону та 4 із фібробетону. Фібробетонні зразки-оболонки мають додаткове дисперсне армування сталеву фібру із загнутими кінцями у кількості 1% за обсягом бетону. В роботі представлені результати випробувань циліндричної фібробетонної оболонки, товщина якої 45 мм. Оболонка була шарнірно закріплена в чотирьох точках і навантажена вертикальним розподіленим навантаженням, прикладеним по чотирьох смугах, шириною 13 см кожна, і тільки по тілу оболонки. Випробування показали, що здатність оболонки, що несе, склала 128,6 кН, а перша тріщина утворилася при навантаженні 64,3 кН, що становить 50,0 % несучої здатності. До моменту втрати несучої здатності в оболонці утворилося 10 тріщин з однаковою початковою шириною розкриття 0,05 мм та максимальною кінцевою шириною розкриття 0,7 мм. Виконано комп'ютерне моделювання оболонки та розрахунки з використанням ліцензійного програмного забезпечення ANSYS 17.1. Несуча здатність, визначена ANSYS, становила 120,2 кН, що на 6,5 % менше, ніж у експерименті. Методика випробувань та розроблений стенд мають універсальний характер, і будуть використані для проведення подальших досліджень.

### **Список літератури**

1. Власов В.З. Общая теория оболочек и её приложения в технике [Текст] / В.З. Власов. – М. Л.: Гостехтеориздат, 1949. – 784 с.
2. Гольденвейзер, А.Л. Теория тонких упругих оболочек [Текст] / А.Л. Гольденвейзер. – изд. 2-е. – М.: Наука, 1976. – 512 с. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. – изд. 2-е. – Л.: Гос. союз. изд-во судостр. промышленности, 1962. – 431 с.
3. Шмаков, В.П. Избранные труды по гидроупругости и динамике упругих конструкций [Текст] / В.П. Шмаков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 287 с.

4. Новожилов, В.В. Теория тонких оболочек [Текст] / В.В. Новожилов. – Л.: Судостроение, 1962. – 431 с.

5. Вожова, Н.В. Определение предельного давления в пересекающихся цилиндрических оболочках на основе упругопластического анализа [Текст]: дис.... канд. тех. наук: 01.02.06 / Вожова Наталья Вячеславовна. – М., 2011. – 144 с.

6. Жилин, П.А. Прикладная механика. Основы теории оболочек [Текст]: Учеб. пособие / П.А. Жилин. – СПб: Изд-во Политехн. ун-та, 2006. – 167 с.

7. Скопинский, В.Н. Напряжения в пересекающихся оболочках [Текст] / В.Н. Скопинский. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 400 с.

8. Лурье, А.И. Общая теория упругих тонких оболочек [Текст] / А.И. Лурье // ПММ. – 1940. – Вып. 2. – С. 7 – 34.

9. Новожилов, В.В. О погрешности гипотез Кирхгофа–Лява в теории оболочек [Текст] / В.В. Новожилов, Р.М. Финкельштейн // ПММ. – 1943. – 7, вып. 5. – С. 323 – 330.

10. Лурье, А.И. Статика тонкостенных упругих оболочек [Текст] / А.И. Лурье. – М.: Госгехиздат, 1947. – 252 с.

11. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике [Текст] / О. Зенкевич. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

12. Иванов, В.Н. Основы метода конечных элементов и вариационно-разностного метода [Текст]: Учеб. пособие / В.Н. Иванов. – М.: РУДН, 2008. – 168 с.

13. Клованич, С.Ф. Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики [Текст] / С.Ф. Клованич. – Запорожье, 2009. – 400 с.

14. Ghanbari Ghazijahani, Tohid & Showkati, Hossein. (2013). Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure. *Journal of Constructional Steel Research*. 88. 10.1016/j.jcsr.2013.04.009.

15. Ghasemzadeh, H., Saradar, A., Tahmouresi, B. (2018). Hoop Stress-Strain in Fiber-Reinforced Cementitious Composite Thin-Walled Cylindrical Shells. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30(10). 04018258. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002428.

16. Yin, F., Zhi, X., Fan, F. et al. Blast loads and variability on cylindrical shells under different charge orientations. *Sci Rep* 13, 6719 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30785-8>

17. Изделия строительные бетонные и железобетонные сборные. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ДСТУ Б В.2.6-7-95 (ГОСТ 8829-94). – [Введен с 1995-11-16]. – К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1997. - IV, 30 с. – (Національний стандарт України).



18. BS EN 14889-1:2006 Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions and specifications and conformity. BSI, 2006. 30 p.

19. Патент на корисну модель №148291. Стенд для визначення несучої здатності циліндричної оболонки / Неутов С.П., Корнеєва І.Б., Сур'янінов М.Г., Бойко О.В., Головата З.О. 21.07.2021. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1606901>.

20. Федорова Н.Н., Вальгер С., Данилов М. Н, Захарова Ю.В. Основы работы в ANSYS 17. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

Doctor of Science, Professor **Mykola Surianinov**,  
PhD **Stepan Neutov**, Postgraduate **Yurii Burdeinii**,  
Postgraduate **Vitalii Metlizkiy**,  
Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa

## **REINFORCEMENT OF LONG CYLINDRICAL SHELL WITH STEEL FIBER**

A technique for experimental study of long cylindrical shells is proposed in order to determine their stress-strain state, load-bearing capacity and crack resistance. To implement the task, the authors developed a special stand. For testing, eight models of a cylindrical shell were made — 4 made of reinforced concrete and 4 made of fiber-reinforced concrete. Fiber-reinforced concrete shell specimens have additional dispersed reinforcement with steel fiber with bent ends in the amount of 1% by volume of concrete. Simultaneously with the shell samples, control samples of prisms and cubes were made to determine the physical and mechanical characteristics of concrete. Experimental and control samples were kept in the same temperature and humidity conditions for 28 days at a temperature of 16 ... 20°. To determine the physical and mechanical characteristics of concrete in each series, six control cubes 100x100x100 mm in size and three prisms 100x100x400 mm in size were tested. Tests of control samples were carried out according to DSTU B V.2.7-214:2009. Based on the results of these tests, it was established that the concrete of the shell specimens is represented by the C20/25 class in terms of compressive strength. The paper presents the results of testing a fiber-reinforced concrete cylindrical shell, the thickness of which is 45 mm. The shell was hinged at four points and loaded with a vertical distributed load applied in four strips, each 13 cm wide, and only along the body of the shell. Tests showed that the bearing capacity of the shell was 128.6 kN, and the first crack was formed at a load of 64.3 kN, which is 50.0% of the bearing capacity. Until the moment of loss of bearing capacity, 10 cracks were formed in the shell with the same initial opening width of 0.05 mm and a maximum final opening

width of 0.7 mm. Computer simulation of the shell and calculations were performed using licensed software ANSYS 17.1. The bearing capacity determined in ANSYS was 120.2 kN, which is 6.5% less than in the experiment. The test methodology and the developed stand are universal in nature and will be used for further research.

Keywords: fiber; steel-fiber-reinforced concrete; experiment; test stand; cylindrical shell; bearing capacity; crack; ANSYS.

## REFERENCES

1. Vlasov, V.Z. (1949). *Obshchaia teoriya obolochek i ee prylozheniya v tekhnike* [General theory of shells and its applications in engineering]. M. L.: Hostekhteorizdat. {in Russian}.
2. Holdenveizer, A. L. (1976). *Teoriya tonkikh upruhikh obolochek* [Theory of thin elastic shells]. 2-e izd. M.: Nauka. {in Russian}.
3. Shmakov, V.P. (2011). *Yzbrannye  $\square$ rudy po hidroupruhosty y dinamike upruhikh konstruksii* [Selected works on hydroelasticity and dynamics of elastic structures]. M.: Izd-vo MHTU im. N.E. Baumana. {in Russian}.
4. Novozhylov, V.V. (1962). *Teoriya tonkikh obolochek* [Theory of thin shells]. 2-e izd. L.: Hos. Soiuz. Yzd-vo sudostr. Promyshlennosty. {in Russian}.
5. Vozhova, N.V. (2011). *Opredelenye predelnogo davleniya v peresekaiushchykh tsilindricheskikh obolochkakh na osnove upruhoplasticheskoho analiza* [Determination of the limiting pressure in intersecting cylindrical shells based on elastic-plastic analysis]: dys.... kand. tekhn. nauk: 01.02. M. {in Russian}.
6. Zhylyn, P.A. (2006). *Prikladnaia mekhanika. Osnovy teorii obolochek* [Applied mechanics. Fundamentals of shell theory]. Ucheb. Posobie. SPb: Yzd-vo Polytekhn. instituta. {in Russian}.
7. Skopynskiy, V.N. (2008). *Napriazheniya v peresekaiushchykh obolochkakh* [Stresses in intersecting shells]. M.: FYZMATLYT. {in Russian}.
8. Lure, A.Y. (1940). *Obshchaia teoriya upruhikh tonkikh obolochek* [General theory of elastic thin shells]. *PMM*. 2. 7 – 34. {in Russian}.
9. Novozhylov, V.V., Fynkelshtein, R. M. (1943). *O pohreshchnosti hipotez Kyrkhghofa–Liava v teorii obolochek* [On the error of the Kirchhoff–Love hypotheses in the theory of shells]. *PMM*. 7(5). 323 – 330. {in Russian}.
10. Lure, A.Y. (1947). *Statyka tonkostennykh upruhikh obolochek* [Statics of thin-walled elastic shells]. M.: Hoshekhyzdat. {in Russian}.
11. Zenkevych, O. (1975). *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. M.: Myr. {in Russian}.
12. Ivanov, V.N. (2008). *Osnovy metoda konechnykh elementov y varyatsyonno-raznostnoho metoda* [Fundamentals of the finite element method and the variational-difference method]. Ucheb. Posobie. M.: RUDN. {in Russian}.

13. Klovanych, S. F. (2009). *Metod konechnykh elementov v nelyneinykh zadachakh inzhenernoi mekhaniki* [Finite element method in nonlinear problems of engineering mechanics]. Zaporozhe. {in Russian}.
14. Ghanbari Ghazijahani, Tohid & Showkati, Hossein. (2013). Experiments on cylindrical shells under pure bending and external pressure. *Journal of Constructional Steel Research*. 88. 109–122. 10.1016/j.jcsr.2013.04.009. {in English}.
15. Ghasemzadeh, H., Saradar, A., Tahmouresi, B. (2018). Hoop Stress-Strain in Fiber-Reinforced Cementitious Composite Thin-Walled Cylindrical Shells. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30(10). 04018258. DOI:10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002428. {in English}.
16. Yin, F., Zhi, X., Fan, F. et al. (2023). Blast loads and variability on cylindrical shells under different charge orientations. *Scientific Reports*. 13. 6719. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-30785-8>. {in English}.
17. DSTU B V.2.6-7-95 (HOST 8829-94). (1997). *Izdelyia stroytelnye betonnye i zhelezobetonnye sbornye. Metody yspytanii nahruzheniem. Pravyla otsenki prochnosti, zhestkosti i treshchinostoikosti* [Products building concrete and reinforced concrete prefabricated. Load test methods. Rules for assessing strength, stiffness and crack resistance]. [Vveden s 1995-11-16]. K.: Derzhavnyi komitet Ukrainy u spravakh mistobuduvannia i arkhitektury. IV. (Natsionalnyi standart Ukrainy). {in Ukrainian}.
18. BS EN 14889-1:2006. (2006). *Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions ad specifications and conformity*. BSI. {in English}.
19. Nieutov, S. P., Korneieva, I. B., Surianinov, M. H., Boiko, O. V., Holovata, Z. O. (2021). *Patent na korysnu model №148291. Stend dlia vyznachennia nesuchoi zdatnosti tsylindrychnoi obolonky* [Utility model patent No. 148291. A stand for determining the load-bearing capacity of a cylindrical shell]. <https://sis.ukrpatent.org/uk/search/detail/1606901>. {in Ukrainian}.
20. Fedorova, N. N., Valher, S. A., Danylov, M. N., Zakharova, Yu. V. (2017). *Osnovy raboty v ANSYS 17* [Fundamentals of work in ANSYS 17]. M.: DMK Press. {in Russian}.