

## ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КРИТИЧНОГО СТАНУ ПРЯМОКУТНИХ В ПЛАНІ КРУГОВИХ ОБОЛОНОК

Сіянов О. І., Гаврилюк А. М.

*Визначено показники, що впливають на стійкість сітчастих і суцільних кругових оболонкових конструкцій прямокутної форми в плані. Здійснено перехід від континуальної до стержневої системи шляхом введення еквівалентних жорсткостей і коефіцієнта заповнення сітки. Отримано залежність критичного навантаження від параметрів, що враховують матеріал та розміри конструкції. Проведено комп'ютерне моделювання і виконано розрахунок кругових в розрізі та прямокутних в плані оболонкових поверхонь. Наведено величину силового параметра як фактора оцінки стійкості для всіх розглянутих пар суцільних і сітчастих моделей. Установлено особливості викривлення форми розрахованих скінчено-елементних схем. Знайдено число півхвиль в напрямку дуги.*

**Ключові слова:** кругові оболонки, сітчасті конструкції, суцільні поверхні, стійкість, критичний стан, параметри.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ КРИТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ В ПЛАНЕ КРУГОВЫХ ОБОЛОЧЕК

Сиянов А. И., Гаврилюк А. Н.

*Определены показатели, которые влияют на устойчивость сетчатых и сплошных круговых оболочечных конструкций прямоугольной формы в плане. Осуществлен переход от континуальной к стержневой системе путем введения эквивалентных жесткостей и коэффициента заполнения сетки. Получена зависимость критической нагрузки от параметров, которые учитывают материал и размеры конструкции. Проведено компьютерное моделирование и выполнен расчет круговых в разрезе и прямоугольных в плане оболочечных поверхностей. Приведена величина силового параметра как фактора оценки устойчивости для всех рассмотренных пар сплошных и сетчатых моделей. Установлены особенности искривления формы рассчитанных конечно-элементных схем. Найдено число полуволн в направлении дуги.*

**Ключевые слова:** круговые оболочки, сетчатые конструкции, сплошные поверхности, устойчивость, критическое состояние, параметры.

## DETERMINATION OF PARAMETERS OF CRITICAL CONDITION RECTANGULAR IN A PLAN CIRCULAR SHELLS

Siyanov O., Gavriliuk A.

*Indexes which influence on stability of the reticulated and continuous circular constructions of shells of rectangular form in a plan are certain. A transition is carried out from continual to the cored system by introduction of equivalent inflexibilities and coefficient of filling in of net. Dependence of the critical loading is got from parameters which take into account material and sizes of construction. A computer modelling is conducted and the calculation of circular in a cut and rectangular in a plan of shells surfaces is executed. A value of power parameter is shown as a factor of estimation of stability for all considered pairs of continuous and reticulated models. The features of curvature of form certainly - element schemes are set. The number of semi waves is found in the direction of arc.*

**Keywords:** circular shells, reticulated constructions, continuous surfaces, stability, critical condition, parameters.

### Вступ

Сучасний розрахунок кругових оболонкових конструкцій виконується за допомогою апробованих на практиці і відомих у світі прикладних програм. В кожній з них передбачено використання можливих типів поверхонь обертання, які дозволяють швидко, без зайвих зусиль і

спеціальної кваліфікації задати будь-яку суцільну або сітчасту систему. Потрібно лише врахувати призначення, геометрію, розміри, тип чарунки, схему і величину прикладання навантаження, матеріал та граничні умови. Між тим в основу розробки більшості програм покладено добре розроблений і зручний у використанні метод скінчених елементів [1]. Тому, як наслідок, слід по можливості здійснити рівномірну кускову дискретизацію поверхні. Наявні алгоритми, і відповідно, методи розрахунку суцільних оболонок кругової форми розроблені досить давно. Велика кількість науковців ще в минулому столітті запропонували власні підходи, які згодом було опрацьовано та підготовлено для створення єдиної методологічної інформаційної бази. Однак з розвитком архітектурних форм, матеріалів і технологічних можливостей з'явилась нагальна потреба в кругових сітчастих оболонках. Їх розрахунок виконувався шляхом залучення механіки дискретного поля, суцільного аналога або методу розкладання на плоскі грані [2, 3]. Втім найбільш точні результати, які підтверджено роботою сітчастих оболонкових конструкцій в рамках побудованих об'єктів, отримано дискретним методом розрахунку.

### Мета і задачі роботи

Ґрунтуючись на вагомих дослідженнях в сфері теорії оболонок [4] поставлено мету – врахувати особливості поведінки сітчастої поверхні і її суцільного аналога від дії прикладених експлуатаційних навантажень та визначити характерні параметри, що впливають на стійкість кругових оболонкових конструкцій. Основними задачами такої постановки є виконання комплексного аналізу залежностей на підставі проведення числового комп'ютерного моделювання систем із застосуванням фіксованої довжини, радіусу кривизни і розміру чарунок та покроковим варіюванням прольоту в напрямку дуги.

### Основна частина

У запропонованій роботі розглянемо поверхню кругової оболонки на прямокутному плані. Очевидно, що найбільш небезпечним показником вичерпання несучої здатності такої системи слід вважати величину критичного навантаження. На його значення впливає багато факторів, вдале поєднання яких забезпечить необхідну стійкість багатоелементної просторової конструкції. Але якщо зробити фіксованою схему опирання на контурі, причому тільки у місцях розташування опорних вузлових з'єднань, то можна записати

$$q = f(E, \Gamma), \quad (1)$$

де  $q$  – величина критичного навантаження;

$E$  і  $\Gamma$  – параметри, що враховують матеріал і розміри конструкції відповідно.

Але для кругової сітчастої поверхні, яка найчастіше може використовуватись як покриття [5], потрібно врахувати ще й ступінь заповнення сітки. Тож введемо коефіцієнт  $s$ , який здатний підсилити жорсткість системи.

Завдяки вдалій геометричній формі конструкція стержневої кругової оболонки працює в обох напрямках. Таким чином для неї слід забезпечити потрібне співвідношення між згинальною  $EJ$  і мембранною  $EA$  жорсткістю. Тут  $E$  – модуль пружності матеріалу;  $J$  та  $A$  – момент інерції і площа поперечного перерізу стержня відповідно.

Тоді з урахуванням товщини  $h$  суцільної конструкції і розміру  $a$  чарунки стержневого аналогу здійснимо перехід від континуальної до сітчастої поверхні. В такому випадку еквівалентні жорсткості приймуть вигляд

$$D \sim \frac{EJs}{a}, \quad Eh \sim \frac{EAs}{a}. \quad (2)$$

Забезпечимо кривизну системи радіусом  $R$  та з урахуванням кількості півхвиль  $n, m$  у двох напрямках, а також параметрів  $\alpha R$  і  $L$ , які відповідають за габарити конструкції, матимемо

$$q = \frac{EAs}{aR} (C + TK), \quad (3)$$

де параметр  $C$  містить згинальну, а  $T$  і  $K$  – мембранну жорсткості відповідно

$$C = \frac{J}{A} \left( \frac{\pi \alpha R}{nL^2} + \frac{n\pi}{\alpha R} \right)^2, \quad T = \frac{(\alpha R)^2}{R^2 n^2 \pi^2}, \quad K = \frac{1}{\left( 1 + \frac{n^2 L^2}{(\alpha R)^2} \right)^2} \quad (4)$$

Критичне навантаження  $q$  в такому випадку для сітчастої оболонки на відміну від суцільної буде залежати ще й від коефіцієнту заповнення сітки  $s$ , розміру  $a$  чарунки і параметрів  $J$ ,  $A$  перерізу стержнів

$$q = f(E, \Gamma, s) \quad (5)$$

Поставлені задачі вирішимо шляхом числового комп'ютерного моделювання і подальшого розрахунку прямокутних в плані кругових оболонкових конструкцій з заданими геометричними параметрами [5], наведеними в таблиці 1.

Таблиця 1 – Геометричні параметри комп'ютерних моделей кругових оболонок

$L$ , м	$R$ , м	$a$ , м	$a^*$ , м
36,132	22,5	3,011	0,36

Примітка:  $a^*$  – розміри чарунки суцільної конструкції.

За допомогою системи поверхонь обертання створено 10 розрахункових схем (по 5 на кожний тип поверхні) з різними значеннями ширини  $B$  (відстані між опорними вузлами за напрямком дуги) оболонки: 17,358 м; 22,671 м; 27,590 м; 32,029 м; 35,911 м. Для побудови необхідних скінчено-елементних моделей використано стандартну базу типів жорсткостей. Сітчастим моделям задано квадратний тип решітки з діагональним елементом в середині, причому всім стержням призначено поперечний переріз у формі прокатного трубчастого профілю. Як матеріал вибрано сталь марки ВСтЗпс4, що відповідає класу С245 (модуль пружності  $E = 2,1 \times 10^5$  МПа). Граничні умови забезпечено шарнірним обпиранням по контуру з повною заборонаю лінійних переміщень в одному кутовому вузлі та накладеними в'язями у двох напрямках в місцях розташування решта опорних вузлів. Розрахункове експлуатаційне навантаження  $2 \text{ кН/м}^2$  на оболонку визначено на підставі положень остаточної редакції чинних норм [6].

Після проведеного комп'ютерного моделювання виконано розрахунок і виявлено загальні закономірності роботи конструкцій. За отриманими результатами прийнято рішення скорегувати характеристики жорсткості.

Орієнтиром для підбору товщини суцільних систем і критерієм для вибору розмірів перерізу елементів сітчастих оболонок стали зусилля в елементах і переміщення вузлів характерних ділянок кругових в розрізі і прямокутних в плані багатоелементних моделей.

Проведений розрахунок показав незначну різницю між величинами критичного навантаження  $q$  для суцільних і сітчастих конструкцій (рис. 1).

Число півхвиль  $n = 2, 3$  і  $4$  форми втрати стійкості виявлено в напрямку дуги. Викривлення поверхні більш наочно отримано в стержневих оболонках внаслідок фіксації радіусу кривизни та розміру чарунки.

Загалом різкі відхилення у значеннях критичного навантаження  $q$  можливі, але за умови порушення пропорційності збільшення параметрів перерізу обох типів поверхонь.

Проте на практиці рекомендують обмежувати ширину  $B$  оболонки величиною 24 м. Втім у випадку використання наведених вище параметрів граничним показником є менше значення ширини  $B$  (22,671 м).

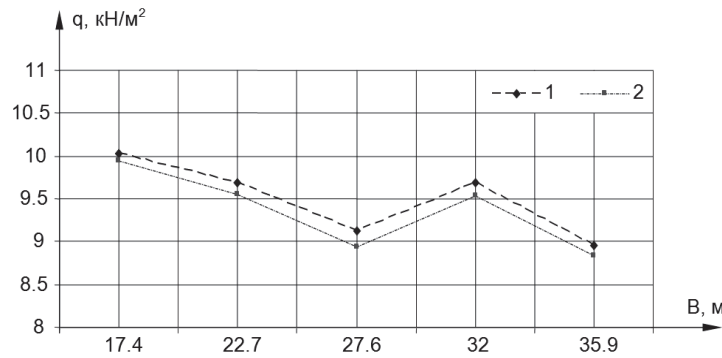


Рисунок 1 – Графік залежності величини критичного навантаження  $q$  від ширини  $B$  кругових оболонок на прямокутному плані: 1 – сітчастих; 2 – суцільних

### Висновки

- Визначено показники, що впливають на стійкість сітчастих і суцільних кругових оболонкових конструкцій прямокутної форми в плані з урахуванням особливостей геометричної побудови та роботи в обох напрямках.
- Здійснено перехід від континуальної до стержневої системи шляхом введення еквівалентних жорсткостей і коефіцієнта заповнення сітки. Отримано залежність критичного навантаження  $q$  від параметрів, що враховують матеріал та розміри конструкції.
- Проведено комп’ютерне моделювання і виконано розрахунок кругових в розрізі та прямокутних в плані оболонкових поверхонь.
- Графічно продемонстровано величину силового параметра  $q$  як фактора оцінки стійкості для всіх розглянутих пар суцільних і сітчастих моделей.
- Установлено особливості викривлення форми розрахованих скінчено-елементних схем. Знайдено число півхвиль в напрямку дуги.

### Використана література

1. Немчинов Ю. И. Метод пространственных конечных элементов (с приложениями к расчету зданий и сооружений) / Ю. И. Немчинов. – К. : НИИСК, 1995. – 368 с.
2. Руководство по проектированию и расчету покрытий нового типа – сетчатых оболочек [сост. Л. Лубо, науч. ред. С. Верижников, ред. Э. Любченко] / ЛенЗНИИЭП. – Л., 1971. – 63 с.
3. Попов И. Г. Цилиндрические стержневые системы / И. Г. Попов. – Л. ; М. : Гос. изд-во лит. по стр-ву и арх-ре, 1952. – 112 с.
4. Власов В. З. Общая теория оболочек и ее приложение в технике / В. З. Власов. – М. ; Л. : Гостехиздат, 1949. – 784 с.
5. Сіянов О. І. Металеві циліндричні стержневі покриття: конструювання та розрахунок : монографія / О. І. Сіянов. – Вінниця : ВНТУ, 2012. – 140 с.
6. ДБН В.1.2-2:2006 Навантаження і впливи / Мінбуд України. – К. : вид-во «Сталь», 2006. – 60 с.

**Сіянов Олександр Ілліч** – к.т.н., доцент кафедри промислового та цивільного будівництва Вінницького національного технічного університету

**Гаврилюк Андрій Миколайович** – магістрант Вінницького національного технічного університету

**Сіянов Олександр Ільич** – к.т.н., доцент кафедри промислового і громадянського будівництва Вінницького національного технічного університету

**Гаврилюк Андрій Николаевич** – магістрант Вінницького національного технічного університету

**Alexander Siyanov** – Ph.D., assistant professor of Department of Industrial and Civil Engineering Vinnytsia National Technical University

**Andrey Gavriluk** – master Vinnytsia National Technical University.