

## РОЗРАХУНОК СТІЙКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПОЛОГИХ ОБОЛОНОК З УРАХУВАННЯМ ДЕФЕКТІВ ПРИ ВИГОТОВЛЕННІ

© Дорофєєв В.С., Коломійчук Г.П., 2013

**Визначено мінімальні критичні навантаження та форми втрати стійкості моделей оболонок додатної гауссової кривини з початковими недосконалостями форми.**

**Ключові слова:** залізобетонна оболонка, стійкість, локальна недосконалість.

**The minimal critical loadings and forms of the stability lost of the symmetric positive gaussian curved models of the shells with local imperfections were determined.**

**Key words:** reinforced concrete shell, stability, local imperfection.

Розрахунок стійкості залізобетонних оболонок удосконалюється за новими експериментальними досягненнями, численними результатами, отриманими за допомогою математичних моделей, що описують поведінку матеріалу в конструкції під час навантаження і експлуатації, а також зміну самої деформувальної конструкції, яка втрачає з часом свій ресурс [1–6].

Відомо, що початкові недосконалісті форми поверхні оболонки (дефекти під час виготовлення) впливають на величину критичного навантаження. Аналіз експериментальних даних дослідів оболонок, виконаний у роботах [4, 5], показав, що при амплітуді недосконалісті, що дорівнює товщині оболонки, критичне навантаження зменшується майже в чотири рази (рис. 1, рис. 2).

У поправках до рекомендацій IASS [7] запропоновано вважати, що розрахункова величина початкової недосконалісті складається з недосконалісті  $w_{0,calc}$  (згинні моментні деформації) та  $w_{0,acc}$  – недосконалісті, яка залежить від точності виготовлення конструкції. Недосконалість, що враховує технологічні дефекти виготовлення, визначається за емпіричною формулою

$$w_{0,acc} = 0,05d + \frac{Ra}{2000} / \left( \frac{R/d}{1000} + \frac{1000}{R/d} \right), \quad (1)$$

де  $d$  – товщина оболонки;  $R$  – радіус кривини серединної поверхні; параметр “ $a$ ” залежить від жорсткості опалубкової форми:  $a=1$  – для жорсткої форми, яка забезпечує досить точне виготовлення оболонки;  $a=6$  – для гнучкої опалубкової форми. Сумарну недосконалість знаходять за формулою

$$w_0 = \sqrt{w_{0,calc}^2 + 1,4 \cdot w_{0,calc} \cdot w_{0,acc} + w_{0,acc}^2}. \quad (2)$$

Вирішення задачі втрати стійкості пружних оболонок подвійної додатної кривини для пояснення розбіжностей теоретичних та експериментальних даних виконано з використанням методу початкових недосконалістей. Згідно з цим методом замість сукупності всіх початкових недосконалістей оболонки, вводиться початкове еквівалентне відхилення від ідеальної форми  $W_0^e$ .

Зазвичай величину  $W_0^e$  розкладають в функціональний ряд з невідомими коефіцієнтами і досліджують її вплив на величину критичного навантаження [2]. Але через те, що початкові недосконалісті є випадковим, визначення цих коефіцієнтів стає деякою самостійною задачею, пов'язаною з конкретною технологією зведення оболонки і статистичним аналізом недосконалістей. Перспективнішим видається інший шлях. Можна задати обмеження на величину  $W_0^e$  і знайти такі значення коефіцієнтів, які найбільшою мірою зменшують критичне навантаження при цих обмеженнях [6].

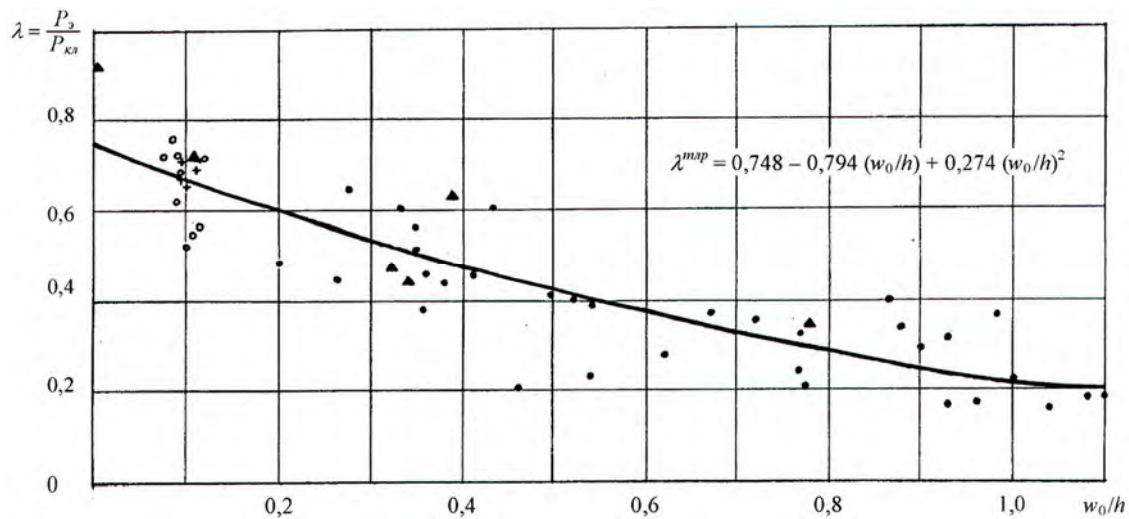


Рис. 1. Вплив амплітуди початкових недосконалостей форми на критичне навантаження замкнених циліндричних оболонок при осьовому стиску

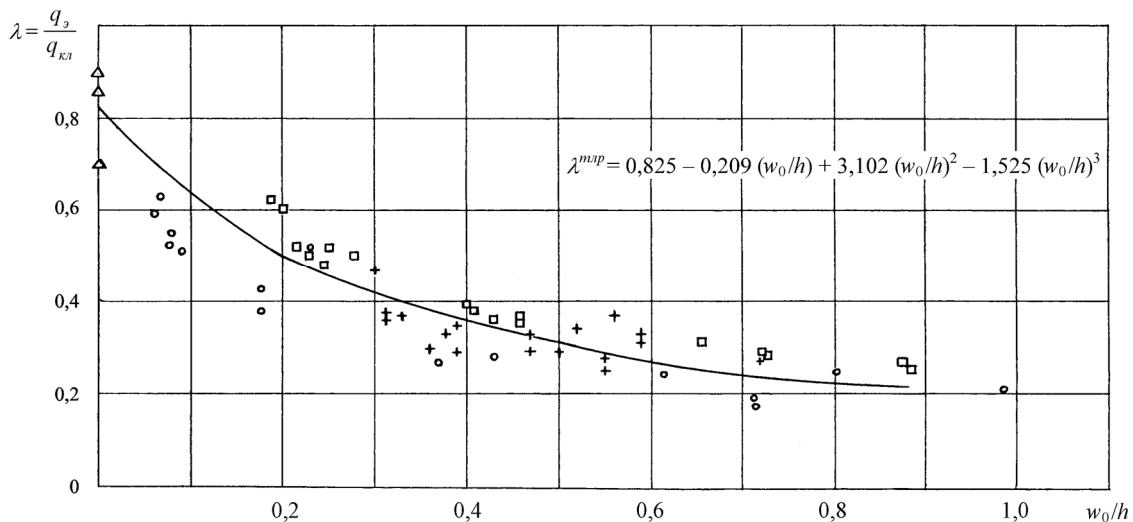


Рис. 2. Вплив амплітуди початкових недосконалостей форми на критичне навантаження відкритих сферичних оболонок при поперечному навантаженні

Численні виміри реальних конструкцій показали, що фактичні початкові недосконалості не мають регулярного розподілення, а є локальними, поширюючись в обмеженій області [2, 9].

Для виявлення мінімального граничного критичного навантаження пологої оболонки подвійної додатної кривини виділили форму недосконалості на плані оболонки в вигляді круглої локальної обмеженої вм'ятини [4].

Система диференціальних нелінійних рівнянь у переміщеннях приведена до системи алгебраїчних нелінійних рівнянь з використанням методу кінцевих різниць [4].

Положення локальної обмеженої вм'ятини на плані оболонки визначається точками кінцево-різницевої сітки, що збігаються з центрами вм'ятини ( $i, j$ ). Мінімальні розміри вм'ятини на плані оболонки залежать від відстані між вузлами кінцево-різницевої сітки тазначаються так, щоб кількість вузлів у напрямку координатних осей  $X$  ( $Y$ ) була не менше трьох у середині області вм'ятини. У вузлах, що потрапили у вм'ятину, визначаються аплікати відхилення геометрії оболонки вм'ятини від серединної поверхні оболонки і використовуються як вихідні дані під час формування розв'язуючої системи рівнянь [4].

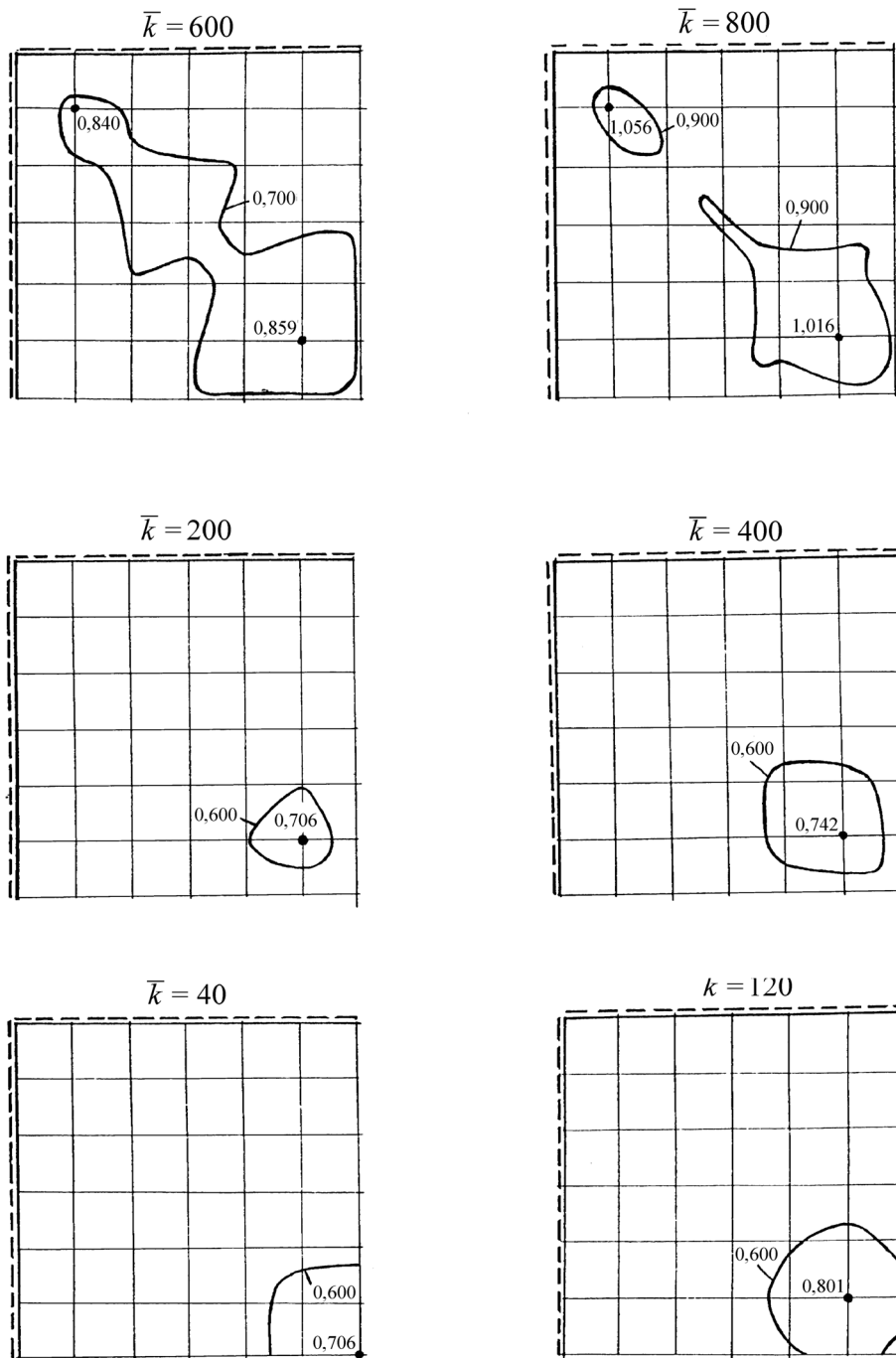


Рис. 3. Форми втрати стійкості: оболонки з вм'ятиною (6,6)

Ідеальні оболонки додатної гауссової кривини постійної товщини під дією рівномірно розподіленого «мертвого» навантаження втрачають стійкість по-різному, залежно від параметра кривини [9].

Будемо розрізняти пологі оболонки по величині параметру кривини ( $\bar{k} = a^2/(R_1 h) + b^2/(R_2 h)$ ), де  $a$  – довжина оболонки;  $b$  – ширина оболонки;  $h$  – товщина оболонки;  $R_1, R_2$  – радіуси кривини оболонки). Так,  $\bar{k} \leq 60$  – мала;  $60 < \bar{k} \leq 200$  – середня;  $200 < \bar{k} \leq 1000$  – велика;  $\bar{k} > 1000$  – дуже велика.

Оболонки малої кривини втрачають стійкість з прохлопування всього поля; середньої, великої і дуже великої кривини – випучуються з утворенням ізольованої одиної вм'ятини в куті, займаючи не більше 10 % поверхні оболонки.

Числовий експеримент виконано для симетричного випадку розміщення вм'ятини на плані оболонки. Закріплення квадратної оболонки додатної кривини по всіх чотирьох сторонах – шарнірне.

Під час переміщення локальної вм'ятини по плану оболонки визначалося критичне навантаження, а також форма втрати стійкості для різних кривин (рис. 3).

Положення вм'ятин, які найбільше зменшували величину критичного навантаження, були використані під час розроблення практичних рекомендацій з розрахунку стійкості пологих залізобетонних оболонок додатної кривини в доповненнях до Додатку [10]. Згідно з практичними рекомендаціями [11], критичне навантаження визначається:

$$q^{уст} = q_{рук}^{уст} \cdot \Delta^{nn} \quad (3)$$

Тут  $q_{рук}^{уст}$  – критичне навантаження, розраховане за «Руководством...» [10];  $D^{nn}$  – поправковий коефіцієнт для врахування впливу початкових недосконалостей форми серединної поверхні оболонки;  $q^{уст}$  – критичне навантаження, визначене з урахуванням невідгдних початкових недосконалостей.

Поправковий коефіцієнт  $\Delta^{nn}$  для розрахунку стійкості квадратних оболонок додатної кривини, наведений у таблиці, де  $R_1 = R_2 = R$  і  $a = b$ .

**Поправковий коефіцієнт  $D^{nn}$  для розрахунку стійкості оболонок двоякої кривизни**

$b/h$ $R/h$	100	120	140	160	180	200	220	240
1	2	3	4	5	6	7	8	9
200	1,094	0,838	0,633	1,111				
220	1,147	0,911	0,691	0,975	1,220			
240	1,191	0,984	0,748	0,791	1,165			
260		1,032	0,803	0,631	1,079			
280		1,078	0,861	0,675	0,966	1,205		
300		1,117	0,912	0,719	0,827	1,154		
320		1,153	0,965	0,762	0,659	1,083		
340			1,007	0,805	0,651	0,995	1,202	
360			1,042	0,846	0,685	0,888	1,160	
380			1,077	0,888	0,719	0,764	1,107	
400			1,106	0,930	0,755	0,622	1,038	
420			1,133	0,970	0,788	0,651	0,959	1,178
440				1,001	0,821	0,678	0,867	1,132
460				1,035	0,854	0,706	0,762	1,085
480				1,056	0,887	0,734	0,647	1,026
500	1,080	0,920	0,762	0,639	0,958	1,165		
520	1,103	0,950	0,789	0,663	0,882	1,128		
540	1,125	0,985	0,817	0,689	0,797	1,087		
560		1,005	0,844	0,711	0,704	1,035		
580		1,026	0,870	0,734	0,626	0,979	1,165	
600		1,047	0,896	0,756	0,647	0,917	1,133	
620		1,068	0,923	0,779	0,665	0,848	1,098	
640		1,088	0,950	0,802	0,686	0,773	1,058	
660		1,106	0,976	0,824	0,705	0,690	1,012	
680		1,123	0,995	0,846	0,723	0,625	0,959	1,152

1	2	3	4	5	6	7	8	9
700			1,009	0,867	0,742	0,641	0,905	1,117
720			1,031	0,891	0,762	0,659	0,846	1,085
740			1,047	0,921	0,779	0,674	0,779	1,046
760			1,067	0,937	0,801	0,693	0,712	1,006
780			1,078	0,953	0,818	0,707	0,636	0,960
800			1,095	0,978	0,838	0,726	0,633	0,914

### Висновки

1. Визначені найменші критичні навантаження і форми втрати стійкості симетричних моделей пологих оболонок додатної кривини з локальними обмеженими недосконаlostями форми (дефектами під час виготовлення) при шарнірному обпиранні.

2. Отримані поправкові коефіцієнти, які враховують вплив дефектів та дають змогу зблизити розбіжності експериментальних та теоретичних значень критичних навантажень.

1. Шугаев В.В. О расчетах устойчивости железобетонных сферических оболочек // *Строительная механика и расчет сооружений*. – 2007. – № 1. – С. 33–37. 2. Григолюк Э.И., Кабанов В.В. Устойчивость оболочек. – М.: Наука, 1978. – 360 с. 3. Isler Heinz. The stability of thin concrete Shells // *Buckling Shells. Proc. State of the Art Collog., Univ. Stuttgart, May 6–7, 1982*. – Berlin, 1982. – P. 645–672. 4. Коломійчук Г.П. Розрахунок пологих залізобетонних оболонок в нелінійній постановці з урахуванням початкових недосконаlostей. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Одеса, 2004. – 24 с. 5. Айзен Б.М. Расчет несущей способности сферических оболочек в условиях кратковременного и длительного действия нагрузки. Автореф. дис... канд. техн. наук. – Одесса, 1985. – 18 с. 6. Якушев В.Л. Определение экстремальных критических нагрузок при заданных ограничениях на начальные неправильности // *Вопросы гидродинамики, аэрофизики и прикладной механики*. – М.: Изд. МФТИ, 1985. – С. 117–123. 7. Dulaska E. Explanation of the chapter on stability of the "Recommendation for Reinforced Concrete Shells and Folded Plates" 1979 and a proposal its improvement/ *IASS Bulletin # 77, 1982*. 8. Dulaska E. The safety factor to be applied in Shells buckling analysis// *Acta Technica Acad. Shi Hung.*, 1986. – Vol. 99 (1–2). – P. 9–30. 9. Тимашев С.А. Устойчивость подкрепленных оболочек. – М.: Стройиздат, 1974. – 256 с. 10. Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. – М.: Стройиздат, 1979. 11. Коломійчук Г.П. Практические рекомендации по расчету устойчивости пологих железобетонных оболочек с учетом начальных несовершенств // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. – Вып. 22. – Одесса: Внешрекламсервис, 2010. – С. 138–144.