

УДК 624.074.4.012.45

**НЕСУЧА ЗДАТНІСТЬ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ОБОЛОНОК  
У ЗАГАЛЬНОМУ ВИПАДКУ АНІЗОТРОПІЇ ТА СКЛАДНОГО  
НАПРУЖЕНОГО СТАНУ**

**LOAD BEARING CAPACITY OF REINFORCED  
CONCRETE SHELLS IN GENERAL CASE OF ANISOTROPY  
AND COMPLEX STRESS STATE**

**Коломійчук Г.П., к.т.н., доцент, Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент,  
Коломійчук В.Г., студентка (Одеська державна академія будівництва  
та архітектури, м. Одеса)**

**Kolomiychuk G.P., PhD., associate professor, Maystrenko O.F., PhD.,  
associate professor, Kolomiychuk V.G., student (Odessa State Academy  
Civil Engineering and Architecture, Odessa)**

Виконано аналіз сучасних досліджень по визначенню несучої здатності залізобетонних оболонок. Удосконалена власна вирішуюча система нелінійних алгебраїчних рівнянь [1], що дозволяє визначати несучу здатність залізобетонних пошкоджених оболонок в нелінійній постановці з урахуванням тріщин.

Now the creation of large-span responsible thin-walled reinforced concrete shell structures only in exceptional cases is accompanied by full-scale modeling during the construction of unique construction objects.

The significant costs of such research and the use of software systems have led to the abandonment of full-scale modeling in favor of numerical calculations of theoretical models. The results of mathematical calculations and model experiments without proper justification are transferred to large-sized objects.

The world has accumulated significant amounts of information and a large number of specific experimental results on the study of reinforced concrete shell structures. However, systematization and generalization of all these data is difficult because of the heterogeneity of the tests, and therefore the differences of theoretical and experimental results on the

study of the carrying capacity of thin-walled shell structures have not been overcome.

The article analyzes the current research to determine the bearing capacity of reinforced concrete shell structures. The analysis provides new results, as well as problems that require further solutions. And the main problem for the solution is to obtain such a computational model that would accurately describe the behavior of reinforced concrete shell structures during operation.

The resolving system of non-linear algebraic equations obtained by the authors allows us to consider the behavior of reinforced concrete shell structures under the action of an arbitrary load in non-linear geometric and physical formulations with allowance for cracks. The design of the shell can simultaneously be in such stages: the elastic work of concrete; elastic - plastic work of concrete; crack in concrete; elastic - plastic work of reinforcement.

A feature of the resulting system of equations is that it allows you to perform calculations of reinforced concrete shell structures in the design of new construction objects, as well as calculations of damaged shells during operation. Damages are considered as initial data: change of geometry (shell thickness and its deflection) change in material properties (corrosion of concrete and reinforcement and the presence of cracks).

Ключові слова: залізобетонна оболонка, несуча здатність, тріщина, фізична нелінійність, пошкодження.

Keywords: reinforced concrete shell, load bearing capacity, crack, physical nonlinearity, damage.

**Вступ.** Загальновідомо, що залізобетон, як конструкційний матеріал, володіє рядом специфічних властивостей, що визначає складність розрахунку залізобетонних конструкцій. Стосовно до розрахунку залізобетонних оболонок, можна виділити два напрямки. Перший пов'язаний із методом граничної рівноваги, однак, він дозволяє оцінити ступінь досягнення лише одного з граничних станів – по міцності [2-6]. Другий напрямок пов'язаний із розробкою методів розрахунку на основі деформованих моделей [7-11].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** У дослідженнях, виконаних раніше, розглядаються залізобетонні оболонки без врахування виникнення у них дефектів під час будівництва та пошкоджень, які вони отримали в процесі експлуатації, під дією агресивного навколишнього середовища та непередбачуваних навантажень.

У роботі [3] робиться розрахунок несучої здатності гладких залізобетонних оболонок подвійної кривизни по отриманій експериментально локальній схемі руйнування у вигляді конуса з вершиною у місці прикладання зосередженого навантаження. Дослідження показали, що в момент руйнування оболонки прогини у вм'ятині були більшими, ніж половина початкової стріли підйому частини оболонки в зоні руйнування, і така значна зміна геометрії враховувалася в розрахунках по методу граничної рівноваги. Отримані результати засвідчують про те, що несуча здатність гладких залізобетонних оболонок з різною формою поверхні може бути з достатньою точністю визначена за допомогою наведених у роботі залежностей, але необхідно в якості вихідної інформації мати експериментальну схему руйнування оболонки, а без неї такі розрахунки виконати неможливо.

У роботі [9] робиться спроба розрахунку стійкості залізобетонних оболонок за старим Керівництвом [12], але з урахуванням випадкових геометричних недосконалостей (відхилення геометрії від ідеальної поверхні). Для порівняння використовуються лише Рекомендації IASS [13], у яких застосовується розрахункова величина початкового відхилення (моментні деформації) та дефекти, що залежать від точності виготовлення конструкції. Виконані розрахунки критичного навантаження втрати стійкості для сферичної залізобетонної оболонки при тривалій дії розподіленого навантаження по Рекомендаціях IASS та нижнього критичного навантаження по Керівництву близькі між собою.

Останнім часом наукові дослідження направлені на розрахунки забезпечення надійної експлуатації та безпечного використання великопротітних залізобетонних оболонок. Причин тут є багато, але і аварії таких конструкцій вимагають розробки таких досліджень [14].

Вміння правильно оцінити технічний стан залізобетонних

оболонки, що експлуатуються тривалий час, досить складне завдання і вимагає виконання наукових досліджень у цьому напрямі [15].

Важливо також вміти завчасно підтримувати оболонкові конструкції в задовільному технічному стані.

У роботі [16] розглянуті питання відновлення несучої здатності залізобетонних пологих геометрично нелінійних оболонок на прямокутному плані шляхом збільшення їх товщини в центрі або опірній частині конструкції. Враховуються умови міцності обмеження на величину критичного навантаження в залізобетонній оболонці при дії статичного навантаження для різних типів обпирання її країв. Розроблений алгоритм оптимізації розподілу товщини вздовж серединної поверхні, що дозволяє використовувати його при відновленні несучої здатності та експлуатаційних характеристик пологих залізобетонних оболонок покриттів будівель і споруд.

**Цілі та завдання.** Повний розрахунок оболонок, як на міцність так і на стійкість, повинен виконуватися з урахуванням трьох видів нелінійностей: геометричної, фізичної та конструктивної. Однак конструктивна нелінійність, в загальному випадку, не залежить від інших видів нелінійностей, що дозволяє при розрахунках оболонок разом розглядати тільки геометричну та фізичну нелінійності.

Оскільки врахування цих двох видів нелінійностей значно ускладнюють отримання рішення, то зазвичай розглядаються окремі випадки, в котрих, залежно від прийнятих посилянь, застосовується або геометрична, або фізична нелінійність, тому в такій постановці виконано порівняно мало робіт, а особливо – з розрахунку несучої здатності залізобетонних оболонок, що і є ціллю цієї статті.

**Основна частина.** Залізобетонні оболонкові конструкції розраховуються різними методами теорії пружності, пластичності та граничної рівноваги. Широко застосований апарат лінійної механіки дозволяє визначати напружено деформований стан оболонок з немалою похибкою, так як реальні конструктивні матеріали (бетон, арматура та інші), з яких виготовляється конструкція, деформуються нелінійно. Особливо відчутна ця похибка для оболонок шарнірно обпертих по контуру (таблиця).

Математична модель розрахунку залізобетонної оболонки

вміщує рівняння рівноваги, геометричні рівняння та фізичні співвідношення. Останні зазвичай будуються на основі подання залізобетону з тріщинами як суцільного середовища. В разі неврахування дійсної орієнтації тріщин багато авторів компенсували недосконалість ортотропної фізичної моделі відносним зниженням жорсткості оболонки при закручуванні.

Таблиця

Похибка між навантаженнями початку пластичних деформацій у бетоні, визначених для залізобетонних оболонок додатньої кривизни, розрахованих в геометрично лінійній і нелінійній постановках

Відносна геометрична кривизна						
20	40	80	120	160	180	200
Шарнірно оперта оболонка додатної кривизни						
47,0	58,3	55,6	61,0	63,5	68,4	66,7
Шарнірно нерухомо оперта оболонка додатної кривизни						
20,0	7,4	3,8	2,4	1,5	1,4	0,8

Найбільш досконало властивості деформування тонкостінних залізобетонних конструкцій відображає анізотропна модель, запропонована М.І. Карпенком, яка використана в побудові вирішуючої системи рівнянь. Коефіцієнти податливості залежать від схеми та орієнтації тріщин, армування, характеристик матеріалів, особливостей зчеплення бетону та арматури, інших факторів. Нелінійність співвідношень зумовлена залежністю коефіцієнтів матриці жорсткостей від рівня зусиль. Оскільки ця матриця заповнена, то кривизни залежать не тільки від моментів, але й від мембранних сил, а деформації серединної поверхні зумовлені як мембранними силами, так і моментами.

Для моделювання поведінки залізобетонної оболонки під дією навантаження та навколишнього середовища використовується удосконалений метод послідовних наближень. Рішення задачі кроково-ітераційним методом з деякою модифікацією дозволяє найбільш чітко відобразити нелінійний процес деформування оболонки в наступних стадіях її роботи: пружній; пружно-пластичній роботі бетону; з тріщинами в бетоні при пружній роботі арматури; з тріщинами в бетоні при пластичній роботі арматури.

На першому кроці для залізобетонної оболонки, що проектується, задаємо: початкове навантаження та крок його зміни (при високих рівнях крок навантаження модифікується); поле початкових дефектів (відхилення форми оболонки, що відповідають нормативним документам на допуски виготовлення і в процесі розрахунків вони не змінюються); початкові наближення (поле переміщень, яке змінюється під дією навантажень) для рішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь із змінними коефіцієнтами.

На першому кроці для залізобетонної оболонки, що експлуатується, задаємо: навантаження по полю оболонки, яке отримане з експертних досліджень, та крок його зміни (при високих рівнях крок навантаження модифікується); поле отриманих пошкоджень під час експлуатації (відхилення форми оболонки і в процесі розрахунків вони не змінюються; тріщини, їх габаритні розміри та місце розташування [17]; пошкодження бетону та арматури корозією); початкові наближення (поле переміщень, що співпадає на початку з відхиленнями форми оболонки і яке змінюється під дією навантажень) для рішення системи нелінійних алгебраїчних рівнянь із змінними коефіцієнтами.

Отримані рішення аналізуються на появу пластичних деформацій і тріщин у бетоні. Якщо навантаження невелике і не викликає появи пластичних деформацій і тріщин, то процес повторюється для нового кроку навантаження із застосуванням методу руху по параметру. В іншому випадку запам'ятовується поле переміщень, визначаються внутрішні зусилля, за якими визначається стадія роботи вузла оболонки та змінюється матриця жорсткостей (36 елементів) із застосуванням внутрішнього циклу мікроітерацій. По новому полю жорсткостей знову виконується рішення нелінійних алгебраїчних рівнянь із змінними коефіцієнтами і отримується нове поле переміщень. Якщо наступне поле переміщень відрізняється від попереднього більше за задану точність, то застосовується метод неповної релаксації. Коефіцієнти релаксації при невідомих визначаються по методу найменших квадратів по трьох попередніх значеннях полів переміщень, що зберігалися. Такий підхід дозволяє згладити процес відхилення поля переміщень. Аналогічні розрахунки виконуються для всіх вузлів поля оболонки для визначення появи тріщин та їх

ідентифікації із зміною поля жорсткостей.

На кожному кроці розрахунку визначається стадія роботи вузла оболонки та аналізуються умови утворення схем тріщин, що пересікаються, або не пересікаються за теорією деформування залізобетону з тріщинами М.І. Карпенка [18–20]. Якщо в вузлі виникла одна тріщина, то її орієнтація запам'ятовується і в наступних розрахунках уже фігурує як відома. Оболонка в цьому вузлі продовжує працювати з однією тріщиною навіть у разі розвантаження, коли умови появи тріщини не виконуються.

Після виконання обчислень умови виникнення тріщин по всіх вузлах кінцево-різницевої сітки та зміни за необхідності поля жорсткостей, для одного кроку по навантаженню переходимо на нову ступінь навантаження, використовуючи метод руху по параметру.

**Висновки та перспективи досліджень.** Удосконалена раніше отримана власна вирішуюча система нелінійних алгебраїчних рівнянь, що дозволяє визначати несучу здатність залізобетонних пошкоджених оболонок у нелінійній постановці з урахуванням тріщин та недосконалостей форми під час будівництва. Визначені навантаження початку виникнення пластичних деформацій у бетоні для залізобетонних оболонок додатньої кривизни, розрахованих у геометрично лінійній і нелінійній постановках для різних кривизн та обпирання, а їх аналіз показав значну розбіжність для шарнірно обпертих оболонок.

1. Коломійчук Г.П. Розрахунок пологих залізобетонних оболонок в нелінійній постановці з урахуванням початкових недосконалостей: Автореферат дис. на здоб. вч. ст. канд. техн. наук. – Одеса, 2004. – 24 с.

2. Шугаев В.В. Инженерные методы в нелинейной теории предельного равновесия оболочек / В.В. Шугаев. –М.: Готика, 2001. –368 с.

3. Шугаев В.В. Исследование локальных схем излома гладких железобетонных оболочек с различной кривизной поверхности при действии сосредоточенной нагрузки / В.В. Шугаев // Строительная механика и расчет сооружений, 2006. – №1. – С. 21 – 27.

4. Исламов К.Ф. Оценка несущей способности пластин и оболочек на основе теории предельного равновесия: Автореферат дисс.на соиск. уч. ст. канд. техн. наук. – Набережные Челны: Камская государственная инженерно – экономическая академия, 2007. – 23 с.

5. Янковский А.П. Оценка предельных уровней нагружения сложно армированных оболочек вращения в условиях ползучести / А.П.

Янковский // Проблемы прочности и пластичности, 2010. – Вып. 72. – С. 63 – 72.

6. Дорофеев В.С. Несущая способность квадратных шарнирно опертых железобетонных оболочек с несовершенствами / В.С. Дорофеев, Г.П. Коломийчук // Вісник ОДАБА, Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2006. – Вип. 21. – С. 86 – 93.

7. Isler Heinz. The stability of thin concrete Shells / Heinz Isler // Buckling Shells. Proc. State of the Art Collog., Univ. Stuttgart, May 6–7, 1982. – Berlin, 1982. – P. 645 – 672.

8. Dulaska E. The safety factor to be applied in Shells buckling analysis / E. Dulaska // Acta Technica Acad. Shi Hung., 1986. –Vol. 99 (1–2). – P. 9 – 30.

9. Шугаев В.В. О расчетах устойчивости железобетонных сферических оболочек / В.В. Шугаев // Строительная механика и расчет сооружений, 2007. – №1. – С. 33 – 37.

10. Дорофеев В.С. Расчет пологих железобетонных оболочек в нелинейной постановке / В.С. Дорофеев, Г.П. Коломийчук // Польсько-українсько-литовський збірник праць "Теоретичні основи будівництва". – Варшава, 2010. – №18. – С. 87 – 94.

11. Дорофеев В.С. Сучасні вимоги до проектування великопрогінних тонкостінних залізобетонних оболонок покриттів / В.С. Дорофеев, Й.Й. Лучко, Г.П. Коломийчук // Зб. наук. праць "Механіка і фізика руйнування будівельних матеріалів та конструкцій". – Львів: Каменяр, 2009. – Вип. 8. – С. 416 – 425.

12. Recommendation for Reinforced Concrete Shells and Folded Plates, working group hr. 5. IASS. – Madrid, 1979. – 66 p.

13. Руководство по проектированию железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий. – М.: Стройиздат, 1979. – 421 с.

14. Шугаев В.В. Аварии железобетонных конструкций и их предупреждение / В.В. Шугаев, Б.С. Соколов // Бетон и железобетон – пути развития. Научные труды 2 Всероссийской (международной) конференции по бетону и железобетону. Том 1. Пленарные доклады. – М.: Дипак, 2005. – С.371 – 380.

15. Коломийчук Г.П. Техническая оценка железобетонных оболочек покрытия / Г.П. Коломийчук // Вісник ОДАБА, Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2009. – Вип. 34. – Частина 2. – С. 428 – 435.

16. Ступишин Л.Ю. Восстановление несущей способности и эксплуатационных характеристик геометрически нелинейных пологих оболочек на прямоугольном плане / Л.Ю. Ступишин, А.Г. Колесников // Промышленное и гражданское строительство, 2014. – №2. – С. 51 – 53.

17. Коломийчук Г.П. Определение габаритных параметров трещин на поверхности пологих железобетонных оболочек и их систематизация для



учета в деформационных математических моделях / Г.П. Коломийчук // Вісник ОДАБА, Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2007. – Вип. 24. – С. 133 – 138.

18. Дорофеев В.С. Трещинообразование в пологих железобетонных оболочках двойкой кривизны / В.С. Дорофеев, Г.П. Коломийчук // Вісник ОДАБА, Одеса: Зовнішрекламсервіс, 2006. – Вип. 23. – С. 77 – 81.

19. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами / Н.И. Карпенко. – М.: Стройиздат, 1976. – 208 с.

20. Карпенко Н.И. О расчете железобетонных оболочек покрытий и емкостей / Н.И. Карпенко // Прогрессивные конструкции элеваторов и совершенствование методов их расчета. – М.: Стройиздат, 1984. – С. 3–14.

**УДК 691;620.191.33;539.3**

**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ РОЗКЛАДАННЯ ЗА ВЛАСНИМИ  
ФУНКЦІЯМИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНЬ І  
ДЕФОРМАЦІЙ БІЛЯ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ  
НОРМАЛЬНОГО ВІДРИВУ В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ  
ЕЛЕМЕНТАХ, ЩО ЗГІНАЮТЬСЯ**

**APPLICATION OF THE EIGENFUNCTION EXPANSION  
METHOD FOR RESEARCH TENSIONS AND DEFORMATIONS  
NEAR A MODE I CRACK TIP IN REINFORCED CONCRETE  
BENDING ELEMENTS**

**Майстренко О.Ф., к.т.н., доцент, Зінченко Г.В., аспірантка,  
(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м Одеса)**

**Maystrenko O.F., Ph.D., senior lecturer, Zinchenko H.V, doctoral  
student, (Odessa State Academy of Building and Architecture, Odessa)**

У статті наведено асимптотичний аналіз напружено-деформованого стану біля вершини тріщини нормального відриву в середовищі з пошкодженістю. Описано побудову асимптотичного рішення задачі, заснованого на методі розкладання за власними функціями.

For the rational reinforced concrete constructions and their structures design it is necessary to improve calculation method, that