

**ОГЛЯД ОСОБЛИВОСТЕЙ ВРАХУВАННЯ НЕЛІНІЙНОСТІ
ПРИ ПРОЕКТУВАННІ БУДІВЕЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ У ПК
«ЛІРА-САПР» ТА «SCAD»**

**REVIEW OF NONLINEARITY FEATURES FOR DESIGNING
CONSTRUCTION IN SOFTWARE COMPLEXES "LIRA-SAPR"
AND "SCAD"**

Вінцюк М.В., магістр будівництва, **Самчук В.П.,** к.т.н., доц.,
(Луцький національний технічний університет, м. Луцьк)

**M. Vintsyuk, MSc in civil engineering, V. Samchuk, Ph.D. in
Engineering, Associate Professor, (Lutsk National Technical University)**

Нормативні документи, що діють на території України, рекомендують під час розрахунку будівельних конструкцій враховувати нелінійні характеристики матеріалів. У публікації виконано огляд методів і способів врахування різного роду нелінійностей під час розрахунку конструкцій в ПК «ЛІРА-САПР» та «SCAD».

Normative documents, which are valid on the territory of Ukraine, are recommended during the calculation of building structures to take into account nonlinear characteristics of materials. The publication reviews the methods of taking into account various nonlinearities during the calculation of structures in the SC "LIRA-SAPR" and "SCAD".

Calculation of structures should be as accurate as possible to reflect the actual operating conditions of the object and its stress-strain state.

The tasks of calculating bearing structures focused on refined prediction of the peculiarities of the system's behavior at all stages of its work, including the stages preceding the destruction, can often not be solved by methods of linear construction mechanics. Deviations from Hooke's law (physical non-linearity), the refusal to consider equilibrium conditions in geometric terms of the undeformed state (geometric nonlinearity), and the consideration of a possible change in the calculation scheme in the process of deformation (constructive nonlinearity) constitute the usual "set of nonlinearities".

In order to analyze as accurately as possible, the work of the design at all stages of its load, the calculation must be performed on the basis of a calculation model, which must take into account the factors that have a significant impact on the stress and deformed state of structures. In forming the calculation model, as a rule, it is advisable to take into account nonlinear effects: the geometric and physical nonlinearity of the elements and the system as a whole, the effect of structural deformations on the change in the values of the load on it, and so on.

Modern software systems make it possible to take into account physical, geometric and constructive nonlinearities. This allows for a more precise calculation of building structures in order to find the possibility of saving materials and studying the actual operation of the construction at the stages of its construction and operation.

Ключові слова: нелінійність, нелінійний розрахунок, розрахунок будівельних конструкцій

Keywords: nonlinearity, nonlinear calculation, calculation of building constructions

Постановка проблеми. Розрахунок конструкцій повинен якомога достовірніше відображати дійсні умови роботи об'єкта та його напружено-деформований стан. Якщо задача розв'язується в лінійній постановці, тоді приймається лінійна залежність між силами, що діють на конструкцію, і переміщеннями її точок, а в основі фізичних рівнянь, як правило, лежить узагальнений закон Гука. Насправді це часто не відповідає дійсності. Наприклад, бетон, характеризується нелінійною залежністю між напруженнями та деформаціями, навіть при невеликих навантаженнях. Така нелінійність називається фізичною. При значних переміщеннях елементів конструкцій необхідно враховувати геометричну нелінійність. Особливе місце займає конструктивна нелінійність, пов'язана зі зміною розрахункової схеми конструкції в процесі навантаження.

Завдання розрахунку несучих конструкцій, орієнтовані на уточнене прогнозування особливостей поведінки системи на усіх етапах її роботи, включаючи ті, що передують руйнуванню, найчастіше не можуть бути вирішені методами лінійної будівельної механіки. Відхилення від закону Гука (фізична нелінійність), відмова від розгляду умов рівноваги в геометричних термінах

недеформованого стану (геометрична нелінійність), врахування можливої зміни розрахункової схеми в процесі деформування (конструктивна нелінійність) – складають звичайний «набір нелінійностей».

З метою якомога точнішого аналізу роботи конструкції на усіх етапах її навантаження, розрахунок необхідно виконувати на основі розрахункової моделі, яка повинна враховувати чинники, що мають істотний вплив на напружений і деформований стан конструкцій. При формуванні розрахункової моделі, як правило, доцільно врахувати нелінійні ефекти: геометричну та фізичну нелінійність елементів і системи в цілому, вплив деформацій конструкцій на зміну значень діючих на неї навантажень, тощо.

Аналіз останніх досліджень. Для розрахунку та конструювання будівельних конструкцій широко використовуються програмні комплекси, серед яких особливої уваги заслуговують ПК «ЛІРА-САПР» та «SCAD».

Опису їх функціональних можливостей присвячено чимало робіт, зокрема [1], [2] та [3]. Проте актуальними залишаються питання пов'язані з оглядом та аналізом методів нелінійного розрахунку, які дозволяють проводити уточнене проектування будівельних конструкцій, яке, у свою чергу, приведе до економного використання будівельних матеріалів.

Метою дослідження є аналіз методів проектування, які дозволяють проводити уточнений розрахунок будівельних конструкцій з метою пошуку можливості економії матеріалів і дослідження реальної роботи конструкції на етапах її зведення та експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Врахування нелінійної роботи залізобетону в ПК «ЛІРА-САПР» представлений методом «Інженерна нелінійність». Цей метод дозволяє визначити реальні жорсткісні характеристики поперечного перерізу, які можуть бути заниженими у зв'язку з появою тріщин, пластичними деформаціями бетону й арматури.

У ПК «ЛІРА-САПР» для вирішення фізично та геометрично нелінійних, а також задач з конструктивною нелінійністю і попереднього напруження призначений нелінійний процесор. У фізично нелінійних задачах відсутня лінійна залежність між напруженнями та деформаціями. Матеріал конструкції

підпорядковується нелінійному закону деформування. Вирішення таких завдань проводиться кроковим методом.

У геометрично нелінійних задачах відсутня лінійна залежність між деформаціями та переміщеннями. Вирішення цих завдань проводиться також кроковим методом, причому крок вибирається автоматично. У задачах з конструктивною нелінійністю має місце зміна розрахункової схеми під час деформування конструкції. Так, наприклад, у контактних задачах при досягненні деякою точкою конструкції певної величини переміщення, виникає контакт цієї точки з опорою. При вирішенні задач конструктивної нелінійності, а також у задачах з односторонніми зв'язками і такими, які враховують наявність тертя, застосовується кроково-ітераційний метод. При вирішенні задач, які моделюють пружно-пластичну роботу матеріалу, що описується діаграмою Прандтля, також застосовується кроково-ітераційний метод.

Нелінійний процесор реалізує кілька методів для вирішення нелінійних задач різних типів:

– кроковий метод (рис. 1), як правило, застосовується для вирішення завдань фізичної і геометричної нелінійності.

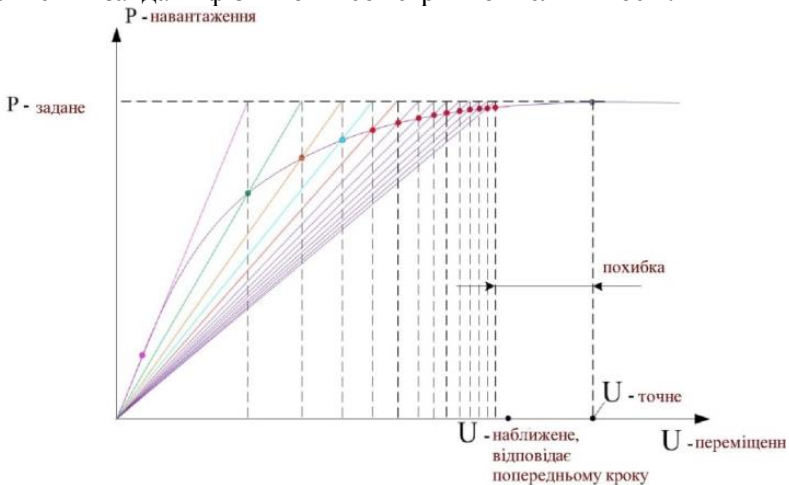


Рис. 1. Кроковий метод

– метод січних (метод Біргера, рис. 2), як правило, застосовується для вирішення фізично нелінійних задач у режимі «інженерна нелінійність».

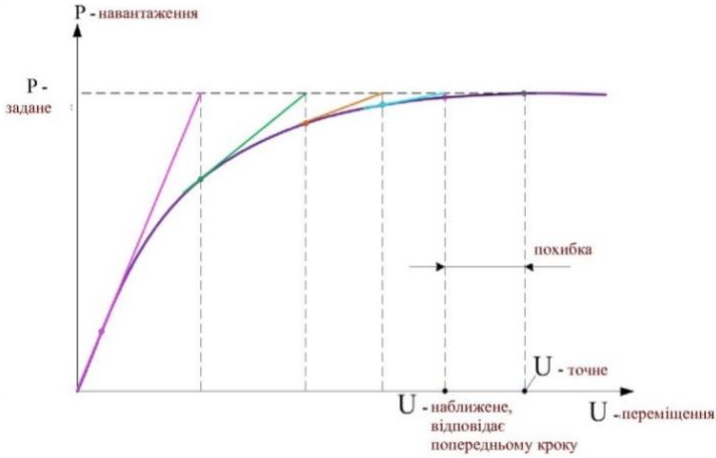


Рис. 2. Метод січних

– ітераційний метод (спрощений метод Ньютона, рис. 3.) застосовується для вирішення завдань конструктивної нелінійності (односторонні зв'язку) і ґрунтових масивів.

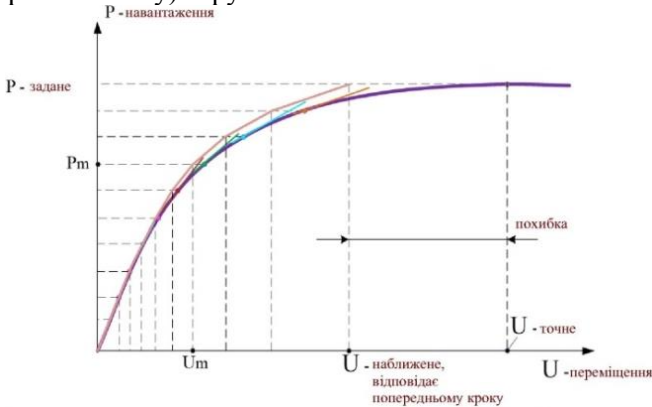


Рис. 3. Ітераційний метод

Розглянемо алгоритми створення в ПК «ЛІРА-САПР» розрахункових моделей з врахуванням різних видів нелінійності.

Фізична нелінійність.

1. Створення розрахункової схеми.

1.1. Задання вхідних даних (геометрія, граничні умови, навантаження, характеристики жорсткості).

1.2. Задання скінченних елементів, які враховують фізичну нелінійність.

1.3. Задання законів нелінійного деформування основного та армуючого матеріалів, закон повзучості, задання параметрів арматурних включень.

2. Моделювання нелінійних навантажень. У таблиці моделювання нелінійних навантажень необхідно вказати кількість кроків, коефіцієнти до навантажень, сформувані послідовність завантаження, задати вік бетону.

3. Розрахунок. На кожному кроці для елементів обчислюються зусилля, для вузлів – переміщення. Враховується інформація про стан матеріалу в елементах конструкції. Також визначаються НДС конструкції з врахуванням впливу повзучості в заданий момент часу.

4. Аналіз.

Геометрична нелінійність.

1. Створення розрахункової схеми.

1.1. Задання вхідних даних (геометрія, граничні умови, навантаження, характеристики жорсткості).

1.2. Задання скінченних елементів, які враховують геометричну нелінійність.

2. Моделювання нелінійних навантажень. Заповнення таблиці моделювання нелінійних навантажень, вибір методу розрахунку: перший тип – простий кроковий, другий – автоматичний вибір кроку.

3. Розрахунок. На кожному кроці для елементів обчислюються зусилля, для вузлів – переміщення.

4. Аналіз.

Конструктивна нелінійність.

1. Створення розрахункової схеми

1.1. Задання вхідних даних (геометрія, граничні умови, навантаження, характеристики жорсткості).

1.2. Задання скінченних елементів, які враховують конструктивну нелінійність.

2. Моделювання нелінійних навантажень. У таблиці моделювання нелінійних навантажень необхідно вказати кількість кроків, коефіцієнти до навантажень, сформувані послідовність завантаження, задати вік бетону.

3. Розрахунок. У процесі розрахунку на кожній ітерації генерується нова розрахункова схема, яка враховує виключені зв'язки на даній ітерації. Розрахунок закінчується, коли

розрахункова схема на n етапі відповідає розрахунковій схемі на $n-1$ етапі.

4. Аналіз.

ПК «SCAD» також дозволяє розраховувати нелінійні системи.

Геометрично нелінійна робота пружної системи пов'язана з необхідністю враховувати зміни геометрії системи при її деформації під дією навантажень. При цьому можуть розглядатися геометричні спотворення різної величини, але в ПК «SCAD» передбачається можливість обліку тільки, так званого, «наближення Кармана», коли передбачається, що квадрати кутів повороту елементів розглянутої розрахункової схеми є величинами того ж порядку меншості, що і відносні подовження в матеріалі, які у свою чергу вважаються малими в порівнянні з одиницею [3].

Розглядається взаємодія між прогинами та подовжніми зусиллями (явище подовжнього вигину у стрижнях) коли, наприклад, для гнучкої пластини товщиною h замість лінійного рівняння:

$$\frac{D}{h} \nabla^2 \nabla^2 \omega = \frac{q}{h}, \quad (1)$$

використовуються рівняння:

$$\frac{D}{h} \nabla^2 \nabla^2 \omega = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} - 2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} + \frac{q}{h}, \quad (2)$$
$$\nabla^2 \nabla^2 \phi = E \left[\left(\frac{\partial^2 \omega}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 \omega}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 \omega}{\partial y^2} \right],$$

відносно функції прогинів $\omega(x, y)$ і функції напружень $\phi(x, y)$, через яку визначаються мембранні зусилля як:

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2}; \sigma_y = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2}; \tau_{xy} = \frac{\partial^2 \phi}{\partial x \partial y}.$$

У (1) і (2) використано позначення диференціального оператора

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2},$$

де: q – величина навантаження.

Нелінійні розрахунки в ПК «SCAD», так як і в ПК «ЛІРА-САПР», виконуються з використанням крокового методу в декількох його модифікаціях:

- простий кроковий метод;
- кроковий метод з уточненнями;

– кроково-ітераційний.

Реалізована можливість дослідження історії нелінійного завантаження у вигляді задання послідовності окремих їх варіантів. У цьому випадку початок застосування нового нелінійного завантаження відповідає закінченню попереднього, тобто нове завантаження – продовження попереднього. Зокрема, можливе використання раніше змодельованого завантаження, але з від'ємною величиною коефіцієнта, що дозволяє дослідити повний цикл "навантаження-розвантаження". Цей прийом дає можливість оцінити точність розрахунку стосовно розбіжностей початкового та кінцевого стану системи.

Аналіз напружено-деформованого стану конструкції з урахуванням нелінійних ефектів виконується в тих випадках, коли в розрахунковій схемі задано принаймні один нелінійний елемент. У якості таких елементів можуть бути призначені стержні різного вигляду, три- і чотирикутні елементи оболонки, для яких передбачено врахування геометричної нелінійності, а також одно- та двовузлові елементи, що моделюють односторонні зв'язки та вантові елементи. Допускається комбінування в одній задачі лінійних та нелінійних скінченних елементів.

Висновки. Сучасні програмні комплекси дають можливість врахувати фізичну, геометричну та конструктивну нелінійності. Це дозволяє проводити уточнений розрахунок будівельних конструкцій з метою пошуку можливості економії матеріалів і дослідження реальної роботи конструкції на етапах її зведення та експлуатації.

На даний момент у ПК «ЛІРА САПР» та «SCAD» реалізовано врахування таких видів нелінійностей як фізична, геометрична та конструктивна.

1. Городецкий А.С. Вопросы расчета конструкций в упругопластической стадии с учетом применения ЭЦВМ // ЭЦВМ в строительной механике. Труды первого всесоюзного совещания по применению ЭЦВМ в строительной механике (г. Ленинград, 1963г.) – Л.-М.: Издательство литературы по строительству, 1966. – С. 52-57. 2. Городецкий А.С. К расчету тонкостенных железобетонных конструкций в неупругой стадии // Сборник трудов НИИСК «Строительные конструкции». К.: Будівельник, 1965.- №3. – С.21-27. 3. Перельмутер А.В., Сливкер В.І. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. - М.: ДМК Прес, 2007. - 600 с., ил.