

УДК 624.012.45: 624.074.1

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ РОЗРАХУНКУ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ПРОСТОРОВИХ РАМНИХ КОНСТРУКЦІЙ

**Ковров А.В.** *к.т.н., проф.,* **Кушнір О.М.** *к.т.н., доц.,*  
**Ковтуненко О.В.** *к.т.н., доц.*

*Одеська державна академія будівництва та архітектури*

**Актуальність досліджень.** Практика інженерного проектування вимагає наявності достовірних методів розрахунку, які дозволяють визначати величини розрахункових зусиль і переміщень та відображають реальну роботу конструкцій.

**Мета роботи** – на підставі аналізу існуючих методів розрахунку залізобетонних рамних конструкцій обґрунтувати доцільність розвитку чисельно-аналітичного методу граничних елементів.

**Основна частина.** Для визначення напружено-деформованого стану залізобетонних просторових рамних конструкцій, можна виділити чотири основні існуючі групи методів: аналітичні, практичні, чисельні та чисельно-аналітичні (рис. 1).

Аналітичні методи ґрунтуються на методах будівельної механіки стрижневих систем, теорії пружності і теорії складених стрижнів для плоских і просторових конструкцій [1, 2, 3, 4]. Розрахунок зводиться до складання й розв'язання систем рівнянь – алгебраїчних або диференціальних відповідно для стрижневих і континуальних конструкцій. Великий внесок у створення і розвиток аналітичних методів розрахунку рамних конструкцій внесли роботи таких відомих вчених як: П.П.Шагін [5], Б.М. Жемочкін [6] та ін.

Найбільш поширеними аналітичними методами є: метод сил, метод переміщень, змішаний метод та інші. У методі сил основна система приймається шляхом виключення «зайвих» зв'язків у вихідній, таким чином, щоб вона перетворювалася на статично визначену.

До основних недоліків методу сил відносять значну трудомісткість, пов'язану як з побудовою одиничних і вантажних епюр (визначення опорних реакцій і ординат епюр в характерних перетинах), так і з обчисленням коефіцієнтів канонічних рівнянь шляхом перемноження епюр.

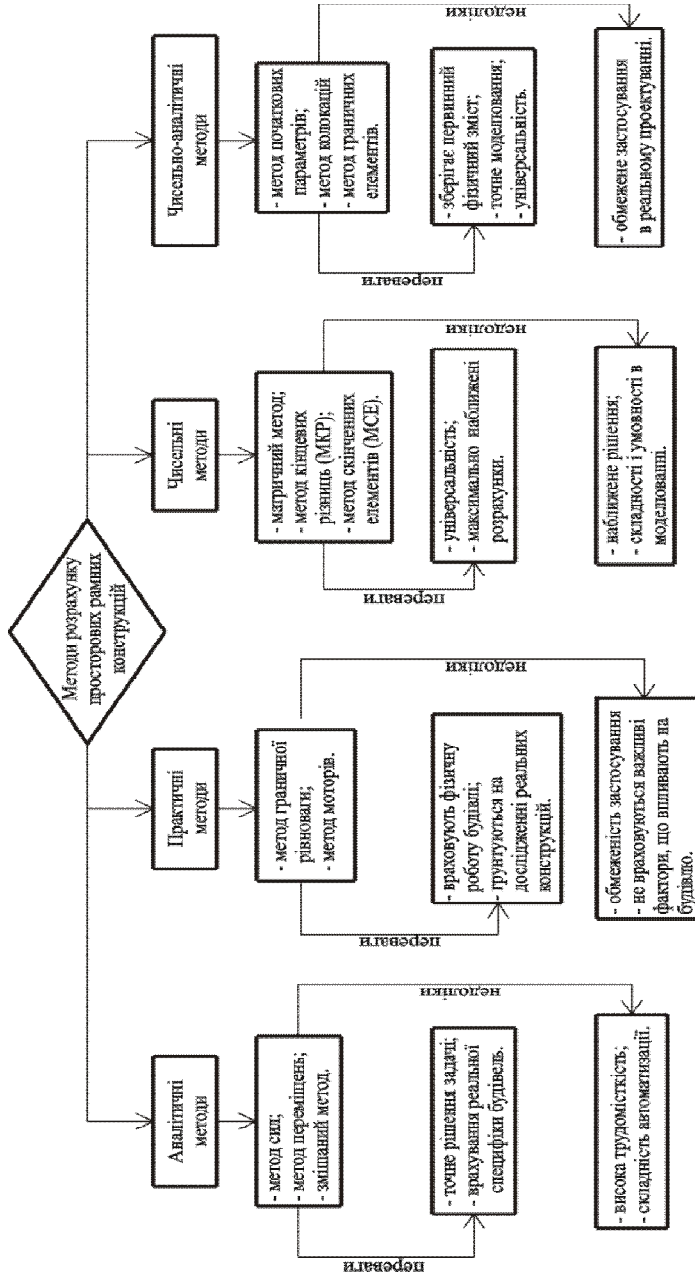


Рис. 1. Класифікація основних методів розрахунку просторових рамних конструцій

Ці недоліки значною мірою відсутні в методі переміщень, особливо при розрахунку просторових рамних конструкцій. Невідомими в методі переміщень є кути повороту жорстких вузлів і незалежні лінійні переміщення всіх вузлів, основна схема створюється накладенням зв'язків на вихідну схему.

Розглядаючи розрахунок просторових рамних конструкцій методом переміщень, слід зазначити, що ступінь кінематичної невизначеності, тобто ступінь рухливості вузлів, як і у випадку плоскої рами, дорівнює сумі невідомих кутів повороту і лінійних переміщень вузлів. Але на відміну від плоских рам, в кожному перерізі яких виникають три компоненти внутрішніх зусиль:  $M$ ,  $Q$  і  $N$ , в стержнях просторових рамних конструкцій їх виникають шість:  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$ ,  $N$ ,  $Q_y$ ,  $Q_z$ . Канонічні рівняння мають той же вигляд і той же зміст, що і при розрахунку плоских рам.

Аналітичний підхід має велике методичне значення. При розвитку аналітичних методів був здійснений справжній прорив у розумінні та описі основ опору просторових рамних конструкцій навантаженням і впливам. Якщо на початку ХХ століття, просторові рами розглядалися як набір незалежних плоских елементів, то наприкінці – як складні просторові конструкції, властивості яких в тій чи іншій мірі залежать від властивостей кожного елемента, а ці залежності якісно і, в більшості випадків, кількісно описані аналітично. При вдосконаленні та розвитку аналітичних методів розрахунку просторових рамних конструкцій, були накопичені унікальні експериментальні та теоретичні дані про властивості несучих систем, підсистем, елементів і їх сполучень. Слід зазначити, що основною перевагою аналітичних методів, в порівнянні з іншими методами, є точність отриманих результатів.

Методи, що розглянуті вище, дозволяють проводити розрахунки тільки у пружній стадії роботи матеріалів без урахування деформованого стану.

У розвитку аналітичних методів розрахунку просторових рамних конструкцій поширення набули практичні методи, які розроблені і вперше застосовані для розрахунку такими вченими як, М. Тихий, Й. Ракоснік, А.А. Гвоздев [7], Н.С. Стрілецький [8] та іншими.

Практичні методи є наближеними. Вони спрямовані на спрощення розрахунків, заснованих на абстрагуванні від параметрів, які не можуть значно впливати на основні результати розрахунків. Як правило, в основі практичних методів лежить спрощення закономірностей, побудованих на основі результатів експериментальних досліджень.

За допомогою практичних методів створені розрахункові таблиці, графіки, формули [9], які полегшують визначення напружено-деформованого стану окремих конструкцій та їх систем. На їх основі розроблені вказівки, інструкції та рекомендації, що враховують особливості різних типів просторових рам і до останнього часу застосовуються для розрахунку.

До практичних методів відноситься, відомий метод граничної рівноваги.

Основними перевагами практичних методів є те, що вони ґрунтуються на результатах досліджень реальних конструкцій і враховують їх фізичну роботу.

Основні недоліки практичних методів:

- обмеженість застосування;
- неврахування важливих факторів, що впливають на роботу конструкцій;
- відсутність стимулювання розвитку точних аналітичних методів.

Чисельні методи є однією з теоретичних складових аналітичних методів. Прогрес обчислювальної математики та комп'ютерної техніки, зумовили зміну співвідношення аналітичних і чисельних підходів при аналізі роботи складних просторових конструкцій. Практика висуває на передній план задачі багатоваріантних досліджень двомірних і тривимірних систем, адекватне рішення яких іноді можливо знайти тільки чисельним шляхом. Розрахунок просторових рамних конструкцій аналітичними методами є досить складним та трудомістким, а експериментальні дослідження – дорогими і неповними. Цим, зокрема, і пояснюється домінування чисельних методів, що має місце, як у вітчизняній, так і в зарубіжній розрахунковій практиці.

Чисельні методи, стосовно до просторових рамних конструкцій, розвивалися і збагачувалися результатами експериментальних та теоретичних досліджень в роботах П.Ф.Дроздова, Б.А.Косіцина, Л.Л.Паньшина, Ю.И.Немцінова [10]. У результаті була запропонована теорія напружено-деформованого стану рамних конструкцій, що дозволяє враховувати фактори, які впливають на просторову роботу несучих каркасів будівель.

Найбільш відомі наступні чисельні методи: матричний метод розрахунку стрижневих систем, метод кінцевих різниць, метод стрижневої апроксимації, метод скінчених елементів [11, 12]. Основні переваги чисельних методів полягають у їх універсальності, придатності до розрахунків будь-яких конструкцій, незалежно від конфігурації, навантажень, граничних умов та ін.

Серед недоліків чисельних методів:

- наближене рішення задачі;
- оцінка точності одержуваних результатів;
- ряд складнощів і умовностей в частині моделювання роботи окремих залізобетонних елементів та ін.

На всіх етапах вивчення напружено-деформованого стану конструкцій, розрахунок ефективно проводити спільно аналітичними і чисельними методами. Існуючі аналітичні методи, в поєднанні з різноманітністю чисельних підходів дозволяють розвивати чисельно-аналітичні методи розрахунку. Такі методи дозволяють записувати граничні умови конструкцій в аналітичному вигляді і знаходити рішення за допомогою чисельних підходів.

Знайдена з їх допомогою картина напружено-деформованого стану розвиває інтуїцію інженера і розуміння ним характеру роботи конструкцій, впливу на них різних локальних і глобальних чинників, дозволяє дати оцінку прийнятій розрахункової схеми конструкції, використовуваного методу, алгоритму та отриманого рішення, зокрема його точності. Крім того, при чисельному рішенні складних задач будівельної механіки попереднє аналітичне вивчення окремих локальних властивостей конструкцій може принести значну користь.

Найбільш поширеними чисельно-аналітичними методами є:

- метод колокацій;
- метод початкових параметрів;
- чисельно-аналітичні методи граничних елементів (МГЕ).

Методи граничних елементів ґрунтуються на фундаментальних рішеннях диференціальних рівнянь. Існує три варіанти методів граничних елементів: прямий, напівпрямий і непрямий.

У прямому варіанті МГЕ невідомі функції, що входять в інтегральне рівняння, які описують роботу об'єкта на його границі, мають реальними фізичний зміст. Такий підхід названий методом граничних інтегральних рівнянь.

У напівпрямому варіанті МГЕ складаються і вирішуються інтегральні рівняння для невідомих функцій, аналогічних функціям напружень в теорії пружності. Диференціювання отриманих рішень дозволяє визначити реальні фізичні величини, наприклад, напруження в теорії пружності.

У непрямому варіанті МГЕ інтегральні рівняння повністю виражаються через фундаментальні рішення вихідних диференціальних рівнянь, наприклад, через функцію Гріна для необмеженої області. Після чисельного рішення інтегральних рівнянь

значення параметрів всередині розглянутої області визначаються звичайним інтегруванням.

Переконаливою перевагою МГЕ є те, що для розв'язування високоградієнтних задач ефективність метода зумовлена однакою порядком апроксимації величин різного характеру з однакою точністю. Для широкого класу задач при вивченні напружено-деформованого стану елементів просторових рамних конструкцій, переваги МГЕ є незаперечними. Підтвердження цього знаходимо, зокрема, у роботах О.Ф.Дашенко, Л.В.Коломієц, В.Ф.Оробей, Н.Г.Сурьянінов [12], П.К.Бенерджи, Р.Баттерфілд [14], К.Бреббіа, С.Уокер [15], D.Nardini, С.А.Brebbia [16], А.Аімі, О.С. Zienkiewicz та багато ін.

Для розрахунку залізобетонних рамних конструкцій доцільно використовувати чисельно-аналітичний метод граничних елементів [13, 14].

Основні переваги чисельно-аналітичного МГЕ:

- двократне зниження розмірності задачі (оскільки дискретизації піддається не вся розрахункова область, а тільки її границя);
- гранична дискретизація, що веде до значно меншої системи лінійних алгебраїчних рівнянь;
- можливість проведення детального аналізу окремих зон;
- можливість урахування нелінійної роботи матеріалів та процесів тріщиноутворення;
- алгоритмічна простота та висока ступень універсальності;
- використання фундаментальних розв'язків задачі.

### ***Висновки***

Розробка методик визначення напружено-деформованого стану залізобетонних просторових рамних конструкцій за допомогою чисельно-аналітичного методу граничних елементів є завданням актуальним та необхідним для розвитку теорії та практики проектування.

### **Summary**

**Review of analysis methods of reinforced concrete frame structures is done. The main advantages and disadvantages of existing methods are considered.**

## *Література*

1. Егупов В.К. Пространственные расчеты зданий. Пособие по проектированию / Егупов В.К., Командрина Т.А., Голобородько В.Н. – К.: Будівельник, 1976. – 264 с.
2. Юдин В.К. Расчет пространственных рам / Юдин В.К. – К., 1961. – 141 с.
3. Швехман М. Пространственная работа многоэтажных зданий. Строительство и архитектура Москвы, 1967, №1.
4. Ржаницын А.Р. Теория составных стержней строительных конструкций. – М., Стройиздат, 1948.
5. Шагин П.П. Сокращенные методы расчета рам / Шагин П.П. Гостройиздат, 1951.
6. Жемочкин Б.Н. Расчет рам / Жемочкин Б.Н. – М.: Стройиздат, 1965. – 406 с.
7. Гвоздев А.А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного равновесия. М., «Стройиздат». 1949. – 280 с.
8. Стрелецкий Н.С. К вопросу о значении рабочих методов в расчете конструкций. Известия Высших учебных заведений. Строительство и архитектура. Новосибирск. 1960.
9. Глушков Г.С., Егоров И. Р., Ермолов В. В. Формулы для расчета сложных рам. М., «Машиностроение», 1966. – 352 с.
10. Немчинов Ю.И. Метод пространственных конечных элементов (с приложениями к расчету зданий и сооружений) / Немчинов Ю.И. – К.: НИИСК, 1995. – 367 с.
11. Клованич С.Ф., Мироненко И.Н. Метод конечных элементов в механике железобетона. Одесса, ОНМУ. 2007. – 110 с.
12. Дашенко А.Ф. Численно – аналитический метод граничных элементов. Том 1 / А.Ф.Дашенко, Л.В.Коломиец, В.Ф.Оробей, Н.Г.Сурьянинов – О.: ВМВ, 2010. – 451 с.
13. Оробей В.Ф., Ковров А.В. Решение задач статики, динамики и устойчивости стержневых систем. Применение метода граничных элементов: Учебное пособие – Одесса, 2004. – 122 с.
14. Бенерджи П.К. Методы граничных элементов в прикладных науках / П.К.Бенерджи, Р.Баттерфилд. Под ред. Р.В.Гольдшейна. – М.: Мир, 1984. – 494 с.
15. Бреббиа К. Применение метода граничных элементов в технике / К.Бреббиа, С.Уокер. Под ред. Э.И.Григолюка. – М.: Мир, 1982. – 248 с.
16. Nardini D. A New Approach to Free Vibration Analysis using Boundary Elements / D. Nardini, C. A. Brebbia // Boundary Element Methods in Engineering / ed. C. A. Brebbia. – Springer-Verlag, Berlin and New York,

1982.



