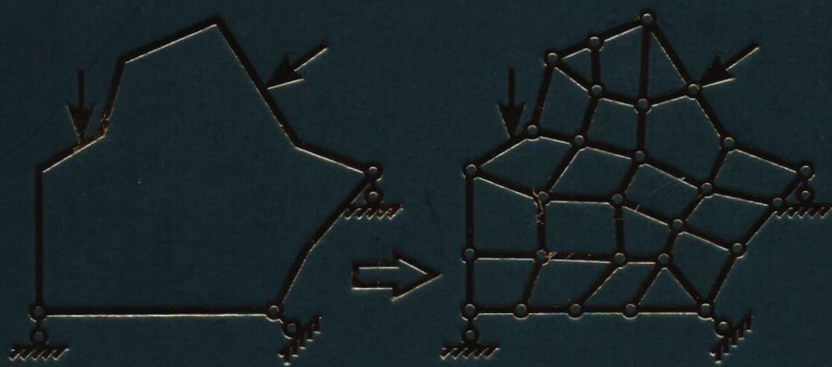


В.А.Баженов, А.В.Перельмутер, О.В.Шишов

БУДІВЕЛЬНА МЕХАНІКА

КОМП'ЮТЕРНІ
ТЕХНОЛОГІЇ І
МОДЕЛЮВАННЯ



В.А. Баженов. А.В. Перельмутер, О.В.Шишов

БУДІВЕЛЬНА МЕХАНІКА
Комп'ютерні технології і моделювання

Підручник

За загальною редакцією
д.т.н., професора
В.А.Баженова

Затверджено
Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
як підручник для студентів вищих навчальних закладів

Київ ПАТ “ВПОЛ” 2013

УДК 69.04(075.8):004

ББК 38.112я73

Б 16

*Гриф надано Міністерством освіти і науки, молоді та спорту України
(Лист № 1/11-19450 від 18.12.12.2012р.)*

Рецензенти: О.Ф.Дашенко, д-р. техн. наук, професор, директор інституту машинобудування, завідувач кафедри динаміки, міцності машин та опору матеріалів Одеського державного політехнічного університету, Заслужений діяч науки і техніки України;

Л.М.Лобанов, д-р. техн. наук, професор, заступник директора з наукової роботи Інституту електрозварювання ім. Є.О.Патона НАН України, академік НАН України;

В.Г.Піскунов, д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри опору матеріалів і машинознавства Національного транспортного університету, Заслужений діяч науки і техніки України, академік Академії будівництва України.

Баженов В.А. та ін.

Б 16 Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання: Підручник / В.А.Баженов, А.В.Перельмутер, О.В.Шишов / За заг. ред. В.А.Баженова. - К.: ПАТ "ВПОЛ", 2013. - 896 с.: ил.

ISBN 978-966-646-127-1

У підручнику викладено методи розрахунку стержневих і континуальних систем, оскільки сучасна будівельна механіка розглядає складні системи, до яких, поряд із стержнями, входять елементи інших типів: пластини, оболонки, масивні тіла. При розрахунку таких систем здебільшого використовується метод скінченних елементів (МСЕ), на основі якого створені сучасні програмні продукти.

Особливістю подання матеріалу в підручнику є, з одного боку, орієнтація на викладення сучасних загальних методів розрахунку, з іншого - на комп'ютеризацію курсу, побудову його на базі оригінального навчально-дослідницького програмного комплексу АСИСТЕНТ та універсального розрахунково-обчислювального комплексу SCAD.

У перших двох частинах підручник містить класичний курс будівельної механіки, призначений для підготовки бакалаврів. Крім цього, далі докладно розглянуті спеціальні курси будівельної механіки для магістерській підготовки, а саме: варіаційні принципи і методи будівельної механіки, фізично, геометрично та конструктивно нелінійні задачі, основи надійності споруд, задачі статистичної динаміки, експериментальні методи будівельної механіки тощо. Ці розділи можуть бути використані також для післявузівської підготовки фахівців, які бажать підвищити свою кваліфікацію у галузі застосування комп'ютерних технологій розрахунку конструкцій.

Підручник призначений для студентів вищих навчальних закладів. Він буде корисним для спеціалістів, аспірантів, викладачів будівельної механіки, опору матеріалів, теорії пружності та інших суміжних дисциплін.

УДК 69.04(075.8):004

ББК 38.112я73

© В.А.Баженов, А.В.Перельмутер,
О.В.Шишов, 2013

ISBN 978-966-646-127-1

ЗМІСТ

Передмова.....	11
1. Вступ.....	13
1.1. Задачі будівельної механіки.....	13
1.2. Основні припущення будівельної механіки.....	16
1.3. Навантаження.....	19
1.4. Розрахункові схеми споруд.....	20
1.5. Короткий історичний огляд.....	24
Частина 1. СТАТИКА СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ	
1. Основні поняття, принципи і рівняння будівельної механіки стержневих систем.....	36
2. Кінематичний аналіз і основи статичного розрахунку.....	36
2.1. Основні поняття кінематичного аналізу.....	37
2.2. Конструктивні елементи розрахункових схем.....	38
2.3. Кількісний етап кінематичного аналізу.....	44
2.4. Якісний (структурний) етап кінематичного аналізу.....	45
2.5. Послідовність виконання кінематичного аналізу.....	48
2.6. Приклади кінематичного аналізу розрахункових схем споруд.....	48
2.7. Статичний метод розрахунку.....	52
2.8. Кінематичний метод.....	66
2.9. Матриця рівнянь рівноваги.....	67
2.10. Попередньо напружені системи.....	72
2.11. Особливості роботи геометрично змінюваних систем.....	76
3. Переміщення в пружних системах.....	80
3.1. Робота зовнішніх і внутрішніх сил.....	80
3.2. Узагальнені сили та узагальнені переміщення.....	82
3.3. Універсальні позначення переміщень.....	84
3.4. Матриця податливості і матриця жорсткості.....	85
3.5. Інтеграл Мора.....	87
3.6. Окремі випадки застосування формули Максвелла-Мора.....	89
3.7. Обчислення інтеграла Мора.....	90
3.8. Переміщення від дії температури.....	93
3.9. Переміщення від примусового зміщення опор.....	96
3.10. Повна формула для обчислення переміщень.....	98
3.11. Теореми взаємності.....	98
4. Загальні рівняння будівельної механіки.....	103
4.1. Стержневі системи як системи зі скінченним числом ступнів вільності.....	103
4.2. Рівняння статички.....	107
4.3. Геометричні рівняння.....	109
4.4. Фізичні рівняння.....	113

4.5. Постановка задач будівельної механіки.....	115
4.6. Головні властивості статично визначуваних і статично невизначуваних систем.....	117
5. Енергетичні теореми і варіаційні принципи будівельної механіки.....	118
5.1. Енергія деформації лінійно-пружної системи.....	118
5.2. Повна потенціальна енергія деформівної системи.....	124
5.3. Функціонал. Варіація функціонала. Необхідна умова екстремуму функціонала.....	126
5.4. Найпростіша задача варіаційного числення, рівняння Ейлера.....	129
5.5. Функціонали, що залежать від похідних вищих порядків.....	132
5.6. Перетворення Лежандра. Канонічні перетворення.....	134
5.7. Двоїсті постановки варіаційних задач для функціоналів.....	138
5.8. Варіаційні задачі на умовний екстремум. Метод множників Лагранжа.....	140
5.9. Двоїста за Лагранжем задача. Функція Лагранжа.....	143
5.10. Формулювання двоїстих задач опуклого математичного програмування...	144
5.11. Задачі лінійного і квадратичного програмування.....	149
5.12. Варіаційна постановка задачі про плоский згин.....	151
5.13. Прямі методи розв'язання варіаційних задач.....	188
5.14. Метод скінченних елементів як прямий варіаційний метод.....	199
5.15. Варіаційні принципи для двовимірних та тривимірних задач.....	206
II. РОЗРАХУНОК СТЕРЖНЕВИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	230
6. Розрахунок стержневих систем за методом скінченних елементів.....	230
6.1. Дискретна модель розрахункової схеми стержневої системи.....	230
6.2. Кінцеві характеристики стержневих скінченних елементів.....	233
6.3. Матриця перетворення.....	236
6.4. Побудова матриці жорсткості стержня в локальній системі координат.....	238
6.5. Матриці жорсткості стержневих елементів у локальній системі координат...	243
6.6. Матриці жорсткості стержня в глобальній системі координат.....	248
6.7. Вузлові характеристики скінченно-елементної моделі.....	254
6.8. Матриця жорсткості скінченно-елементної моделі.....	257
6.9. Визначення зусиль у стержнях.....	262
6.10. Приклад розрахунку рами за методом скінченних елементів.....	264
6.11. Особливості розрахунку просторових стержневих систем.....	271
6.12. Матриця жорсткості просторового стержня.....	277
7. Розрахунок стержневих систем за методом скінченних елементів у формі методу сил.....	279
7.1. Кінцеві зусилля в скінченних елементах.....	279
7.2. Матриця податливості скінченного елемента.....	282
7.3. Вузлові характеристики дискретної моделі.....	285

7.4. Матриця податливості і матриця жорсткості дискретної моделі.....	287
7.5. Рівняння рівноваги вузлів дискретної моделі.....	289
7.6. Повна система рівнянь та її розв'язок.....	293
7.7. Обчислення дійсних зусиль у стержнях.....	294
III. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО ВИЗНАЧУВАНИХ СИСТЕМ	297
8. Ферми.....	298
8.1. Особливості кінематичного аналізу ферм.....	298
8.2. Розрахунок ферм.....	299
9. Тришарнірні арки.....	308
9.1. Розрахунок арки при довільному навантаженні.....	309
9.2. Розрахунок арки при дії вертикального навантаження.....	311
9.3. Розрахунок арки з горизонтальною затяжкою.....	314
10. Плоскі рами.....	316
10.1. Класифікація статично визначуваних рам.....	316
10.2. Визначення опорних реакцій.....	318
10.3. Обчислення внутрішніх зусиль у плоских рамах.....	321
10.4. Приклад статичного розрахунку рами.....	323
IV. РОЗРАХУНОК СТАТИЧНО НЕВИЗНАЧУВАНИХ СИСТЕМ.....	329
11. Метод переміщень.....	330
11.1. Припущення методу переміщень.....	330
11.2. Основна система методу переміщень.....	331
11.3. Основні невідомі методу переміщень.....	336
11.4. Розв'язувальні рівняння методу переміщень.....	336
11.5. Епюри зусиль в основній системі методу переміщень.....	339
11.6. Статичний спосіб визначення коефіцієнтів і вільних членів системи канонічних рівнянь.....	343
11.7. Побудова канонічних рівнянь за допомогою варіаційного принципу Лагранжа.....	347
11.8. Визначення дійсних зусиль.....	351
11.9. Перевірки епюри дійсних згинальних моментів.....	352
11.10. Використання симетрії системи.....	353
11.11. Приклади розрахунку рам за методом переміщень у канонічній формі...	357
11.12. Розгорнута форма методу переміщень.....	372
12. Метод сил.....	391
12.1. Ступінь статичної невизначуваності.....	391
12.2. Основна система і основні невідомі методу сил.....	392
12.3. Система розв'язувальних рівнянь методу сил.....	393
12.4. Обчислення коефіцієнтів системи канонічних рівнянь.....	398
12.5. Визначення дійсних зусиль.....	399
12.6. Обчислення переміщень у статично невизначуваних системах.....	400
12.7. Кінематична перевірка розрахунку.....	401

12.8. Приклад розрахунку статично невизначуваної рами методом сил.....	402
12.9. Використання симетрії.....	407
12.10. Розрахунок статично невизначуваних ферм.....	413
12.11. Приклад розрахунку статично невизначуваної ферми.....	415
12.12. Розрахунок нерозрізних балок.....	416
12.13. Особливості розрахунку статично невизначуваних комбінованих систем.....	427
13. Змішаний метод.....	429
13.1. Основні невідомі і основна система змішаного методу.....	429
13.2. Система розв'язувальних рівнянь змішаного методу.....	430
13.3. Коефіцієнти розв'язувальних рівнянь.....	431
13.4. Побудова дійсних епюр.....	433
V. НАВЧАЛЬНІ ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ.....	434
14. Навчальний програмний комплекс АССИСТЕНТ.....	434
14.1. Основні характеристики.....	434
14.2. Запуск комплексу АССИСТЕНТ.....	434
14.3. Керування роботою комплексу.....	435
14.4. Виконання розрахункових робіт.....	436
14.5. Статичні та динамічні розрахунки стержневих систем.....	445
15. Комп'ютерне самотестування рівня знань.....	446
15.1. Основні відомості про комп'ютерну програму тестування знань.....	446
15.2. Робота з програмою.....	446
15.3. Протокол тестування.....	450
Частина 2. ОСНОВИ ДИНАМІКИ ТА СТІЙКОСТІ	
VI. ОСНОВИ ДИНАМІКИ СПОРУД.....	452
16. Основні положення динаміки споруд.....	452
16.1. Динамічні впливи.....	453
16.2. Динамічні ступні вільності.....	455
16.3. Методи динаміки споруд.....	458
16.4. Види коливальних рухів.....	470
17. Коливання систем з одним ступнем вільності.....	473
17.1. Диференціальне рівняння руху.....	473
17.2. Вільні коливання без загасання.....	473
17.3. Вільні коливання з урахуванням загасання.....	478
17.4. Моделі урахування сил опору при коливанні демпфированих систем.....	484
17.5. Вимушені коливання при гармонійному навантаженні.....	489
17.6. Вимушені коливання при періодичному навантаженні.....	500
17.7. Реакція системи на імпульсне навантаження.....	504
17.8. Реакція системи на навантаження загального вигляду.....	509
17.9. Коливання при кінематичному збудженні основи.....	511
18. Динаміка систем з багатьма ступнями вільності.....	515
18.1. Рівняння динамічної рівноваги.....	515

18.2. Вільні коливання систем з багатьма ступнями вільності.....	521
18.3 Змушені коливання систем зі скінченим числом ступнів вільності.....	539
18.4. Метод нормальних координат.....	545
18.5. Сейсмічні коливання.....	554
18.6. Метод скінчених елементів у задачах динаміки.....	571

19. Коливання систем із нескінченно великим числом

ступнів вільності.....	586
19.1. Рівняння руху систем із розподіленою масою.....	586
19.2. Вільні коливання за відсутності сил опору.....	588
19.3. Змушені коливання стержня при гармонічному навантаженні.....	593
19.4. Динамічний розрахунок рам.....	596
19.5. Метод заміни розподілених мас зосередженими.....	599

VII. СТІЙКІСТЬ РІВНОВАГИ..... 603

20. Стійкість систем із скінченим числом ступнів вільності... 603

20.1. Стійкість рівноваги. Приклади систем з одним ступенем вільності.....	604
20.2. Крива станів рівноваги.....	607
20.3. Вплив початкових недосконалостей.....	608
20.4. Аналіз у лінійному наближенні.....	611
20.5. Енергетичні бар'єри. Стійкість у малому і стійкість у великому.....	612
20.6. Стійкість систем із декількома ступнями вільності.....	613
20.7. Спектр критичних сил і форми втрати стійкості.....	615
20.8. Багатопараметричне навантаження. Теорема Папковича.....	619

21. Стійкість стержнів і стержневих систем..... 623

21.1. Основні співвідношення для стиснено-зігнутого стержня.....	623
21.2 Початкові недосконалості.....	631
21.3. Розрахункова довжина стержня й межа її використання.....	634
21.4. Стійкість рам під впливом вузлових навантажень.....	637

Частина 3. ЗАГАЛЬНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЯ РЕАЛІЗАЦІЇ МЕТОДУ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

VIII. МЕТОД СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДЛЯ

ДВОВИМІРНИХ СИСТЕМ..... 647

22. Основи методу..... 647

22.1. Ідея методу скінчених елементів.....	647
22.2. Побудова скінченно-елементних залежностей.....	650
22.3. Варіаційне формулювання МСЕ.....	656
22.4. Параметри мережевої розбивки. Збіжність МСЕ.....	659

23. Загальні співвідношення для дискретних систем..... 663

23.1. Розв'язувальні рівняння.....	663
23.2. Статико-кінематичний аналіз.....	671

24. Характерні варіанти елементів суцільного середовища.....	674
24.1. Прямокутний елемент плоскої задачі.....	674
24.2. Прямокутний елемент плити, що згинається.....	677
24.3. Трикутний плоский елемент оболонки.....	681
24.4. Ізопараметричні скінченні елементи і чисельне інтегрування.....	691
24.5. Бібліотека скінченних елементів	699
25. Побудова скінченно-елементних розрахункових схем.....	703
25.1. Розбивка на скінченні елементи.....	703
25.2. Формування і розв'язання канонічних рівнянь.....	708
25.3. Моделювання спряжень елементів різного типу.....	720
25.4. Використання жорстких уставок. Об'єднання переміщень.....	729
25.5. Перевірка практичної збіжності.....	732
ІХ. СУЧАСНІ ПРОГРАМНІ КОМПЛЕКСИ, ЩО БАЗУЮТЬСЯ НА МЕТОДІ СКІНЧЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ.....	734
26. Загальні риси сучасних програмних систем, що використовують МСЕ.....	734
26.1. Загальна структура розрахункової програмної системи.....	734
26.2. Коротка характеристика найбільш поширених програмних систем.....	735
27. Програмний комплекс SCAD, як типовий інструмент комп'ютерного розрахунку.....	739
27.1. Структура обчислювального комплексу Structure CAD.....	739
27.2. Бібліотека скінчених елементів SCAD.....	741
27.3. Препроцесор підготовки даних.....	742
27.4. Методи розв'язання системи лінійних рівнянь.....	744
27.5. Розрахункові сполучення навантажень.....	745
27.6. Динамічні розрахунки.....	747
27.7. Аналіз стійкості.....	748
28. Деякі перспективні напрями розвитку програмних систем.....	750
Частина 4. НЕЛІНІЙНІ ЗАДАЧІ ТА ЙМОВІРНІСНІ І ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ	
29. Про нелінійні розрахунки.....	755
Х. ФІЗИЧНА НЕЛІНІЙНІСТЬ.....	763
30. Нелінійно пружні системи.....	758
30.1. Пружні і не пружні матеріали.....	758

30.2. Нелінійно пружні балки.....	760
30.3. Енергія внутрішніх сил в нелінійно пружній системі.....	761
30.4. Доповнювальна енергія внутрішніх сил в нелінійно пружній системі.....	762
31. Ідеальні системи пружнопластичності.....	763
31.1. Залежність між напруженнями і деформаціями.....	763
31.2. Монотонне навантаження конструкції.....	764
31.3. Метод граничної рівноваги.....	768
XI. ГЕОМЕТРИЧНА НЕЛІНІЙНІСТЬ.....	773
32. Геометрична нелінійність для стержнів фермового типу... 774	
33. Геометрично нелінійні рівняння у варіаціях..... 780	
XII. КОНСТРУКТИВНА НЕЛІНІЙНІСТЬ..... 784	
34. Системи з односторонніми в'язями..... 784	
34.1. Попередні міркування.....	784
34.2. Обмеження можливих переміщень.....	786
34.3. Умови рівноваги.....	787
XIII. ОСНОВИ НАДІЙНОСТІ СПОРУД..... 790	
35. Імовірнісні методи розрахунку на надійність..... 790	
35.1. Випадковий характер розрахункових величин.....	790
35.2. Розподіл двох випадкових величин.....	793
35.3. Основи імовірнісного методу розрахунку на міцність.....	794
35.4. Метод часткових коефіцієнтів надійності.....	799
35.5. Сполучення декількох навантажень.....	800
36. Надійність статично визначуваних і невизначуваних схем.. 802	
36.1. Надійність статично визначуваних систем.....	802
36.2. Про оцінку надійності статично невизначуваних систем.....	804
36.3. Зміна навантаження і міцності в часі.....	806
XIV. ЗАДАЧІ СТАТИСТИЧНОЇ ДИНАМІКИ..... 810	
37. Основні відомості з теорії випадкових процесів..... 810	
37.1. Вихідні визначення.....	810
37.2. Стаціонарні випадкові процеси.....	814
38. Спектральна теорія випадкових процесів..... 819	
38.1. Спектральне подання стаціонарного випадкового процесу.....	819
38.2. Сукупність випадкових процесів.....	825
38.3. Сума випадкових процесів.....	827
38.4. Спектральне подання нестационарних випадкових процесів.....	828
39. Випадкові коливання пружних систем..... 831	
39.1. Загальні оложення.....	831

39.2. Усталені коливання при стаціонарному навантаженні.....	832
40. Стаціонарні коливання під дією вітрових пульсацій.....	842
40.1. Дослідження усталених коливань пружних систем методом нормальних координат.....	842
40.2. Реакція пружних систем на пульсаційне навантаження.....	847
41. Реакція пружної системи на сейсмічне навантаження.....	850
41.1. Сейсмічні коливання системи з одним ступенем свободи.....	850
41.2. Реакція на сейсмічне навантаження системи з декількома ступенями свободи.....	851
XV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ МЕТОДИ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ.....	855
42. Експериментальні методи дослідження деформацій і напружень.....	855
42.1. Завдання експерименту в будівельній механіці.....	855
42.2. Метод електротензовимірювань.....	857
42.3. Поляризаційно-оптичні методи дослідження напружень.....	857
42.4. Оптико-геометричні методи вимірювання деформацій і перемішень.....	859
43. Теорія експерименту.....	860
43.1. Планування експерименту.....	860
43.2. Зіставлення розрахункових і експериментальних даних.....	862
43.3. Приклад обробки результатів.....	864
44. Спеціальні прийоми обробки.....	865
44.1. Випробування на стійкість. Діаграма Саусвелла.....	865
44.2. Динамічні випробування. Визначення частот власних коливань.....	867
ПОРТРЕТНА ГАЛЕРЕЯ ВЧЕНИХ.....	872
Додатки.....	887
Список літератури.....	892