

Министерство образования Республики Беларусь
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

А.А. Борисевич, Е.М. Сидорович, В.И. Игнатюк

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

*Допущено Министерством образования
Республики Беларусь в качестве учебного пособия
для студентов учреждений, обеспечивающих
получение высшего образования
по строительным специальностям*

Минск 2007

УДК 624.04(75.8)

ББК 38.112я73

Б82

Рецензенты:

кафедра «Строительные конструкции, здания и сооружения»
Белорусско-Российского университета,
заведующий кафедрой д-р техн. наук, профессор *С.Д. Семенюк*;

доцент кафедры «Строительная механика»
Белорусского государственного университета транспорта,
д-р физ.-мат. наук *А.В. Яровая*

Борисевич, А.А.

Б82 Строительная механика: учебное пособие для вузов / А.А. Борисевич,
Е.М. Сидорович, В.И. Игнатюк. – Минск: БНТУ, 2007. – 821 с.

ISBN 978-985-479-820-2

Рассмотрены основные положения расчета статически определимых и статически неопределимых стержневых систем на статические и динамические нагрузки и воздействия, изложены вопросы расчета упругих систем на устойчивость в деформированном состоянии, даны основы нелинейного расчета стержневых систем по деформированной схеме. Приведены примеры расчета.

УДК 624.04(75.8)

ББК 38.112я73

ISBN 978-985-479-820-2

©А.А. Борисевич,
Е.М. Сидорович
В.И. Игнатюк, 2007
© БНТУ, 2007

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящее учебное пособие по строительной механике предназначено для студентов строительных специальностей высших учебных заведений. Оно соответствует учебной программе, по которой ведется подготовка инженеров-строителей специальности «Промышленное и гражданское строительство». Содержание предлагаемого изучению материала рассчитано на курс лекционных и практических занятий примерно 180-200 учебных часов.

В методическом отношении учебное пособие воспроизводит в значительно переработанном и дополненном виде содержание лекционных и практических занятий, проводившихся авторами в течение ряда лет со студентами Белорусского национального технического университета и Брестского государственного технического университета.

Наряду с изложением традиционных методов расчета, в пособии много внимания уделяется изучению подходов к автоматизации расчета и получению достоверных результатов.

Ввиду того, что затронутые в книге вопросы могут представлять интерес для лиц, работающих в области приложений строительной механики к разработке проектно-вычислительных комплексов, удельный вес отдельных глав несколько увеличен по сравнению с традиционным представлением об их содержании и изложение сделано, по возможности, доступным для широкого круга читателей.

Не останавливаясь здесь на содержании учебного пособия, представление о котором можно получить по оглавлению, отметим, что

предисловие, п. 1.7, главы 2, 7 – 11, 15, 16 написаны проф., д-р техн. наук А.А. Борисевичем,

главы 1 (кроме п. 1.7), 12, 13, 18 – 25 написаны проф., д-р техн. наук Е.М. Сидоровичем,

главы 3 – 6, 14, 17 написаны доц., канд. техн. наук В.И. Игнатьюком.

Замечания о недостатках учебного пособия авторами будут приняты с благодарностью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Строительная механика. Стержневые системы: учебник для вузов / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1981. – 512 с.
2. Александров, А.В. Строительная механика. Тонкостенные и пространственные системы: учебник для вузов / А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников; под ред. А.Ф. Смирнова. – М.: Стройиздат, 1983. – 488 с.
3. Строительная механика. Динамика и устойчивость сооружений: учебник для вузов / А.Ф. Смирнов, А.В. Александров, Б.Я. Лашеников, Н.Н. Шапошников. – М.: Стройиздат, 1984. – 416 с.
4. Дарков, А.В. Строительная механика: учебник для строит. спец. вузов / А.В. Дарков, Н.Н. Шапошников. – М.: Высш. шк., 1986. – 607 с.
5. Киселев, В.А. Строительная механика: учебник для вузов. / В.А. Киселев. – М.: Стройиздат, 1976. – 511 с.
6. Киселев, В.А. Строительная механика. Специальный курс (динамика и устойчивость сооружений) / В.А. Киселев. – М.: Стройиздат, 1969. – 432 с.
7. Леонтьев, Н.Н. Основы строительной механики стержневых систем: учебник / Н.Н. Леонтьев, Д.Н. Соболев, А.А. Амосов. – М.: Изд-во АСВ, 1996. – 541 с.
8. Строительная механика: учебник для вузов / Ю.И. Бутенко [и др.]. – Киев: Высш. шк., 1989. – 479 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
Глава 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ПОНЯТИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ.....	4
1.1. Задачи и методы строительной механики.....	4
1.2. Понятие о расчетной схеме сооружения и ее элементах ..	6
1.3. Классификация сооружений	13
1.4. Степень свободы плоской стержневой системы.....	20
1.5. Принципы образования геометрически неизменяемых систем.....	31
1.6. Матрицы в задачах строительной механики	37
1.7. Краткий исторический очерк развития строительной механики	40
Глава 2. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ СИСТЕМ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА ПРИ НЕПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКЕ	46
2.1. Понятие о статически определимых системах. Их основные свойства	46
2.2. Метод сечений	47
2.3. Метод замены связей	55
2.4. Кинематический метод	60
Глава 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УСИЛИЙ ОТ ПОДВИЖНЫХ НАГРУЗОК	64
3.1. Понятие о подвижной нагрузке и особенностях расчета на ее действие	64
3.2. Статический способ построения линий влияния усилий в простых балках	66
3.3. Кинематический метод построения линий влияния усилий ..	74
3.4. Определение усилий по линиям влияния от неподвижных нагрузок	79
3.5. Линии влияния усилий при узловой передаче нагрузки	84
3.6. Определение наиболее невыгодного положения подвижных нагрузок по линиям влияния	87
3.7. Понятие об огибающих эпюрах усилий.....	93

Глава 4. РАСЧЕТ ТРЕХШАРНИРНЫХ АРОК И РАМ	98
4.1. Общие сведения и принципы образования	98
4.2. Расчет трехшарнирных арок	101
4.3. Линии влияния усилий в трехшарнирных арках	108
4.4. Рациональная ось арки	113
4.5. Расчет трехшарнирных арок с надарочным строением ...	115
4.6. Расчет трехшарнирных рам	117
4.7. Расчет составных рам	128
Глава 5. РАСЧЕТ ПЛОСКИХ СТАТИЧЕСКИ ОПРЕДЕЛИМЫХ ФЕРМ	136
5.1. Понятие о фермах, их классификация, анализ структуры	136
5.2. Определение усилий в стержнях ферм от неподвижных нагрузок	142
5.3. Определение усилий с использованием метода замены стержней	149
5.4. Особенности определения усилий в стержнях шпренгельных ферм	155
5.5. Построение линий влияния усилий в фермах	164
5.5.1. Построение линий влияния усилий в балочных фермах	164
5.5.2. Построение линий влияния усилий в консольных фермах	172
5.5.3. Построение линий влияния усилий в шпренгельных фермах	177
Глава 6. РАСЧЕТ РАСПОРНЫХ ФЕРМ И КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ	199
6.1. Расчет распорных ферм	199
6.2. Расчет комбинированных систем	203
Глава 7. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕМЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ	212
7.1. Общие сведения о перемещениях стержневых систем. ...	212
7.2. Работа внешних статически приложенных сил	213
7.3. Работа внутренних сил плоской линейно-упругой стержневой системы	216

7.4. Применение принципа возможных перемещений к упругим системам	220
7.5. Теоремы о взаимности работ и взаимности перемещений ..	222
7.6. Общая формула для определения перемещений плоской стержневой системы	227
7.7. Способы вычисления интегралов Мора	232
7.8. Определение перемещений от тепловых воздействий	246
7.9. Определение перемещений, вызываемых перемещениями опор	249
7.10. Матричная форма определения перемещений	250
7.11. Линии влияния перемещений	256
7.12. Матрица влияния перемещений	258

Глава 8. МЕТОД СИЛ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ К РАСЧЕТУ

ПЛОСКИХ РАМ	261
8.1. Статически неопределимые системы и их свойства	261
8.2. Определение степени статической неопределимости	264
8.3. Основная система и основные неизвестные	268
8.4. Канонические уравнения метода сил	269
8.5. Определение коэффициентов и свободных членов канонических уравнений	272
8.6. Построение окончательных эпюр усилий	274
8.7. Алгоритм расчета. Проверки расчета	276
8.8. Понятие о рациональной основной системе и способы ее выбора	285
8.9. Определение перемещений в статически неопределимых системах	289
8.10. Расчет рам на действие температуры и смещение опор ...	294
8.11. Линии влияния усилий	301

Глава 9. МЕТОД ПЕРЕМЕЩЕНИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ

К РАСЧЕТУ ПЛОСКИХ РАМ	308
9.1. Степень кинематической неопределимости. Основные неизвестные	308
9.2. Основная система	311
9.3. Канонические уравнения	324
9.4. Статический способ определения коэффициентов и свободных членов канонических уравнений	326

9.5. Кинематический способ определения коэффициентов и свободных членов канонических уравнений	329
9.6. Построение и проверки эпюр M , Q , N в заданной системе от внешней нагрузки	335
9.7. Расчет рам с наклонными элементами	340
9.8. Использование симметрии системы	345
9.9. Расчет рам на тепловое воздействие	350
9.10. Расчет рам на смещение опор	356
9.11. Построение линий влияния усилий	359
9.12. Понятие о расчете рам с учетом продольных деформаций стержней	366
Глава 10. СОВМЕСТНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА СИЛ И МЕТОДА ПЕРЕМЕЩЕНИЙ. СМЕШАННЫЙ МЕТОД	369
10.1. Сопоставление метода сил и метода перемещений	369
10.2. Совместное использование метода сил и метода перемещений	370
10.3. Смешанный метод	375
Глава 11. РАСЧЕТ НЕРАЗРЕЗНЫХ БАЛОК	380
11.1. Общие сведения	380
11.2. Примеры расчета неразрезной балки	380
11.3. Построение линий влияния усилий	392
11.4. Огибающие эпюры усилий	395
11.5. Расчет неразрезных балок на упругих опорах	397
Глава 12. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ ФЕРМ ...	400
12.1. Виды статически неопределимых ферм	400
12.2. Особенности расчета статически неопределимых ферм ...	401
12.3. Построение линий влияний усилий	403
Глава 13. РАСЧЕТ СТАТИЧЕСКИ НЕОПРЕДЕЛИМЫХ АРОК, ВИСЯЧИХ И КОМБИНИРОВАННЫХ СИСТЕМ	406
13.1. Виды статически неопределимых арок	406
13.2. Расчет двухшарнирной арки с затяжкой	407
13.3. Влияние податливости затяжки на усилие в затяжке ...	411

13.4. Особенности расчета бесшарнирной арки	413
13.5. Применение метода перемещений к расчету статически неопределимых арок	417
13.6. Понятие о расчете комбинированных и висячих систем	418
Глава 14. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ СИСТЕМ	
14.1. Виды пространственных систем	422
14.2. Опоры пространственных стержневых систем. Кинематический анализ	423
14.3. Определение усилий и перемещений в статически определимых пространственных рамах	429
14.4. Расчет пространственных ферм	433
14.5. Применение метода сил к расчету статически неопределимых пространственных систем	441
14.6. Расчет плоских рам на пространственную нагрузку методом сил	446
14.7. Применение метода перемещений к расчету пространственных систем	449
Глава 15. ОБЩИЕ УРАВНЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	
15.1. Понятие о дискретной физической модели	454
15.2. Нагрузки и перемещения	456
15.3. Усилия и деформации	458
15.4. Уравнения равновесия	460
15.5. Геометрические уравнения	462
15.6. Принцип двойственности	464
15.7. Физические уравнения	466
15.8. Особенности расчета системы на изменение температуры, осадку опор и неточность изготовления стержней	467
15.9. Общие уравнения для расчета стержневой системы. Смешанный метод	470
15.10. Метод перемещений	471
15.11. Метод сил	477
15.12. Статически определимые системы	482

15.13. Основные уравнения строительной механики для стержня	483
15.14. Формирование матрицы равновесия и матрицы внутренней жесткости для стержневой системы	493
15.15. Матрицы влияния перемещений и усилий	498
15.16. Пространственные фермы	503
15.17. Пространственные рамы	506
Глава 16. ВАРИАЦИОННЫЕ ПРИНЦИПЫ И ВАРИАЦИОННЫЕ МЕТОДЫ СТРОИТЕЛЬНОЙ МЕХАНИКИ. МЕТОД КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ	521
16.1. Потенциальное силовое поле. Потенциальная энергия	521
16.2. Потенциальная энергия деформации упругой системы.	524
16.3. Выражение потенциальной энергии деформации через квадратичные формы обобщенных перемещений и обобщенных сил. Производные от выражений потенциальной энергии	527
16.4. Полная энергия деформируемой системы	530
16.5. Принцип вариации перемещений	533
16.6. Способы решения вариационных задач	537
16.7. Расчет упругих систем на основе принципа вариации перемещений	540
16.8. Принцип вариации напряжений или внутренних сил ...	544
16.9. Применение принципа вариации внутренних сил к расчету упругих систем	546
16.10. Сущность метода конечных элементов	548
16.11. Матрица жесткости стержня в местной системе координат	550
16.12. Матрица жесткости стержня в общей системе координат	563
16.13. Формирование матрицы жесткости всей системы	564
16.14. Матрица жесткости прямоугольного конечного элемента для расчета тонких плит	569
16.15. Общие замечания о методе конечных элементов	579
Глава 17. ОСНОВЫ РАСЧЕТА СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ ПО НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ	583
17.1. Общие понятия	583

17.2. Предельное состояние сжато-растянутого элемента по нормальному сечению	585
17.3. Предельное состояние изгибаемого элемента по нормальному сечению	586
17.4. Предельные состояния системы и методы расчета	591
17.5. Расчет статически определимых систем по несущей способности.	595
17.6. Расчет статически неопределимых систем по несущей способности.	598
17.7. Особенности расчета по несущей способности статически неопределимых балок	613
Глава 18. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ ДИНАМИКИ	
СООРУЖЕНИЙ	625
18.1. Динамические нагрузки и их классификация	625
18.2. Силы инерции и степень свободы деформируемой системы	627
18.3. Силы сопротивления движению.	634
18.4. Виды колебаний	635
18.5. Задачи и методы динамики сооружений	637
Глава 19. КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМ С ОДНОЙ СТЕПЕНЬЮ	
СВОБОДЫ	640
19.1. Дифференциальное уравнение движения	640
19.2. Свободные колебания	642
19.3. Общий случай действия возмущающей нагрузки	648
19.4. Действие внезапно приложенной нагрузки	649
19.5. Действие гармонической нагрузки	650
19.6. Резонанс и его развитие во времени	653
19.7. Свободные колебания с учетом сил сопротивления	654
19.8. Вынужденные колебания с учетом сил сопротивления.	659
19.9. Кинематическое возбуждение колебаний.	662
Глава 20. КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМЫ С НЕСКОЛЬКИМИ	
СТЕПЕНЯМИ СВОБОДЫ.	665
20.1. Дифференциальные уравнения движения в общем виде.	665
20.2. Свободные незатухающие колебания	669

20.3. Действие вибрационной нагрузки при отсутствии сил сопротивления	684
20.4. Действие вибрационной нагрузки при учете сил сопротивления	692
20.5. Решение уравнений движения в общем случае методом разложения по собственным формам.....	697
Глава 21. КОЛЕБАНИЯ СИСТЕМ С БЕСКОНЕЧНО БОЛЬШИМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ	701
21.1. Дифференциальное уравнение поперечных колебаний стержня с распределенной массой.....	701
21.2. Свободные колебания. Балочные функции	703
21.3. Вынужденные колебания при вибрационной нагрузке	708
Глава 22. ПРИБЛИЖЕННЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ В ДИНАМИКЕ СООРУЖЕНИЙ.....	714
22.1. Приближенные методы определения частот собственных колебаний.....	714
22.2. Замена распределенных масс сосредоточенными	718
22.3. Специальные численные методы решения частичной проблемы собственных колебаний.....	720
22.4. Применение метода степенных рядов для прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения.....	732
Глава 23. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ УПРУГИХ СИСТЕМ.....	735
23.1. Понятие о равновесии в деформированном состоянии. Устойчивые и неустойчивые состояния равновесия	735
23.2. Статический метод исследования устойчивости	744
23.3. Критическое равновесие	750
23.4. Динамический метод исследования устойчивости	754
23.5. Критерии устойчивости равновесия	757
23.6. Энергетический метод исследования устойчивости.....	758
23.7. Качественный метод исследования устойчивости.....	759
Глава 24. УСТОЙЧИВОСТЬ ПРЯМЫХ СЖАТЫХ СТЕРЖНЕЙ НА НЕДЕФОРМИРУЕМЫХ ОПОРАХ	760
24.1. Дифференциальное уравнение изгиба сжатого стержня....	760

24.2. Учет опорных закреплений сжатых стержней	762
24.3. Особые случаи исследования устойчивости сжатых стержней	768
Глава 25. УСТОЙЧИВОСТЬ СТЕРЖНЕВЫХ СИСТЕМ	771
25.1. Основные допущения и сущность метода перемещений ..	771
25.2. Особенности дискретизации деформируемых систем при автоматизированном расчете на устойчивость методом перемещений	781
25.3. Матрица внутренней жесткости сжатого стержня	788
25.4. Матрица внутренней жесткости растянутого стержня ..	802
25.5. Матрица внешней жесткости сжатого стержня как конечного элемента	804
25.6. Понятие о расчете сооружений по деформированному состоянию	809
Литература	812

Учебное издание

БОРИСЕВИЧ Арсений Александрович
СИДОРОВИЧ Евгений Мечиславович
ИГНАТЮК Валерий Иванович

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Технический редактор О.В. Дубовик
Компьютерная верстка О.В. Дубовик

Подписано в печать 03.12.2007.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура Таймс. Усл. печ. л. 47,6. Уч.-изд. л. 42,3.

Тираж 500. Заказ 1434.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский национальный технический университет.
ЛИ № 02330/0131627 от 01.04.2004.
220013, Минск, проспект Независимости, 65.

Отпечатано в типографии УП «Промбытсервис».
ЛП № 02330 / 0148738 от 30.04.2004 г.
220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, д. 14, к. 203.
Тел.: +375 /17 / 237-62-89, +375 /17 / 267-27-67.