



Перельмутер А. В., Сливкер В. И.

# **Расчетные модели сооружений и возможность их анализа**

*2-е издание, электронное*



**Москва, 2023**

УДК 624.012.03:681.3.06

ББК 38.2-5-05

П27

**Перельмутер, Анатолий Викторович.**

П27 Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — Эл. изд. — 1 файл pdf : 597 с. — Москва : ДМК Пресс, 2023. — (Проектирование). — Систем. требования: Adobe Reader XI либо Adobe Digital Editions 4.5 ; экран 10". — Текст : электронный.

ISBN 978-5-89818-457-5

Книга посвящена анализу методов, используемых при создании современных программных систем для статического и динамического расчета несущих строительных конструкций, а также приемов использования этих систем. Наличие (а иногда и отсутствие) руководств, входящих в систему программной документации, чаще всего дает возможность «использовать» программную систему как черный ящик и в лучшем случае позволяет научиться нажимать необходимые кнопки, чтобы вызвать к жизни ту или иную функцию программы. Вместе с тем опыт показывает, что любое руководство к самой совершенной программе бессмысленно, если пользователь не понимает основ тех методов, которые эти программы реализуют.

Особое внимание в книге уделяется роли выбора расчетной модели, ее обоснованности, а также внутренней и внешней согласованности с решаемой задачей. Приводятся многочисленные практические рекомендации, указываются типичные и нетипичные проблемы и ошибки, описываются различного рода ловушки, подстерегающие инженера-расчетчика. Многие поучительные примеры связаны с практическим опытом авторов, как инженеров-проектировщиков. По сравнению с предыдущими изданиями материал расширен и дополнен.

Книга предназначена для инженерно-технических и научных работников, как пользователей программной продукции, так и разработчиков программных средств. Она может быть использована студентами, аспирантами и преподавателями дисциплин прочностного курса (строительная механика, теория упругости) или курса САПР.

УДК 624.012.03:681.3.06

ББК 38.2-5-05

**Электронное издание на основе печатного издания:** Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. — Москва : ДМК Пресс, 2009. — 596 с. — (Проектирование). — ISBN 5-94074-352-8. — Текст : непосредственный.

В соответствии со ст. 1299 и 1301 ГК РФ при устранении ограничений, установленных техническими средствами защиты авторских прав, правообладатель вправе требовать от нарушителя возмещения убытков или выплаты компенсации.

ISBN 978-5-89818-457-5

© Перельмутер А. В., Сливкер В. И.

© SCAD Soft

© Оформление ДМК Пресс

# Краткое содержание

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ</b> .....	12
<b>Глава 1</b> <b>ОБЪЕКТЫ РАСЧЕТА И ПРОБЛЕМА</b> <b>МОДЕЛИРОВАНИЯ</b> .....	20
<b>Глава 2</b> <b>ПОСТРОЕНИЕ РАСЧЕТНОЙ СХЕМЫ</b> .....	36
<b>Глава 3</b> <b>ОСНОВНЫЕ СООТНОШЕНИЯ</b> <b>ДЛЯ ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ</b> .....	94
<b>Глава 4</b> <b>КОНЕЧНОЭЛЕМЕНТНЫЕ МОДЕЛИ</b> .....	166
<b>Глава 5</b> <b>ОШИБКИ И ЛОВУШКИ</b> .....	204
<b>Глава 6</b> <b>АНАЛИЗ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ</b> ....	279
<b>Глава 7</b> <b>НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ ПАРАМЕТРОВ</b> .....	302
<b>Глава 8</b> <b>АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ КЛАССОВ ЗАДАЧ</b> .....	338
<b>Глава 9</b> <b>ЗАДАЧИ УСТОЙЧИВОСТИ И СМЕЖНЫЕ</b> <b>ВОПРОСЫ</b> .....	426

<b>Глава 10</b>	
<b>ЗАДАЧИ ДИНАМИКИ</b> .....	482
<b>Глава 11</b>	
<b>НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ</b> .....	544
<b>Глава 12</b>	
<b>ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ</b> .....	568
<b>ЛИТЕРАТУРА</b> .....	576
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ</b> .....	593

# Содержание

<b>Предисловие</b> .....	12
Предисловие к третьему изданию .....	12
Из предисловия ко второму изданию .....	13
Из предисловия к первому изданию .....	15
<b>Глава 1. Объекты расчета и проблема моделирования</b> .....	20
1.1. Многомерность и многофункциональность .....	22
1.2. Факторы, учитываемые при построении расчетной модели .....	23
1.3. Неопределенность в системе знаний об объекте .....	27
1.4. Эксперимент и практический опыт .....	28
1.5. Общие проблемы моделирования .....	31
1.6. Мажорантные и минорантные модели .....	33
1.7. Апостериорный анализ расчетной схемы .....	35
<b>Глава 2. Построение расчетной схемы</b> .....	36
2.1. Определяющие параметры и число степеней свободы .....	39
2.2. Модель нагружения – составная часть расчетной схемы .....	43
2.3. Контроль расчетной схемы и средства ее описания .....	46
2.4. Параметризация расчетной модели .....	56
2.5. Некоторые приемы .....	63
2.6. Моносвязи и полисвязи в расчетной схеме .....	71
2.7. Абсолютно жесткие тела как типы конечных элементов .....	76
2.7.1. Одномерные абсолютно жесткие тела .....	76
2.7.2. Двумерные абсолютно жесткие тела .....	77
2.7.3. Трехмерные абсолютно жесткие тела .....	78
2.7.4. Примеры использования абсолютно жестких тел .....	81
2.8. О нелинейных расчетах .....	82
2.9. Одновременное использование нескольких схем .....	85

2.10. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных .....	91
--	----

## **Глава 3. Основные соотношения**

<b>для дискретных систем .....</b>	<b>94</b>
------------------------------------	-----------

3.1. Разрешающие уравнения .....	96
----------------------------------	----

3.1.1. Метод перемещений .....	98
--------------------------------	----

3.1.2. Метод сил .....	102
------------------------	-----

3.1.3. Дуализм метода перемещений и метода сил. Проекторы .....	104
--	-----

3.2. Статико-кинематический анализ .....	108
--	-----

3.2.1. Замечание о дислокациях .....	112
--------------------------------------	-----

3.3. Снова о полисвязях. Вариационная формулировка .....	113
--	-----

3.4. Нуль-элементы .....	122
--------------------------	-----

3.5. Геометрическая нелинейность. Устойчивость .....	128
--	-----

3.5.1. Четыре этажа геометрически нелинейных постановок задач .....	128
--	-----

3.5.2. Геометрическая нелинейность для стержней ферменного типа .....	130
--	-----

3.5.3. Геометрически нелинейные уравнения в вариациях .....	135
---	-----

3.6. Конструктивная нелинейность – системы с односторонними связями .....	139
--	-----

3.7. Вантовые элементы в расчетной модели .....	145
---	-----

3.7.1. Координатные оси .....	148
-------------------------------	-----

3.7.2. Задание преднапряжения .....	150
-------------------------------------	-----

3.7.3. О линеаризованных моделях вантовых конструкций .....	151
---	-----

3.7.4. Линеаризация вантовых элементов расчетной схемы .....	153
--	-----

3.7.5. Линеаризация сжато-изогнутых элементов расчетной схемы .....	157
--	-----

3.8. Расчет на динамическую нагрузку .....	159
--	-----

3.9. Континуальные системы в конечноэлементном описании .....	163
--	-----

3.9.1. Замечание о терминологии .....	165
---------------------------------------	-----

3.9.2. Замечание о способах изображения расчетных схем .....	165
--	-----

<b>Глава 4. Конечноэлементные модели .....</b>	<b>166</b>
--	------------

4.1. Замечания о дискретизации задачи .....	168
---	-----

4.2. Основные понятия метода конечных элементов .....	168
4.3. Моделирование стержневых систем .....	174
4.4. Моделирование конечноэлементной сеткой .....	181
4.5. О практической сходимости .....	183
4.6. Проверка сходимости для некоторых моделей .....	185
4.7. Экстраполяция Ричардсона .....	188
4.8. Обход особых точек .....	191
4.9. Генерация конечно элементной сетки .....	196
4.10. О применении гибридных конечных элементов .....	199

## **Глава 5. Ошибки и ловушки** .....

5.1. Фрагментация .....	206
5.2. Построение непрерывных полей напряжений в МКЭ .....	214
5.3. Ошибки и ловушки при стыковке элементов различной размерности .....	223
5.3.1. Стержни + плиты .....	224
5.3.2. Стержни + пластины .....	231
5.3.3. Стержни + объемные элементы .....	242
5.3.4. Плиты + пластины (сопряжение оболочечных элементов) .....	243
5.4. Об одном парадоксе при сочетании стержней Бернулли и стержней Тимошенко в расчетной схеме .....	248
5.5. Аппроксимация геометрической формы и закреплений .....	256
5.6. Погрешности вычислений и как с ними бороться .....	259
5.6.1. Замечания о применении суперэлементов .....	271
5.6.2. Замечания о тестировании программного комплекса ...	273
5.7. Шаговая процедура .....	275

## **Глава 6. Анализ и интерпретация результатов** .....

6.1. Проблема анализа .....	282
6.2. Какие результаты расчета нужны .....	283
6.3. Общая апробация .....	290
6.4. Характерное перемещение .....	295
6.5. Вычисление энергии деформации .....	298
6.6. Последующая обработка результатов .....	300

## **Глава 7. Неопределенность**

<b>параметров</b> .....	302
7.1. Основные источники неопределенности .....	304
7.2. Методы расчета чувствительности .....	312
7.3. Чувствительность собственных колебаний .....	316
7.4. Оценка дополнительных усилий при изменении жесткостей .....	321
7.5. Теоретические оценки для случая неопределенных жесткостей .....	323
7.6. Использование методов планирования экспериментов	326
7.7. Предельное равновесие при неопределенном нагружении .....	336

## **Глава 8. Анализ некоторых**

<b>классов задач</b> .....	338
8.1. Шарнирно-стержневые системы .....	340
8.2. Монтаж .....	343
8.2.1. Генетическая нелинейность .....	349
8.3. Преднапряжение .....	357
8.4. Конструкции с гидравлическими домкратами .....	361
8.4.1. Жидкостный конечный элемент .....	366
8.5. Модель «здание – основание» .....	367
8.5.1. Учет распределительной способности грунта .....	367
8.5.2. Модель основания с двумя коэффициентами постели .....	369
8.5.3. Упругие характеристики основания .....	375
8.6. О назначении характеристик двухпараметрового упругого основания .....	378
8.6.1. Модель основания «ССС» .....	382
8.7. Модель «здание – основание» .....	390
8.7.1. Итерационный расчет .....	390
8.7.2. Расчетная модель фундаментной плиты .....	391
8.7.3. Об использовании конечноэлементной модели основания .....	395
8.8. Бистержневая модель тонкостенного стержня открытого профиля .....	398

8.8.1. Построение бистержневой модели .....	400
8.8.2. Бистержневая модель тонкостенного стержня, усиленного поперечными планками .....	407
8.8.3. Усиление тонкостенного стержня поперечной диафрагмой .....	413
8.8.4. Математическая трактовка бистержневой модели и ее дискретной схемы .....	413
8.9. Расчетные сочетания нагрузок .....	416

## **Глава 9. Задачи устойчивости и смежные вопросы .....**

426

9.1. Проверка устойчивости равновесия .....	428
9.2. Классическая задача устойчивости равновесия .....	434
9.3. Свободные длины сжатых стержней .....	439
9.4. Анализ роли отдельных подсистем .....	446
9.5. О влиянии дополнительных связей на устойчивость системы .....	454
9.5.1. Об одной ошибке загадочного характера в программных продуктах при расчете механических систем на устойчивость .....	456
9.6. Об одном парадоксе в задаче об устойчивости стержня .....	470
9.7. Учет несовершенств реальной конструкции .....	477
9.8. Замечания по учету P-D эфф эффектов .....	482

## **Глава 10. Задачи динамики .....**

482

10.1. Расчетные модели в задачах динамики .....	484
10.1.1. Динамические степени свободы .....	490
10.1.2. Динамическая конденсация – процедура Гайяна .....	491
10.2. Интегрирование уравнений движения .....	495
10.3. Вынужденные колебания при гармоническом воздействии .....	499
10.3.1. Модель Гордеевой .....	507
10.4. Декремент колебаний .....	510
10.4.1. Конечные элементы из упругого материала .....	513
10.4.2. Элемент сухого трения .....	514
10.4.3 Элемент вязкого трения .....	514

10.4.4 Элемент нелинейно-вязкого трения .....	515
10.4.5 Демпфирование излучением .....	515
10.5. Три резонансные кривые .....	517
10.6. Расчет сооружений на сейсмические воздействия .....	520
10.6.1. Спектры землетрясений .....	520
10.6.2. Сейсмическая реакция .....	521
10.6.3. Расчет по акселерограммам .....	528
10.6.4. Поэтажные спектры отклика .....	529
10.7. Действие импульсных и ударных нагрузок .....	531
10.8. Колебания под воздействием пульсаций ветрового потока .....	535
10.8.1. Моделирование ветрового воздействия .....	535
10.8.2. Динамическое действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки .....	536
10.8.3. Представление пульсационной составляющей ветровой нагрузки .....	538
10.8.4. Спектр пульсаций скорости ветра .....	540
10.8.5. Динамическая составляющая расчетного фактора .....	540
10.8.6. Проблемы численной реализации .....	541

## **Глава 11. Некоторые специальные проблемы .....**

**544**

11.1. Дублирование расчетов как мера защиты от ошибок .....	546
11.1.1. Что такое «независимо разработанные» программные комплексы .....	546
11.1.2. Использование разных расчетных схем .....	547
11.1.3. Как проводится сопоставительный анализ .....	549
11.1.4. О возможном нормировании правил определения НДС .....	549
11.2. Расчет на прогрессирующее разрушение .....	551
11.2.1. Прогессирующее разрушение, как научно-техническая проблема .....	551
11.2.2. Исходные события .....	553
11.2.3. О динамических эффектах .....	555

---

11.2.4. Оценка поведения элементов .....	557
11.3. Схемная характеристика живучести .....	559
11.4. О расчетном сопровождении строительного процесса .....	564
<b>Глава 12. Вместо заключения</b> .....	<b>568</b>
<b>Литература</b> .....	<b>576</b>
<b>Алфавитный указатель</b> .....	<b>593</b>

# Предисловие

*Нашим сыновьям — Мише, Андрею, Саше — отцовского уровня интереса к механике не унаследовавших, зато преуспевших в программировании, и в этом отношении своих родителей превзошедших.*

**А.П., В.С.**

*Настали тяжелые времена, прогневались боги, дети больше не слушаются родителей и каждый стремится написать книгу.*

**Древневавилонская запись**

## Предисловие к третьему изданию

Третье издание выходит с небольшими дополнениями, в которых мы постарались отразить накопленный опыт, а также учесть те замечания, которые поступили к авторам от заинтересованных читателей.

В некоторых из упомянутых замечаний содержались предложения о «приближении текста к уровню понимания рядового инженера», по сути предлагавшие превращение этой книги в собрание рецептов для тех пользователей программных средств, которые лихо научились нажимать кнопки, но не хотели бы принимать решения самостоятельно. Авторы не согласны на такое изменение стиля и содержания книги и стиля ее изложения. Мы являемся убежденными сторонниками той точки зрения, что никакой автомат и никакой авторитет не может отнять у инженера право сознательного принятия решений и ответственности за их использование.

Мы уже имели возможность высказаться по этому поводу, и остается лишь процитировать себя:

*«...ответственность за используемые результаты компьютерных программ, лежит на пользователе. Даже для абсолютно безошибочной программы на нее нельзя возложить ответственность за достоверность задаваемой информации, и, тем более, за принимаемые расчетные предпосылки. И это относится к наиболее сложной части автоматизированного проектирования — выполнению статических и динамических расчетов объекта. На этом фоне, отсылка к авторитету СНиП, которая касается лишь заключительных проверочных процедур, не может служить обоснованием правильности принимаемых решений даже в том случае, когда детальный текстовый комментарий представлен расчетчику для просмотра и подтвержден его одобрительной подписью» [154].*

Что касается содержания дополнений, то главные из них связаны с вопросами расчета на прогрессирующее разрушение и проблемой расчетного сопровожде-

ния процесса возведения ответственных объектов. Им посвящена дополнительная глава книги. Кроме того, ряд дополнений был вызван к жизни практикой общения с нашими читателями, которые подчас задавали вопросы, потребовавшие включения указанных дополнений. Типичным примером может служить форум сайта DWG.RU, на котором оживленно обсуждались темы «Моделирование модели – вычисление  $C_1$  и  $C_2$ » и «Защита от прогрессирующего обрушения», анализ его протекания явно указал нам на необходимость внесения дополнительных пояснений в текст книги. Мы с благодарностью воспринимаем такого рода стимулирующее общение с нашими читателями, и высоко ценим возможность быть полезными практикующим инженерам.

А. Перельмутер, В. Сливкер  
сентябрь 2006

## Из предисловия ко второму изданию

...эта книга носит прикладной характер в том смысле, что она нацелена на решение задач, выдвигаемых практическими потребностями строительного проектирования с использованием современных средств автоматизации инженерного труда. Вместе с тем она была и остается в разряде изданий скорее аналитического, а не справочного характера, она не ориентирована на читателя, которому необходим фактографический материал или точные руководства к действию. Великий Гёте писал, что

*«...точно знают, только когда мало знают. Вместе со знанием растет сомнение».*

В литературе по расчету строительных конструкций при описании используемых расчетных моделей и в рекомендациях по их назначению и использованию наблюдается заметный перекокс в сторону чисто рецептурных подходов в ущерб аналитическим. В результате накапливается разрыв между эмпирическим и теоретическим знанием.

При написании этой книги и работе над ее вторым изданием авторы настойчиво прикладывали усилия к тому, чтобы в какой-то мере уменьшить этот разрыв, постоянно стремясь дистанцироваться от стиля поваренной книги. Конечно, полностью отказаться от обращения к рецептам не удастся хотя бы потому, что инженеру-расчетчику приходится считаться с указаниями официальных документов, а сами нормы, увы, построены по рецептурному принципу. Но ошибок и недоразумений в любой области интеллектуальной деятельности не избежать с помощью простых рецептов. По этому поводу Эндрю Кoenиг в книге с характерным названием «Ловушки и силки при программировании на языке C» писал

*«... если бы это было возможно, то мы могли бы исключить катастрофы на дорогах простой наклейкой на стеклах автомобилей надписей типа «Водитель – будь бдителен!». Люди обучаются наиболее эффективно посредством опыта – своего или чьего либо. А уже само понимание возможности ошибочного решения есть первый и верный шаг к тому, чтобы избежать этой опасности».*

Первое издание предлагаемой читателю книги разошлось, не успев удовлетворить читательского спроса. Отклики читателей на это издание, принятые авторами с благодарностью и удовлетворением, оказались для нас вернейшим признаком того, что книга не оставила специалистов равнодушными к обсуждаемым проблемам и что труд, затраченный на подготовку книги, был оправдан. А большой разброс в квалификации и опыте «откликантов» прибавил нам уверенности, что эта книга не напрасно сокращает объем свободного места на полке как новичка в расчетах конструкций, так и ветерана.

Не обошлось и без критики, и многие замечания читателей нами приняты. В настоящее издание в связи с принятыми замечаниями внесены необходимые исправления. Но не со всякой критикой, как и предупреждалось в предисловии к первому изданию книги, мы можем согласиться. Так, например, один из критически настроенных читателей, говоря о вопросе из предисловия к первому изданию (как не ошибиться при создании расчетной схемы и как понять результаты машинного расчета?), написал:

*«Я не берусь судить, возможен ли вообще положительный ответ на первую часть вопроса, т.к. человеку свойственно ошибаться, и поэтому всегда надо себя проверять. Что же касается второй части вопроса (как понять результаты счета), то, по моему мнению, здесь может быть только один ответ: что заказал, то и получил, так что понимай, как знаешь. А не знаешь — не заказывай. Это относится не только к пользователям, но и к разработчикам программных средств (и к ним — в первую очередь)».*

...После некоторых колебаний мы отказались от хотя бы частичного поименования авторитетных специалистов, вступивших с нами в переписку по обсуждаемой проблематике, поскольку любые читательские отклики оказались для авторов чувствительным катализатором, ускорившим работу над вторым изданием, вне зависимости от титулования наших корреспондентов. Мы чувствуем себя обязанными выразить всем эти лицам искреннюю признательность за проявленный интерес к нашей работе. Хотя от одного отступления от этой позиции мы все же не можем отказаться. Речь идет о незамедлительной и лестной для авторов реакции Я. Г. Пановко<sup>1</sup> на нашу книгу. Среди замечаний и рекомендаций, высказанных Яковом Гилелевичем, есть и рекомендация по изменению названия. Вот как, по мнению Я. Г. Пановко, стоило бы назвать эту книгу:

## **РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ СООРУЖЕНИЙ** **(идеи, принципы выбора, анализ, опасности и неудачи)**

Не правда ли, сразу чувствуется рука мастера! И все же, ради сохранения преемственности, мы оставили старое название, поскольку здесь представлена не

---

<sup>1</sup> В апреле 2002 года выдающийся механик и замечательный человек Яков Гилелевич Пановко скончался в возрасте 89 лет. На его книгах, посвященных самым различным разделам механики и всегда отличающихся неординарностью и отменным литературным вкусом, было воспитано несколько поколений инженеров и исследователей. К одному из этих поколений причисляют себя и авторы настоящей книги. Некролог, посвященный памяти Я. Г. Пановко, опубликован в журнале «Успехи механики», т.1, №2, 2002,

новая книга, а всего лишь обновленная, пополненная и отредактированная, версия старой книги с уже узнаваемым, хотя и более сухим, названием.

И последнее. В книге немало ссылок на широко распространенные программные системы, большинство из которых носят коммерческий характер. Для удобства читателей приведем здесь список таких программ, снабдив наименование этих программ адресом соответствующего веб-сайта:

SCAD	<a href="http://www.scadsoft.com">www.scadsoft.com</a>
GTSTRUDL	<a href="http://www.gtstrudl.gatech.edu">www.gtstrudl.gatech.edu</a>
MicroFe	<a href="http://www.eurosoft.ru">www.eurosoft.ru</a>
Lira Windows	<a href="http://www.lira.com.ua">www.lira.com.ua</a>
ANSYS	<a href="http://www.ansys.com">www.ansys.com</a>
Robot Millennium	<a href="http://www.robobat.com">www.robobat.com</a>
Straus7	<a href="http://www.strand7.com">www.strand7.com</a>
NASTRAN	<a href="http://www.mscsoftware.com">www.mscsoftware.com</a>
ABAQUS	<a href="http://www.hks.com">www.hks.com</a>
STAAD	<a href="http://www.reiworld.com">www.reiworld.com</a>
COSMOS	<a href="http://www.cosmosm.com">www.cosmosm.com</a>
LS-DYNA	<a href="http://www.ls-dyna.com">www.ls-dyna.com</a>
LUSAS	<a href="http://www.lusas.com">www.lusas.com</a>
DIANA	<a href="http://www.diana.nl">www.diana.nl</a>
RM2000	<a href="http://www.tdy.at">www.tdy.at</a>
ADINA	<a href="http://www.adina.com">www.adina.com</a>

В подавляющем большинстве случаев обращение к веб-сайту позволит выяснить необходимые подробности.

А. Перельмутер, В. Сливкер  
ноябрь 2002

## Из предисловия к первому изданию

Тридцать лет назад было сказано [211]:

*«Для инженера искусство выбора расчетной схемы является очень важным. Этому искусству нигде специально не учат. В программах высших технических учебных заведений и, тем более, в университетских программах, нет таких курсов, таких дисциплин, где бы этот вопрос разбирался концентрировано и в должной мере».*

С тех пор мало что изменилось по существу, хотя широкое внедрение компьютерных расчетов резко изменило понятие о размерах доступных для решения задач и, по крайней мере внешне, создало картину относительного благополучия в части расчетных обоснований принимаемых решений. Обнаружилась явно выраженная тенденция ко все большему усложнению используемых расчетных схем и увеличению их размерности. Но является ли использование усложненных и детализированных расчетных моделей благом? Есть ли другие пути получения качественных результатов? Как не ошибиться при создании расчетной схемы и

как понять результаты машинного расчета? Ответы на эти и другие смежные вопросы составляют основу замысла этой книги.

После появления ЭВМ строительная механика в значительной степени *стала экспериментальной наукой*, но этот факт почему-то не осознан в должной мере<sup>1</sup>. Такие научные дисциплины как планирование эксперимента и статистическая обработка результатов эксперимента, методы и приемы, развитые в них, а самое главное — идеология этих дисциплин остались в стороне при стандартной подготовке инженера-расчетчика. Внешняя легкость постановки расчетного эксперимента приводит к тому, что инженеры-практики и даже некоторые исследователи ставят эти эксперименты бессистемно, а их результаты анализируются лишь частично, что не только обедняет такой подход, но и создает опасность пропуска ошибки. Укоренилось мнение, что «хорошая программа»<sup>2</sup> и проверенные на безошибочность исходные данные дают гарантию точного результата, но при этом упускается весьма существенная сторона проблемы — для какого варианта расчетной модели получен этот результат и какова степень его адекватности реальной конструкции, а не принятой расчетной модели. Оказалось, что получить ответ на эти вопросы весьма непросто, и что во многих случаях для этого недостаточно развит теоретический аппарат, не говоря уже о наличии соответствующих функций используемого программного обеспечения.

Повсеместное распространение программных систем, основанных на использовании метода конечных элементов (МКЭ), позволяют сузить проблему, названную в заголовке книги до формулировки «расчетные конечно-элементные модели сооружений и возможность их анализа с помощью ЭВМ». Достаточно полное представление о круге анализируемых задач можно получить из приведенного ниже перечня этапов компьютерного расчета и возникающих на этих этапах вопросов [284]. Основными этапами являются:

- создание модели;
- выбор программного обеспечения для реализации расчета;
- проверка модели;
- собственно расчет;
- верификация результатов.

При создании модели можно, к примеру, поставить следующие вопросы:

- каковы истинные условия опирания — шарнирные или защемленные опоры;
- должны ли узлы воспринимать моменты или считаться шарнирными (или полужесткими);
- взаимодействует ли рама с другими конструкциями или является изолированной плоской системой;
- каковы истинные нагружения системы (собственным весом, ветром, снегом и др.);
- каково влияние эффектов второго порядка (выпучивания стоек, изгибно-крутильной формы потери устойчивости и др.)?

<sup>1</sup> Здесь имеется в виду вычислительный эксперимент.

<sup>2</sup> Тот самый случай, когда все знают, что это такое, но каждый понимает это по-своему.

При верификации результатов необходимо различать оценку обоснованности, связанную с анализом неопределенностей расчетной модели, и собственно верификацию, которая ориентирована на поиск ошибок в ней. Мы говорим об ошибках, когда задаваемые значения параметров неверны, если же нельзя сказать, что параметр неверен, но значение его может быть несколько иным, то речь идет о неопределенностях.

Оценка обоснованности должна привести к заключению — *«эта модель адекватна, она соответствует реальной конструкции»*. А в связи с верификацией уместно выполнить:

- проверку данных (огромное значение имеет графическое отображение!);
- проверку общего равновесия — сумма реакций равна сумме нагрузок;
- проверку локальных равновесий по подсистемам;
- проверку на соответствие видимой картины деформирования заданным условиям опирания;
- проверку имеющихся условий симметрии;
- оценку общей картины напряженно-деформированного состояния конструкции (НДС), сопоставление деформаций с распределением внутренних сил.

...в тех случаях, когда нам потребуются примеры программной реализации каких-нибудь положений, мы будем чаще всего обращаться к программно-вычислительному комплексу **SCAD** [93], с помощью которого решены практически все примеры (редкие исключения оговорены в тексте) и который является достаточно типичной разработкой, пригодной для анализа современного подхода к рассматриваемым проблемам. Коллектив разработчиков этого комплекса с большим вниманием отнесся к идее написания этой книги, оказал авторам всяческую помощь и хотел бы ее видеть в качестве неформальной компоненты эксплуатационной документации.

Сама книга ориентирована на читателя, знакомого с обычным курсом строительной механики и имеющего хотя бы небольшой опыт выполнения расчетов с использованием ЭВМ. Этот читатель возможно уже успел понять, что расчеты реальных сооружений сложнее, чем те, которые ему приходилось делать при выполнении вузовских упражнений по заранее подготовленным для него расчетным схемам. Иными словами книга рассчитана на подготовленного читателя — читателя, который считает, что его профессиональная подготовка не завершилась с получением вузовского диплома, а нуждается в постоянном совершенствовании. В некотором смысле это учебник, но такой, что трудно назвать наименование учебной дисциплины, к которой его следует отнести. Кроме того, рассматриваемый предмет во многом является искусством, а единственным методом обучения искусству является указание мастера-учителя «Делай, как я», хотя ученик становится мастером именно тогда, когда он перестает делать как учитель. Поэтому к призывам авторов поступать именно так, а не иначе, следует относиться с творческим недоверием.

Говоря о потенциальном читателе, мы сознательно употребили глагол «ориентирована» взамен «предназначена», поскольку по нашему представлению чита-

тельская аудитория не ограничивается одними только пользователями расчетной программной продукции. Авторы надеются, что и разработчики найдут для себя на страницах этой книги полезные рекомендации и советы. Вообще, разделение армии профессионалов расчетчиков на *разработчиков* и *пользователей* достаточно условно и не соответствует ранжированию инженеров, скажем, на генералов и сержантов, это скорее взаимодействующие рода войск вроде артиллерии и пехоты. Многие и даже большинство из разработчиков одновременно являются и пользователями, а само понятие пользователь не употребляется нами хоть в сколько-нибудь уничижительном смысле – да мы и сами пользователи!

Как пользователи (и для пользователей) на страницах этой книги мы неоднократно будем обращать внимание читателя на различного рода ловушки и сюрпризы, подстерегающие инженера, рискнувшего пуститься в плавание расчетной инженерии на только что приобретенной новенькой и еще пахнущей свежей краской яхте с интригующим названием **СЛМПК**<sup>1</sup>.

Как пользователи (и для пользователей) мы поделимся с читателем некоторым опытом (своим и своих коллег) прохождения казалось бы непроходимых водных преград на доступном для Вас суденышке, строители которого даже и не догадывались о такой прыткости своего детища. Иногда для преодоления возникающих трудностей достаточно воспользоваться «маленькими хитростями», в иных случаях требуется серьезная предварительная проработка деталей.

Как пользователи (но для разработчиков) мы будем касаться обсуждения переходных качеств кораблей и того такелажа, которым хотелось бы оснастить будущие океанские лайнеры (расчетные программные комплексы) или снабдить которыми можно и полезно, слегка подновив, уже построенные.

Полностью разделяем мнение Л. А. Розина, высказанное им в недавно изданной книге [179] в словах:

*«От расчетчика-пользователя программными комплексами, интересующегося напряженно-деформированным состоянием, не требуется детального знания всех математических, вычислительных и компьютерных проблем. Однако ему необходимо иметь представление о том, как математически формулируются задачи и что представляют собой численные методы их решения. Без этого трудно рационально выбрать расчетную схему и правильно оценить достоверность окончательных результатов».*

Именно поэтому как инженеры и для инженеров мы не посчитали себя вправе отмалчиваться и в вопросах математической постановки расчетных инженерных проблем, а также обсуждения алгоритмов и численных методов решения этих проблем.

И еще один момент, который стоит отразить в предисловии. В книге немало специфической терминологии. В тех случаях, когда в учебной, научной и технической литературе (по крайней мере, русскоязычной) имеется прижившийся, об-

---

<sup>1</sup> Вы уже догадались, что это всего лишь аббревиатура Самой Лучшей в Мире Программы по Расчету Конструкций.

щепринятый термин, мы старались не отступать от традиций вне зависимости от того, нравится нам этот термин или мы бы предпочли другое слово для обозначения того же понятия. В ситуациях, когда сосуществуют разные термины для обозначения одного и того же понятия (например, *плита* и *изгибаемая пластина*), мы считали себя вправе сделать выбор. Но нам пришлось вводить и целый ряд новых терминов, иногда заимствуя их из своих ранее опубликованных работ (*нуль-элемент*, *полубесконечный конечный элемент*, *моносвязи и полисвязи и т. д.*), а иногда подыскивая или конструируя специально для этой книги подходящие по нашему мнению новые термины (*псевдожесткость и псевдоподатливость*, *бистержневая модель и т. д.*). Делалось это не из стремления к словотворчеству, а из понимания необходимости пополнять и совершенствовать словарь той предметной области, к которой и относится содержание книги. Если такой словарь не вырабатывать, не стараться шлифовать определения понятий и обозначать их емко и кратко одним-двумя словами, то легко впасть в такую терминологическую анархию, когда даже два специалиста в одной узкой области знаний перестают понимать друг друга<sup>1</sup>.

Заранее принимаем упрек в том, что в этой книге нет обсуждения той или иной важной темы – «*нельзя объять необъятное*» (Козьма Прутков). Из всего того, чего здесь нет, отметим только одну деталь, осознанно нами опущенную. В мире насчитываются десятки (сотни?) расчетных программ. Как выбрать из этого множества назойливо рекламируемых продуктов именно то, что Вам нужно, на что стоит потратить свои деньги и время на детальное изучение, а что можно сразу отбросить? Так вот, мы не даем рекомендаций по приобретению какой-либо конкретно поименованной программы. Это не означает, что авторы не имеют своего мнения на этот счет, но рынок... Рынок слишком деликатная вещь, болезненно реагирующая на грубые вмешательства даже экономистов, а мы инженеры. Если читатель разочарован этим, то все, чем мы можем его утешить, это посоветовать приобретать «хорошие программы». Мы полагаем, что после прочтения книги читателю будет ясен смысл, вкладываемый в это понятие авторами.

Замысел этой книги неоднократно обсуждался с рядом крупных специалистов, среди которых особо заметную роль сыграли В. Н. Гордеев, А. А. Дыховичный, М. И. Казакевич, Э. З. Криксунов, С. Ф. Пичугин, Ю. Б. Шулькин. Всем этим лицам авторы выражают глубокую благодарность.

Многие приемы анализа и подходы к решению некоторых проблем были наработаны при решении практических задач, связанных с расчетом и проектированием целого ряда весьма сложных и ответственных сооружений. Авторы с удовольствием вспоминают творческие контакты с такими профессионалами-расчетчиками как Э. С. Александровская, В. Б. Барский, Ю. С. Борисенко, К. П. Галасова, С. З. Динкевич, Л. Г. Дмитриев, М. Г. Дмитриев, А. Я. Дривинг,

<sup>1</sup> Ну как тут не вспомнить известный анекдот о двух инопланетянах, приземлившись где-то между С.Петербургом и Москвой. Один из них говорит: «Кажется, мы на кладбище. Смотри-ка, вот надгробный камень. Землянин, лежащий под ним, жил 128 лет». «Ого! А как его звали?». «Его звали... Его звали КилометровОтМосквы».

А. А. Дыховичный, М. Л. Гринберг, А. И. Конаков, В. М. Коробов, Н. Б. Краснопольская, В. П. Крыжановский, А. О. Кунцевич, М. А. Микитаренко, А. Г. Пинскер, А. Я. Прицкер, С. Ю. Фиалко, Е. Б. Фрайфельд и рядом других своих коллег. Их опыт и приемы работы в той или иной мере нашли свое отражение на страницах этой книги.

Особую благодарность авторы хотели бы высказать рецензентам книги профессорам В. Н. Гордееву и Л. А. Розину за многочисленные рекомендации по уточнению и улучшению текста книги, которые мы использовали при подготовке окончательной редакции. Мы также искренне признательны нашему коллеге Ф. М. Свойскому, взявшему на себя труд прочесть книгу в рукописи, и благодаря внимательности которого удалось исправить многие (к сожалению не все!) неточности. Наша признательность – Д. А. Маслову и И. Ф. Лайкиной за помощь в подготовке иллюстративного материала. И, наконец, мы не можем не отметить существенную поддержку со стороны компаний SCAD Soft и ОАО Гипростроймост – Санкт-Петербург, оказанную на всех этапах нашей работы, без которой эта книга вряд ли увидела бы свет.

В свое время три автора оказали наиболее сильное влияние на формирование наших научных взглядов. Это в алфавитном порядке – Я. Г. Пановко, Л. А. Розин и В. И. Феодосьев. Мы хотим воспользоваться представившимся случаем, чтобы высказать свое почтительное восхищение трудами этих авторов.

Отчетливо осознаем, что в ряде случаев наши высказывания субъективны, а отбор материала навеян личным опытом и личными профессиональными предпочтениями. Впрочем, любое из научных или технических положений, изложенных на страницах книги, авторы готовы защищать до тех пор, пока не ознакомятся с убедительным его опровержением.

Мы будем признательны любым читательским откликам, содержащим дискуссионные положения или прямую критику, а самое главное, указания на неосвоенные в книге проблемы расчета конструкций, с которыми инженерам-расчетчикам пришлось столкнуться в своей практической деятельности и обсуждение которых они предполагали увидеть, приобретая эту книгу. Проще всего с авторами можно связаться, воспользовавшись электронной почтой. Вот наши адреса:

**avp@scadsoft.com** и **slivker@gpsm.ru**

## Объекты расчета и проблема моделирования

1.1. Многомерность и ногофункциональность .....	22
1.2. Факторы, учитываемые при построении расчетной модели .....	23
1.3. Неопределенность в системе знаний об объекте .....	27
1.4. Эксперимент и практический опыт .....	28
1.5. Общие проблемы моделирования .....	31
1.6. Мажорантные и минорантные модели .	33
1.7. Апостериорный анализ расчетной схемы .....	35

*Серьезному развитию серьезных наук лучше всего способствует легкомыслие и некоторая издевка. Нельзя относиться всерьез к своей собственной персоне. Конечно, есть люди, которые считают, что все, что делается с серьезным видом, — разумно. Но они, как говорят англичане, не настолько умны, чтобы обезуметь. На самом деле, чем глубже проблема, тем вероятнее, что она будет решена каким-то комичным, парадоксальным способом, без звериной серьезности.*

Даниил Гранин. Зубр // Новый мир – 1987. – 1.

## 1.1. Многомерность и многофункциональность

Современные здания и сооружения чаще всего бывают сложными конструктивными многоэлементными комплексами, создаваемыми для выполнения большого числа различных функций, и их жизненный цикл связан с возможностью реализации многих рабочих состояний. Специфика строительной деятельности такова, что ее конечный продукт (здание или сооружение) должен сочетать в себе три подчас противоречивых момента: функциональность, эстетичность и конструктивность.

С точки зрения расчетчика, наибольшее значение имеют конструктивные особенности объекта, с которыми связана проблема оценки его несущей способности, но сама по себе конструктивная функция не всегда предстает в рафинированной форме. Если в каркасном здании довольно просто указать, какие конструктивные элементы являются основными (хотя и здесь имеются определенные проблемы), то для сооружения другого типа это удастся сделать далеко не сразу и то – только после предварительного анализа нескольких конкурирующих гипотез. Более того, список несущих элементов здания может оказаться различным для разных режимов работы. Так, игнорирование роли «ненесущих» перегородок при расчетах, ориентированных на выявление предельного состояния и конструирование силового каркаса здания, вполне правомерно, но отбрасывание их вклада при оценке малых колебаний конструкции может привести к заметной ошибке.

Многочисленность функций и возможных режимов работы современного сколь-нибудь сложного сооружения таковы, что все это практически невозможно учесть в рамках одной расчетной модели.

Второй особенностью, на которую следовало бы обратить внимание, является многомерность расчетных моделей, которые используются в современной проектной практике. Десятки и сотни тысяч учитываемых степеней свободы давно перестали волновать воображение расчетчика, поскольку для доступных ему вычислительных средств это не является препятствием. Достаточно характерным (и рядовым по величине!) примером может служить расчетная схема здания, представленная на рис. 1.1 и насчитывающая 4416 узлов и 6632 конечных элементов, причем сетка конечных элементов в пределах каждой из стеновых панелей или плит перекрытия принята достаточно грубой.

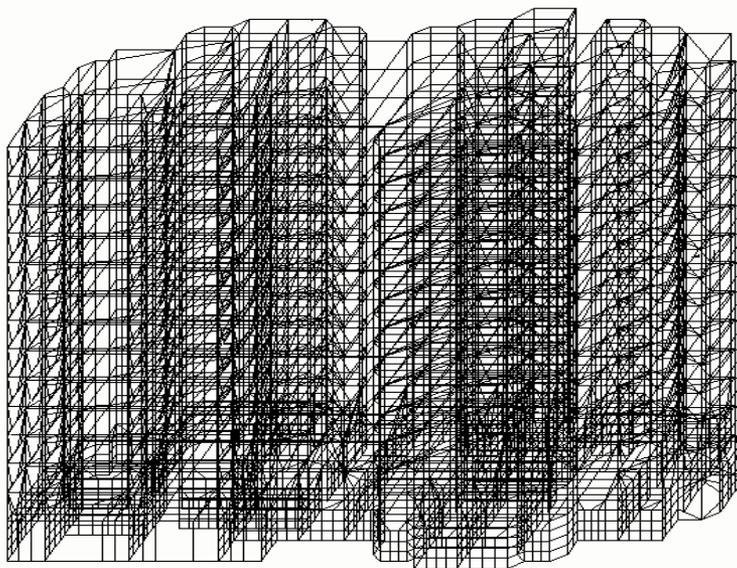


Рис. 1.1. Конечноэлементная модель здания

Наибольшая по размерности из известных нам задач, достойная книги рекордов Гиннеса, – это моделирование термо-гидро-газодинамически-прочностного поведения атомного реактора, выполненное в 1998 году фирмой Adarco с помощью программного комплекса **STAR-CD**. Размерность задачи составила  $5,78 \times 10^6$  конечных элементов и сотни миллионов степеней свободы; решение на многопроцессорном комплексе из 64 рабочих станций IBM SP заняло 55 часов<sup>1</sup>.

В еще большей степени возрастает размерность решаемых задач, когда сооружение рассматривается совместно с упругим основанием, на котором оно установлено. Задачи такого рода, сформулированные в начале 80-х годов как призыв к выполнению расчетов здания совместно с основанием как единой пространственной системы, обратились в практику 90-х.

## 1.2. Факторы, учитываемые при построении расчетной модели

Выделение из объекта его несущей части является первым шагом идеализации. Условность и неоднозначность этого шага связана с несколькими обстоятельствами:

---

<sup>1</sup> Это было написано в 2000 году, но сегодня упомянутый рекорд побит. На сайте [www.fea.ru](http://www.fea.ru) было сообщено, что компания UGS анонсировала рекордное достижение в области конечно-элементных расчетов, а именно, программной системой **NX™ Nastran** решена задача в *200 млн.* степеней свободы – презентация была проведена на конференции **DARATECH SUMMIT 2006**.

- с различной ролью отдельных элементов сооружения при различных режимах нагружения – при одних нагружениях какие-то элементы выполняют только роль ограждающих, а при других они существенно влияют на игру сил;
- с изменением схемы передачи усилий при различной интенсивности нагружения: уже упоминалось о переменной роли перегородок, таким же образом могут вести себя и другие элементы;
- с изменениями, которые могут происходить при различных режимах функционирования объекта, поскольку многие из современных сооружений принадлежат к числу трансформируемых, и то, что было несущим остовом в одной конфигурации, может стать балластным грузом при другой конфигурации (если учесть стадии изготовления, перевозки и монтажа, то изменение функций отдельных частей сооружения станет скорее правилом, чем исключением).

После того, как выбрана та часть объекта, которая будет фигурировать в расчете, начинается идеализация ее геометрического образа – *геометрическое моделирование*. Эта операция может выполняться сверху вниз, когда в основу положен набор некоторых геометрических примитивов (прямоугольные и круглые пластины, параллелепипеды, оболочки в виде конуса, цилиндра или сферы и т. п.), или же снизу вверх, когда в основу построения геометрической модели положены понятия точки, линии, поверхности и т. п. Моделирование с использованием операций обоих типов приводит, в конце концов, к созданию некоторой идеализированной геометрической модели конструкции, лишенной несущественных (по мнению расчетчика) деталей, например, мелких объектов типа фасок и скруглений.

В процессе геометрического моделирования решается вопрос о возможной идеализации объекта в смысле придания ему свойств регулярности или симметрии, хотя сам объект, возможно, и не является строго регулярным, а условия симметрии могут быть в небольшой степени нарушенными. Однако регулярность и симметрия являются такими мощными факторами сокращения объема анализа, что обычно на некоторые отступления не обращают внимание. Примерно таким же образом рассуждают при выявлении некоторых повторяющихся частей объекта, которые можно с той или иной степенью точности считать одинаковыми подсистемами. Естественно, что геометрическая тождественность есть лишь одно из необходимых условий для выводов такого рода.

Следующим этапом является *идеализация материала* конструкции, вернее набора его физико-механических параметров. Чаще всего материал наделяется свойствами идеальной упругости, или идеальной пластичности. Значения параметров, характеризующие свойства материала (модуль упругости, коэффициент Пуассона, предел текучести и др.) принимаются по справочным значениям и предполагаются одинаковыми в пределах достаточно больших частей сооружения (или по всему сооружению), и соответствие их реальных значений принятым анализируется весьма редко. Эта традиция проистекает из классического подхода к расчету, где давно выяснено, что для таких, например, материалов как конструкционная сталь изменчивость физико-механических свойств невелика и мало

сказывается на результатах расчета. Но, к сожалению, выводы этого типа используются и далеко за пределами своей обоснованности. Достаточно сказать, что идеализированными и одинаковыми по пространству свойствами нередко наделяются грунты основания, для которых предположение о малой изменчивости параметров не слишком оправдано, а зачастую – просто не согласуется с результатами инженерно-геологических изысканий. Другим типичным примером является надделение системы неким осредненным значением логарифмического декремента колебаний или других аналогичных мер диссипации, в то время когда такие параметры могут меняться в пределах сооружения в десятки и сотни раз.

В процессе идеализации материала иногда принимается решение о выполнении расчета «с учетом физической нелинейности», но оно очень редко делает такой расчет убедительным. Дело в том, что, хотя «физическая нелинейность», по замыслу, должна моделировать пластическую работу, чаще всего (имеются и исключения) все сводится к нелинейной зависимости между напряжениями и деформациями, одинаковой при нагружении и разгрузке, то есть для упругого, а не для пластического материала. Необходима твердая уверенность в том, что нагружение будет активным, и никакие разгрузки происходить не будут, а для этого недостаточно предположить, что будут только возрастать все внешние силы (мы уже не говорим, что и такое предположение далеко от реальности). Таким образом, роль указанной идеализации в практическом расчете оказывается сомнительной, хотя ее использование в процессе исследовательского анализа может и быть полезным.

Наконец, в понятие идеализации материала иногда включается идеализация конструктивного решения. Так, например, часто расположенные ребра подкрепления пластин и оболочек «размазываются», но при этом материалу сглаженной системы приписывается свойство анизотропии (так называемая «конструктивная анизотропия»).

Достаточно серьезной процедурой является *идеализация нагрузок*, действующих на конструкцию в различных режимах работы. Вообще, нагрузки являются одной из наименее изученных компонентов системы, они имеют большую изменчивость во времени и пространстве, и те расчетные модели нагружения, которыми оперирует проектная практика, достаточно условны. Некоторые из моделей нагружения, которые традиционно используются при составлении расчетных моделей (равномерно распределенная нагрузка, сосредоточенная сила, импульсивное воздействие, гармоническая осцилляция) являются сильными физическими абстракциями, о чем надо хорошо помнить при анализе результатов расчета. Особенно много ошибок в процессе идеализации нагрузок совершается в части описания их поведения во времени, что приводит к недостоверной картине динамического поведения системы. Именно в динамике наиболее ярко проявляется обратная связь между нагрузкой и сооружением, когда его поведение меняет сам характер динамически приложенных нагрузок (флаттер, галопирование, взаимовлияние различных форм колебаний и др.).

Понятие нагрузки является удобным способом описания взаимодействия конструкции с окружающей средой, но это – не единственная форма такого взаимодействия. Часто необходимо описать не силовое, а кинематическое взаимодейст-

вие, когда некоторые, внешние по отношению к рассчитываемой системе устройства, стесняют перемещения или повороты отдельных точек или навязывают ей свои перемещения. Такие условия, называемые связями, почти всегда присутствуют в расчетной модели. Заметим попутно, что заданное перемещение какой-либо точки всегда реализуется в виде смещения связи, а обычная связь-опора является частным случаем такого кинематического воздействия, когда упомянутое заданное перемещение имеет нулевое значение. Конечно, бесконечно жесткая связь, абсолютно точно навязывающая системе определенное (возможно, нулевое) значение перемещения в свою очередь является идеализацией; в действительности взаимодействие с окружающей средой реализуется через некоторые устройства, имеющие, возможно, очень большую, но не бесконечно большую жесткость.

Вообще, следовало бы говорить не столько о *нагрузках*, сколько о *воздействиях* на сооружение. Если попытаться их классифицировать, то в первом приближении воздействия можно разделить на внешние и внутренние – с одной стороны, а с другой стороны – на силовые и кинематические, что и отражено в приводимой ниже таблице 1.1.

Таблица 1.1

<b>Воздействия</b>	<b>Силовые</b>	<b>Кинематические</b>
Внешние	Нагрузки	Заданные перемещения опорных узлов
Внутренние	Контролируемое предварительное напряжение	Дислокации, температурные перемещения

Но и эта классификация – условна и неполна, так как не отражает таких, например, специфических условий взаимодействия с окружающей средой как коррозия, химическое взаимодействие, выкрашивание, изменение схемы сооружения в результате разрывов связей (в том числе и по злому умыслу) и т. п.

*Идеализация связей* распространяется и на описание законов взаимодействия отдельных элементов системы друг с другом. Принимаемые чаще всего условия полного совпадения перемещений или взаимных поворотов в точках соединения (абсолютно жесткая связь), равно как и их альтернатива, то есть отсутствие какого бы то ни было взаимодействия по рассматриваемым видам перемещений (шарнир, ползунок), конечно, являются достаточно сильной идеализацией реальной картины взаимодействия.

При этом чаще всего исходят не из кинематических условий сопряжения, а из гипотез, связанных с силовыми аспектами взаимодействия. Так, глядя на конструкцию узла некоторой фермы (рис. 1.2), трудно принять решение о полной свободе взаимных углов поворота концевых сечений стержней, сходящихся в узле. В то же время, приводящая к такому же выводу гипотеза о малой роли изгибающих моментов при чисто узловых нагружениях интуитивно воспринимается как вполне разумная.

Двойственность силового и кинематического описания условий связи, сводящаяся к формуле «*невозможно такое-то взаимное перемещение*»  $\in$  «*воспринимается такая-то сила*» или к обратной «*допускается такое-то взаимное перемещение*»  $\in$  «*не воспринимается такая-то сила*», сильно облегчает анализ.

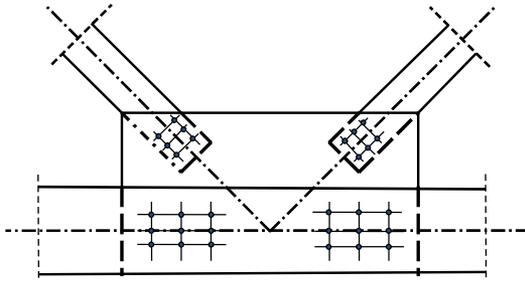


Рис. 1.2. Узел фермы

### 1.3. Неопределенность в системе знаний об объекте

Идеализация расчетной модели и невозможность сделать ее абсолютно адекватной реальной конструкции создают ситуацию некоторой неопределенности, и именно в условиях такой неопределенности приходится принимать проектные решения.

*Неопределенность* порождается как недоступностью всей необходимой информации (например, нам принципиально неизвестны все возможные в будущем режимы работы конструкции), так и ее неполнотой (вряд ли можно себе представить, например, что мы можем точно узнать физико-механические свойства в любой точке конструкции). Недоступность некоторых видов информации, как и ее неполнота, являются принципиальными моментами, они не могут быть до конца преодолены, и сколь бы подробно мы ни изучали поставленную задачу, мы не можем никогда сказать, что в расчетной модели учтено все.

Однако не только недоступность и неполнота данных порождают ситуацию неопределенности. Имеется еще и их неоднозначность, то есть возможность различных трактовок одних и тех же факторов, а это требует оценки имеющихся альтернатив. Известны классические подходы к неопределенности, которые сводятся к следующим вариантам принятия решений:

- использование теории вероятностей, когда в основе принимаемого решения находится объективный предыдущий опыт;
- использование экспертных оценок, то есть принятие решений на основе субъективного опыта эксперта (коллектива экспертов);
- минимаксная оценка, когда принимается наилучшее решение из числа достижимых, в предположении возможного наихудшего варианта развития событий, то есть решение принимается по возможному результату.

Все эти варианты применяются совместно или порознь и направлены на оценку правдоподобности расчетной модели. Имеются и другие факторы, определяющие приблизительность расчетной модели и приводящие к возникновению ошибок, искажений и противоречий.

Это, во-первых, ошибки расчетного моделирования (ошибки аппроксимации), возникающие либо за счет приблизительности наших знаний, либо за счет

их намеренного загробления. К такого рода «ошибкам» можно отнести использование упрощенных математических описаний – выбор полиномов относительно небольшой степени для описания поля перемещений в методе конечных элементов, усечение числа членов ряда в методе Галеркина и т. п. Сюда же относятся ошибки от несогласованности научных теорий и гипотез, использованных для описаний различных деталей одной и той же расчетной схемы. Типичным примером может служить несоответствие между моделированием нагрузок сосредоточенными силами и использованием пластинчатых конечных элементов, которые не способны уравновесить сосредоточенное воздействие конечными значениями поперечных сил. Естественно, что те мифические значения поперечной силы в элементе, которые получаются в результате такого расчета, являются следствием указанной нестыковки моделей.

Во-вторых, здесь следует упомянуть приближенность почти всех задаваемых параметров модели, связанную с реально существующими допущениями на размеры, вес и другие измеряемые величины. С практической точки зрения обе упомянутые неточности различаются мало, хотя в первом случае мы имеем дело с ограниченной точностью модельного представления (сознательной или бессознательной), а во втором – с ограниченной точностью «оригинала».

Последнее, о чем нужно упомянуть в рассматриваемой проблеме – это возможные неточности и неопределенности, связанные с отсутствием четких границ у используемых понятий. Этой проблемой в настоящее время интенсивно занимается так называемая теория размытых (нечетких) множеств и нечеткой логики [278]. Имеются примеры использования этой теории в задачах расчета несущих конструкций при оценке их состояния, когда неточны описания имеющихся повреждений [218], и при оптимизации, когда сама целевая функция задана неточно [163].

## 1.4. Эксперимент и практический опыт

Несмотря на то, что в этой книге не рассматриваются вопросы экспериментального исследования работы конструкций, нельзя обойти вниманием эту проблему, в связи с тем, что эксперимент и практический опыт являются средствами проверки теоретического решения, а иногда – и средствами выработки соответствующих расчетных моделей. В натурном или модельном эксперименте обычно решаются следующие задачи:

- обнаружение новых явлений или новых фактов;
- проверка гипотез;
- физическое моделирование с целью установления качественных и количественных значений тех характеристик, которые невозможно определить теоретически.

Проводятся и другие эксперименты, необходимость которых определяется, например, установленной процедурой приемосдаточных испытаний ответственных, нетрадиционных и уникальных объектов, или испытаниями головных образцов серийной продукции. Но, независимо от объявленной цели эксперимента, для перенесения его результатов с единичного явления на другие случаи (воз-

можно, что только на аналогичные, а возможно – и на более далекие) требуется, чтобы в эксперименте решалась хотя бы одна из указанных выше задач.

Обнаружение в эксперименте новых явлений или новых фактов может иметь нелокальный характер лишь в том случае, когда экспериментальное исследование сопровождается тщательно проведенным теоретическим анализом. Именно в сопоставлении экспериментальных данных с теоретическими и можно говорить о новизне обнаруженных эффектов. Если же экспериментальное исследование проводится без руководящей теоретической идеи и служит только для подмены расчетного анализа, то от него нельзя ожидать сколь-нибудь общих выводов. Эксперименты такого рода сводятся к пополнению копилки наблюдательного материала и создают почву для развития эмпиризма, хотя в каждом конкретном случае они могут и быть полезными. Характерным примером могут служить многочисленные усталостные испытания самых разнообразных конструкций. Многие годы они выполняются в исследовательских центрах, связанных с конструированием различного типа машин, но без некоторой фундаментальной теоретической идеи (точнее, предположений, претендовавших на эту роль, было слишком много [211]), и до сих пор это не привело к созданию достаточно обоснованной теории усталостного разрушения.

Накапливаемый экспериментальный материал часто служит основой для проводимого впоследствии научного обобщения. Но далеко не всякое обобщение экспериментальных данных или практического опыта может рассматриваться как научное обобщение. В работе [95] в качестве примера, подтверждающего это, указывается на знаменитую в свое время формулу Сежурне для определения толщины свода каменного моста, не только отразившую коллективный технический опыт, но и учитывавшую личный опыт и психологию строителя по шкале: трусливо, робко, нормально, смело, дерзко. Естественно, что такого рода эмпирическая зависимость не имеет никакого отношения к развитию теории сооружений, и это прекрасно понимал сам Сежурне.

По-видимому, экспериментальные обоснования первоначальной идеализации отдельных элементов сложных конструктивных комплексов можно считать в основном завершенными, по крайней мере для обычных материалов и условий работы. Что же касается экспериментального исследования сложных систем, то здесь чаще всего может идти речь о проверке гипотез, положенных в основу их расчета. И основная задача исследований такого рода состоит в подтверждении (или опровержении) применимости тех расчетных предпосылок, которые были использованы, если только проверяемые результаты надежно получены из этих предпосылок.

Заметим, что для установления границ применимости расчетной модели необходимо оценивать по окончательному результату любые упрощения и аппроксимации, а также отбрасывание малых величин, которые были объявлены малозначительными. Для сложной системы установить оценку такого рода удается редко, и далеко не все гипотезы и упрощения поддаются экспериментальной проверке на натурном объекте или на модели. Но во многих случаях сложная схема допускает расчленение на подсхемы, для которых выполнение экспериментального исследования намного проще. Конечно, сама возможность указанного рас-