

# 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

## **Глава 4. Конечноэлементные модели .....**

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 .....**

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 эф фектов .....	482

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

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. Прогрессирующее 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 переко 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 Кoenig в книге с характерным названием «Ловушки и силки при программировании на языке С» 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 экспериментов, 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

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)