

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет»**

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебно-воспитательной работе

Д.К.Проскурин

« ___ » _____ 2014 г.

**УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДИСЦИПЛИНЫ
«МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ
ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ»**

Направление подготовки –08.05.02 «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей»

Специализация - «Мосты»

Кафедра: проектирования автомобильных дорог и мостов

Регистрационный №: _____ Протокол № _____ от « ___ » _____ 20 14 г.

Разработчик УМКД: доцент Козлов А.В.

Воронеж 2014

СОГЛАСОВАНО:

Заведующий кафедрой разработчика УМКД _____ / Еремин В.Г. /
(подпись) (Ф.И.О.)

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 2014 г.

Заведующий выпускающей кафедрой _____ / Еремин В.Г. /
(подпись) (Ф.И.О.)

Протокол заседания кафедры № _____ от «__» _____ 2014 г.

Председатель Методической комиссии факультета _____ / _____ /
(подпись) (Ф.И.О.)

Протокол заседания Методической комиссии факультета
№ __ от «__» _____ 2014 г.

Начальник учебно-методического управления Воронежского ГАСУ

_____ / Мышовская Л.П. /
(подпись) (Ф.И.О.)

ФОРМА ДОКУМЕНТА О СОСТОЯНИИ УМК ДИСЦИПЛИНЫ

№ п/п	Наименование элемента УМК	Наличие (есть, нет)	Дата утверждения после разработки	Потребность в разработке (обновлении) (есть, нет)
1	Примерная рабочая программа для дисциплин включенных в ГОС	есть		нет
2	Рабочая программа	есть		нет
3	Методические рекомендации для выполнения лабораторных работ	нет	-	есть
4	Методические рекомендации по подготовке к практическим занятиям	нет		есть
5	Методические рекомендации к курсовому проектированию	не предусмотрено учебным планом	-	-
6	Варианты индивидуальных расчетных заданий и методические указания по их выполнению	нет		есть
7	Перечень вопросов, выносимых на зачет	в рабочей программе		нет
8	Перечень экзаменационных вопросов	не предусмотрено учебным планом	-	-
9	Контролирующие материалы по дисциплине:			
	-тесты текущего и остаточного контроля знаний	нет		нет
	-тесты итогового контроля знаний	в рабочей программе		нет
10	Перечень технических средств, программного обеспечения и электронных учебников:			
	- электронные учебники	нет		нет
	-прикладные компьютерные программы и методические указания по использованию прикладных компьютерных программ	есть на электронном носителе (диске)		нет
	- видеоматериалы	есть		нет
	-аудиоматериалы	нет		нет
11	Учебники, учебные пособия, курс лекций, конспект лекций, подготовленные разработчиком УМКД	есть		нет
12	Оригиналы экзаменационных билетов	не предусмотрено учебным планом	-	-
13	Методическое обеспечение самостоятельной работы и рекомендации по изучению дисциплины для студентов	есть		нет

Примерная рабочая программа

В процессе освоения курса моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений студент формирует и демонстрирует следующие общекультурные и общепрофессиональные компетенции:

- владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели, выбору путей ее достижения (ОК-1);
- использование основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применение методов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ПК-1);
- способность выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ПК-2).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать методы моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений;

уметь ставить и решать соответствующие конкретные задачи при моделировании работы несущих конструкций транспортных сооружений;

владеть навыками моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

УТВЕРЖДАЮ

Декан механико-автомобильного
факультета

_____ Еремин В.Г.

« ____ » _____ 2014 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

дисциплины

**«Моделирование работы несущих конструкций транспортных
сооружений»**

Направление подготовки – **08.05.02 «Строительство железных дорог,
мостов и транспортных тоннелей»**

Специализация – **«Мосты»**

Квалификация (степень) выпускника – **специалист**

Нормативный срок обучения – **5 лет**

Форма обучения – **очная**

Автор программы:

Доцент _____ А.В. Козлов

Программа обсуждена на заседании кафедры теоретической механики

« » _____ 201 года, протокол №

Зав. кафедрой к.т.н., профессор _____ В.Г.Еремин

Воронеж – 2014

1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Цели преподавания дисциплины

В учебном плане подготовки инженеров по специальности «Мосты» дисциплина «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» является специальной. В ней изучаются основные принципы составления расчетных схем реальных технических проблем, возникающих при проектировании, строительстве и эксплуатации искусственных сооружений.

Цель преподавания дисциплины – изучение и практическое освоение студентами основных приемов моделирования работы реальных объектов, позволяющих из большого числа параметров, влияющих на напряженно-деформированное состояние выделить основные и создать расчетную схему, которую можно было бы рассчитать по выбранному алгоритму и с помощью имеющихся в наличии средств.

1.2. Задачи освоения дисциплины

Изучив дисциплину, студент должен:

2.1. Иметь представление:

- параметры, определяющие напряженно-деформированное состояние стержневых систем;
- параметры, определяющие напряженно-деформированное состояние пластин;
- основные методы расчета комбинированных (стержневых и пластинчатых) упругих систем на динамические нагрузки;
- основные методы расчета комбинированных (стержневых и пластинчатых) упругих систем на устойчивость;
- принципы моделирования работы континуальных систем с помощью стержневой аппроксимации;
- основные принципы расчета континуальных систем с помощью конечно элементных моделей.

2.2. Уметь:

- выбирать необходимую для решения технической задачи расчетную схему, позволяющую получить наиболее полную информацию, используя алгоритм расчета, доступный для имеющихся в наличии средств вычислительной техники;
- самостоятельно работать с документацией информационных технологий;
- рассчитать пространственную комбинированную систему на действие подвижной нагрузки.

2.3. Иметь опыт:

- о месте дисциплины «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» среди других учебных дисциплин специальности, ее взаимосвязи с ними;
- об основных этапах алгоритма методах конечных элементов;
- о методах оптимизации проектных решений.

2. МЕСТО ДИСЦИПЛИНЫ В СТРУКТУРЕ ООП ВПО

Дисциплина «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» относится к специальной части математического и естественнонаучного цикла. Она обеспечивает логическую связь, во-первых, между физикой и математикой, применяя математический аппарат к описанию и изучению физических явлений, во-вторых, между естественнонаучными и общетехническими дисциплинами.

Требования к входным знаниям, умениям и готовностям обучающегося.

Студент должен знать: физические основы механики, элементы векторной алгебры, аналитической геометрии, дифференциального и интегрального исчисления; владеть навыками решения задач векторной алгебры, дифференциального и интегрального исчисления и уметь применять полученные знания математики к решению задач расчета мостов и тоннелей.

Дисциплина «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» является завершением всех дисциплин профессионального цикла ООП. После изучения материалов курса Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений студент готов обосновать расчетом эффективный вариант проектирования сооружения.

3. ТРЕБОВАНИЯ К РЕЗУЛЬТАТАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В процессе освоения курса моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений студент формирует и демонстрирует следующие общекультурные и общепрофессиональные компетенции:

- владение культурой мышления, способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения (ОК-1);
- использование основных законов естественнонаучных дисциплин в профессиональной деятельности, применение методов математического анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования (ПК-1);
- способность выявить естественнонаучную сущность проблем, возникающих в ходе профессиональной деятельности, привлечь для их решения соответствующий физико-математический аппарат (ПК-2).

В результате освоения дисциплины обучающийся должен:

знать методы моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений;
уметь ставить и решать соответствующие конкретные задачи моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений;

владеть навыками моделирования работы несущих конструкций транспортных сооружений.

4. ОБЪЕМ ДИСЦИПЛИНЫ И ВИДЫ УЧЕБНОЙ РАБОТЫ

Общая трудоемкость дисциплины «Моделирование работы несущих конструкций транспортных сооружений» составляет 1,89 зачетных единиц.

Вид учебной работы	Всего часов	Семестры	
		9	10
Аудиторные занятия (всего)	68	68	-
В том числе:			
Лекции	-	-	-
Лабораторные работы	68	68	-
Общая трудоемкость	часы	68	-
	зачетные единицы	1,89	-

5. СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

5.1 СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

Понятие моделирования конструкций. Расчетная схема. Классификация расчетных схем. Основные условия формирования расчетных схем на различных стадиях расчета.

Моделирование крайних условий. Моделирование реальных нагрузок.

Вопросы для самоконтроля

Что такое расчетная схема?

Как расчетная модель соотносится с реальной конструкцией?

Моделирование как способ снижения размерности технической проблемы.

Моделирование работы сквозных пролетных строений в статически неопределимых системах искусственных сооружений стержневыми элементами со сплошными сечениями. Принципы выбора геометрических характеристик сечений стержневых элементов модели. Способы пересчета от внутренних усилий в сечениях модели к усилиям в стержнях сквозного пролетного строения.

Моделирование работы частей упругой конструкции стержневой системой со специально подобранными параметрами.

Моделирование работы упругого основания набором стержней. Принципы назначения геометрических характеристик стержней модели. Моделирование контакта упругой обделки тоннеля с грунтом упругими односторонне работающими связями.

Моделирование работы пластины, нагруженной в своей плоскости, стержневой перекрестной системой. Принципы назначения геометрических характеристик поперечных сечений стержней модели.

Моделирование изгиба пластин системой перекрестных изгибаемых балок.

Вопросы для самоконтроля

В каких случаях целесообразно моделирование сквозного пролетного строения стержневой системой со сплошным поперечным сечением?

Как моделируется упругий отпор грунта?

Программные модули расчета стержневых систем

Метод сил в матричной форме. Алгоритм Аргираса. Применение программы SETAPR.

Методы перемещений в матричной форме.

Применение алгоритма Аргираса для расчета стержневых систем, работающих на изгиб и кручение.

Метод конечных элементов для расчета стержневых систем, работающих на изгиб и кручение.

Метод конечных элементов для расчета плоских стержневых систем. Программа СОММЕН проф. Н.Н. Шапошникова.

Вопросы для самоконтроля

Какие действия предшествуют расчету стержневой системы в матричной форме?

Какие неизвестные принимаются при расчете стержневой системы методом конечного элемента?

Метод конечных элементов для континуальных систем

Метод конечных элементов как способ моделирования континуальной системы системой с конечным числом степеней свободы.

Матричный алгоритм метода.

Метод конечных элементов для моделирования работы пластины, нагруженной в своей плоскости. Применение треугольных конечных элементов.

Метод конечных элементов для моделирования работы изгибаемых пластин. Применение прямоугольных конечных элементов.

Вопросы для самоконтроля

Какие неизвестные являются основными для треугольных конечных элементов при расчете пластин, нагруженных в своей плоскости?

Как формируется матрица жесткости системы?

Программный комплекс «ЛИРА-САПР»

Основные части ПК «ЛИРА-САПР».

ЛИР-ВИЗОР - графическая среда пользователя. Синтез расчетной схемы и анализ результатов расчета в удобном для пользователя виде. Использование изополей и изолиний параметров напряженно-деформационного состояния.

Система документирования на основе которой пользователь может на экране формировать выбранные им формы таблиц, создавать любой вид текстовой и графической информации, формировать чертежи со всей необходимой атрибутикой (штампы, надписи, примечания) и получить твердые копии на любых типах выводящих устройств.

ВХОДНОЙ ЯЗЫК – задание исходных данных в текстовом режиме. Применение графического визуализатора ПК «ЛИРА-САПР» в случае тупиковой ситуации, когда средства ЛИР-ВИЗОРа оказываются недостаточными, чтобы смоделировать то или иное свойство рассчитываемого объекта.

ЛИР-АРМ – постпроцессор конструктора железобетонных конструкций.

ЛИР-СТК – постпроцессор конструктора стальных конструкций.

ЛИТЕРА – определение эквивалентных напряжений по различным теориям прочности. Теория прочности Мора, Губера-Генки-Мизеса, Ягна-Бужинского, Друккера-Прагера и др. Анализ результатов выданных в табличной форме или в виде изолиний и изополей.

УСТОЙЧИВОСТЬ – определение коэффициентов устойчивости сооружения.

ФУНДАМЕНТ – сбор нагрузок на обрезы фундаментов.

СЕЧЕНИЕ – определение геометрических характеристик для сечений различного профиля.

Вопросы для самоконтроля

Что такое теории прочности?

Как используются понятия «изополе» и «изолиния» при анализе результатов расчета?

Программный комплекс MidasCivil

Расчет напряженно-деформированного состояния при статическом нагружении. Моделирование различных типов материалов. Определение собственных частот и форм колебаний. Анализ устойчивости упругих систем.

Оптимизация конструкции с неограниченными изменениями ее геометрической формы при минимизации веса. Технология суперэлементов.

Вопросы для самоконтроля

Перечислите основные модели типов материалов.

Алгоритм определения собственных форм и частот колебаний.

5.2. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

1. Методы подготовки данных для статического расчета пространственной системы с помощью программного комплекса Лира-САПР
2. Способы выдачи результатов расчетов сооружений с помощью программного комплекса Лира-САПР

5.3. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Не предусмотрено

6. ОЦЕНОЧНЫЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ УСПЕВАЕМОСТИ, ПРОМЕЖУТОЧНОЙ АТТЕСТАЦИИ ПО ИТОГАМ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

6.1. Вопросы для подготовки к зачету в 9-м семестре

1. Что такое расчетная схема?
2. Как расчетная модель соотносится с реальной конструкцией?
3. В каких случаях целесообразно моделирование сквозного пролетного строения стержневой системой со сплошным поперечным сечением?
4. Как моделируется упругий отпор грунта?
5. Какие действия предшествуют расчету стержневой системы в матричной форме?
6. Какие неизвестные принимаются при расчете стержневой системы методом конечного элемента?
7. Какие неизвестные являются основными для треугольных конечных элементов при расчете пластин, нагруженных в своей плоскости?
8. Как формируется матрица жесткости системы?
9. Что такое теории прочности?
10. Как используются понятия «изополе» и «изолиния» при анализе результатов расчета?
11. Перечислите основные модели типов материалов.
12. Алгоритм определения собственных форм и частот колебаний.
13. Технология суперэлементов.
14. Оптимизация конструкции с неограниченными изменениями ее геометрической формы при минимизации веса.
15. Матричный алгоритм метода.
16. Метод конечных элементов для моделирования работы пластины, нагруженной в своей плоскости. Применение треугольных конечных элементов.
17. Метод конечных элементов для моделирования работы изгибаемых пластин. Применение прямоугольных конечных элементов.
18. Моделирование работы пластины, нагруженной в своей плоскости, стержневой перекрестной системой

19. Понятие моделирования конструкций.
20. Классификация расчетных схем.
21. Моделирование краевых условий.
22. Моделирование реальных нагрузок.

7. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ И ИНФОРМАЦИОННОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

7.1. Основная литература

1. Городецкий Д.А., Барабаш М.С. и др. Программный комплекс ЛИРА-САПР 2014. Руководство пользователя. –М.: Электронное издание, 2014. – 324 с.
2. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций – К.: Факт, 2007. – 394 с.
3. Барабаш М.С. и др. Современные технологии расчета и проектирования металлических и деревянных конструкций. –М.: Издательство АСВ, 2008. – 328 с.
4. Барабаш М.С. Программные комплексы САПФИР и ЛИРА-САПР – основа отечественных ВМ-технологий: монография. М.: издательство Юрайт, 2013 – 366 с.

7.2.Дополнительная литература

1. Шапиро Д.М. Теория и расчетные модели оснований и объектов геотехники. – Воронеж, ИПЦ «Научная книга», 2012. – 164 с.
2. Макаров Е.Г. Соппротивление материалов на базе Mathcad. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 512 с.
3. Корнеев М.М. Стальные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов. – К.: издательство «Академпресс», 2010 – Т.1. – 532 с.
4. Корнеев М.М. Стальные мосты: теоретическое и практическое пособие по проектированию мостов. – К.: издательство «Академпресс», 2010 – Т.2. – 490 с.

7.3.Учебно-методическое обеспечение в электронном виде и Интернет-ресурсы

radm.pro – сайт о проектировании автодорожных мостов. А.В.Козлов, 2014.

8. МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Поточные лекционные аудитории, оснащенные современными техническими средствами обучения (ТСО). Компьютерные классы.

9. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОРГАНИЗАЦИИ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

В качестве основной используется традиционная технология изучения материала, предполагающая живое общение преподавателя и студента. Все виды деятельности студента должны быть обеспечены доступом к учебно-методическим материалам (учебникам,

учебным пособиям, методическими указаниями к выполнению расчетно-графических работ). Учебные материалы должны быть доступны в печатном виде и, кроме того, могут быть представлены в электронном варианте и представляться на CD и (или) размещаться на сайте учебного заведения.

Курс разделен на три традиционных раздела – статика, кинематика и динамика, каждый из которых, в свою очередь, разделяется на модули, соответствующие основным разделам дисциплины. В середине изучения каждого раздела в аудитории проводится самостоятельная работа по индивидуальным вариантам.

В процессе самостоятельной работы студент закрепляет полученные знания и навыки, выполняя домашние задания по каждой теме модуля. В качестве итогового контроля предусмотрены зачеты в конце 7 и 8 семестра по вопросам, содержащим задания по всем разделам курса расчета мостов и тоннелей.

Программа составлена в соответствии с требованиями ФГОС ВПО с учетом рекомендаций и ПрООП ВПО по направлению подготовки 271501.65– «Строительство железных дорог, мостов и транспортных тоннелей», специализация «Мосты».

Руководитель основной образовательной программы

_____ (занимаемая должность, ученая степень и звание) _____ (подпись) _____ (инициалы, фамилия)

Рабочая программа одобрена учебно-методической комиссией **механико-автомобильного факультета**

« ____ » _____ 201 г., протокол № _____ .

Председатель _____ (ученая степень, звание) _____ (подпись) _____ (инициалы, фамилия)

Эксперт

_____ (место работы) _____ (занимаемая должность) _____ (подпись) _____ (инициалы, фамилия)

Конспект лекций

Введение

Программный комплекс ЛИРА-САПР (ПК ЛИРА-САПР) - это многофункциональный программный комплекс для расчета, исследования и проектирования конструкций различного назначения.

ПК ЛИРА-САПР с успехом применяется в расчетах объектов строительства, машиностроения, мостостроения, атомной энергетики, нефтедобывающей промышленности и во многих других сферах, где актуальны методы строительной механики.

Программные комплексы семейства ЛИРА имеют более чем 50-летнюю историю создания, развития и применения в научных исследованиях и практике проектирования конструкций. Программные комплексы семейства ЛИРА-САПР непрерывно совершенствуются и приспособляются к новым операционным системам и графическим средам. Новейшим представителем семейства ЛИРА-САПР является ПК ЛИРА-САПР 2014.

Кроме общего расчета модели объекта на все возможные виды статических нагрузок, температурных, деформационных и динамических воздействий (ветер с учетом пульсации, сейсмические воздействия и т.п.) ПК ЛИРА автоматизирует ряд процессов проектирования: определение расчетных сочетаний нагрузок и усилий, назначение конструктивных элементов, подбор и проверка сечений стальных и железобетонных конструкций с формированием эскизов рабочих чертежей колонн и балок.

ПК ЛИРА позволяет исследовать общую устойчивость рассчитываемой модели, проверить прочность сечений элементов по различным теориям разрушений.

ПК ЛИРА состоит из нескольких взаимосвязанных информационных систем.

Система ЛИР-ВИЗОР - это единая графическая среда, которая располагает обширным набором возможностей и функций:

для формирования адекватных конечно-элементных и суперэлементных моделей рассчитываемых объектов,

для подробного визуального анализа и корректировки созданных моделей,

для задания физико-механических свойств материалов, связей, разнообразных нагрузок, характеристик различных динамических воздействий, а также взаимосвязей между загрузками при определении их наиболее опасных сочетаний.

Возможности, предоставляемые по результатам расчета при отображении напряженно-деформированного состояния объекта, позволяют произвести детальный анализ полученных данных

-по изополям перемещений и напряжений,

-по эпюрам усилий и прогибов,

-по мозаикам разрушения элементов,

-по главным и эквивалентным напряжениям

и по многим другим параметрам.

Система СЕЧЕНИЕ позволяет в специализированной графической среде сформировать сечения произвольной конфигурации, вычислить их осевые, изгибные, крутильные и сдвиговые характеристики. Кроме того, предоставляется возможность вычисления секториальных характеристик сечений, координат центров изгиба и кручения, моментов сопротивления, а также определения формы ядра сечения. При наличии усилий в заданном сечении производится отображение картины распределения текущих, главных и эквивалентных напряжений, соответствующих различным теориям прочности.

РАСЧЕТНЫЙ ПРОЦЕССОР реализует современные усовершенствованные методы решения систем уравнений, обладающие высоким быстродействием и позволяющие решать системы с очень большим числом неизвестных.

В расчетном процессоре содержится обширная БИБЛИОТЕКА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, которая позволяет создавать адекватные расчетные модели практически без ограничений на реальные свойства рассчитываемых объектов. При этом возможны задание линейных и нелинейных законов деформирования материалов, учет геометрической

нелинейности с нахождением формы изначально изменяемых систем, а также учет конструктивной нелинейности. Реализованы законы деформирования различных классов железобетона. При расчетах нелинейных задач производится автоматический выбор шага нагружения с учетом его истории. Возможности процессора позволяют смоделировать поведение сооружения в процессе возведения при многократном изменении расчетной схемы.

Система УСТОЙЧИВОСТЬ дает возможность произвести проверку общей устойчивости рассчитываемого сооружения с определением коэффициента запаса и формы потери устойчивости.

Система ЛИТЕРА реализует вычисление главных и эквивалентных напряжений по различным теориям прочности.

Система ФРАГМЕНТ позволяет определить силы воздействия одного фрагмента рассчитываемого сооружения на другой как нагрузку. В частности, могут быть определены нагрузки, передаваемые наземной частью расчетной схемы на фундаменты.

Конструирующая система ЛИР-АРМ реализует подбор площадей сечения арматуры колонн, балок, плит и оболочек по первому и второму предельным состояниям в соответствии с действующими в мире нормативами. Существует возможность задания произвольных характеристик бетона и арматуры, что имеет большое значение при расчетах, связанных с реконструкцией сооружений. Система позволяет объединять несколько однотипных элементов в конструктивный элемент, что позволяет производить увязку арматуры по длине всего конструктивного элемента. Система может функционировать в локальном режиме, осуществляя как подбор арматуры, так и проверку заданного армирования для одного элемента. По результатам расчета формируются чертежи балок и колонн, а также создаются dxf-файлы чертежей.

Конструирующая система ЛИР-СТК работает в двух режимах -подбора сечений элементов стальных конструкций, таких как фермы, колонны и балки, и проверки заданных сечений в соответствии с действующими в мире нормативами. Допускается объединение нескольких однотипных элементов в конструктивный элемент. Система может функционировать в локальном режиме, позволяя проверить несколько вариантов при конструировании требуемого элемента.

Система СОРТАМЕНТ, которая информационно связана с ЛИР-СТК, позволяет производить редактирование используемой сортаментной базы прокатных и сварных профилей.

Система ДОКУМЕНТАТОР предназначена для формирования отчетов по результатам работы с комплексом. При этом вся информация может быть представлена как в табличном, так и в графическом виде. Табличный и графический разделы необходимой для отчета информации могут быть размещены совместно на специально организуемых для этой цели листах и снабжены комментариями и надписями. Кроме того, табличная информация может быть передана в MicrosoftExcel, а графическая - в MicrosoftWord. Реализован вывод таблиц в формате HTML.

ПК ЛИРА поддерживает информационную связь с другими широко распространенными САД-системами, такими как AutoCAD, ArchiCAD, HyperSteel, Allplan, ФОК-ПК и др.

ПК ЛИРА располагает широкой системой контекстной справки, содержащей полную информацию обо всех компонентах комплекса, правилах и порядке работы с ними.

ЛЕКЦИЯ № 1

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ ТЕХНОЛОГИИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

1. Программные комплексы МКЭ. Основные свойства

Метод конечных элементов (МКЭ), как прямой численный метод для решения задач механики твердых деформируемых тел, сразу привлек к себе внимание специалистов универсальностью подхода к построению математической модели, в особенности к формулировке граничных условий. Бурное развитие вычислительной техники в последние десятилетия стимулировало развитие метода, что позволило распространить его на задачи различных классов. На современном этапе МКЭ является мощным инструментом для решения задач математической физики, почти вытеснившим из практики расчетов остальные методы.

Применение МКЭ для решения тех или иных задач немислимо без программных продуктов, выполняющих большой объем вычислительной работы. В начальный период реализация теории МКЭ потребовала решения ряда сложных численных задач, на что были потрачены значительные интеллектуальные ресурсы. Желание сделать полученные результаты доступными в последующем, с одной стороны, и универсальность алгоритмов МКЭ, с другой, привели к тому, что математическое обеспечение метода приобрело вид программных комплексов. Они относятся к категории так называемых САЕ (ComputerAidedEngineering) продуктов. Если переводить дословно, то название этой категории программных продуктов будет звучать, как «Вспомогательные вычислительные средства для инженерных расчетов». К настоящему времени в мире разработаны десятки (если не сотни) таких программных продуктов, и они продолжают появляться, хотя поток новых разработок уменьшается, а усилия концентрируются в направлении совершенствования существующих. Программные продукты различаются по ряду признаков: количеству классов решаемых задач; объему задачи внутри каждого класса; ориентированности на отрасль или проблему; географии предполагаемого использования; целям, с которыми эти продукты создавались; составу библиотеки конечных элементов; степени проработанности интерфейса пользователя; степени проработанности интерфейса с другими программными продуктами этой же или других категорий; объему и качеству необходимых ресурсов; операционной среде; стоимости и т. п. В понятие «интерфейс» будем включать систему соглашений и диалоговых, программных и других средств, обеспечивающих взаимодействие и передачу информации между двумя объектами. Если речь идет об интерфейсе пользователя, то одним объектом является человек, а другой - эксплуатируемый этим человеком про-граммный продукт. Если речь идет об интерфейсе с другими программными продуктами, то оба объекта являются этими продуктами.

Между комплексами существуют и более глубокие различия, а именно: по степени проработанности алгоритмов, а, следовательно, по степени достоверности результатов, по подходам и методам реализации, по степени открытости архитектуры и базы данных, по качеству сопровождения комплекса разработчиком, по времени эксплуатации комплекса участниками рынка и т.п.

Решение вопросов, связанных с технологией использования программного продукта, начинается с его выбора. Поэтому важно проанализировать признаки, по которым различаются эти продукты, и выяснить их соответствие решаемым задачам. В связи с этим некоторые из упомянутых признаков требуют комментариев. Так, ориентированность на конкретную отрасль предполагает, например, представление результатов расчета в определенных формах, принятых в данной отрасли, или наличие специальных решений в интерфейсе для представленных результатов в таких формах. Часто привязанные к отрасли комплексы включают в себя дополнения, как правило, в области конструирования, позволяющие выполнять дополнительные работы по сравнению с обычными для МКЭ, например подбор сечений. Ориентированные на проблему комплексы включают специальные средства для решения этой задачи, например, для решения физически нелинейных задач могут потребоваться мало распространенные модели материалов, а для геометрически нелинейных - особые алгоритмы.

География предполагаемого использования вместе с ориентированностью на отрасль определяет привязанность вышеупомянутых дополнительных частей комплекса для конструирования к тем или иным нормам проектирования. Цели создания продукта могут существенно влиять на его свойства. Если, например, комплекс создавался для специалистов в области расчетов, он обладает всей полнотой средств в этой области. Если комплекс создавался для проектировщиков высокого организационного уровня, типа главного инженера проекта в строительстве, для предварительной и ускоренной проработки идей, то он имеет облегченную форму, причем, как правило, на уровне интерфейса пользователя.

Часто цели создания определяют более или менее богатую «библиотеку конечных элементов», которая является аналогом таблицы метода перемещений для стержневых систем. Состав библиотеки КЭ показывает, в частности, какие типы систем могут рассчитываться с применением комплекса, например: стержневые, пластинчатые, складчатые, оболочечные, массивные. Он также показывает, какие классы задач могут решаться с применением комплекса, например: одномерные, двумерные, трехмерные или линейные и нелинейные (и какие именно - физически, геометрически, конструктивно нелинейные), или однородные и неоднородные (например, многослойные) и т.д. Насыщенность библиотеки определяется в первую очередь научным потенциалом фирмы-разработчика.

Степень проработанности интерфейса пользователя определяет возможность более тщательной или более быстрой подготовки модели и анализа результатов. Обсуждая интерфейс пользователя, уместно упомянуть о наличии упрощенных языков программирования, позволяющих дополнять стандартные средства описания конкретных задач и представления результатов относительно небольшими процедурами пользователя, которые восполняют недостатки этих средств. Иногда таких языков бывает несколько в одном комплексе. Степень проработанности интерфейса с другими программными продуктами категории САЕ определяет возможность решать одну и ту же задачу с помощью разных программных продуктов, если в процессе решения осознается потребность в более мощных средствах. Наличие интерфейса с другими программными продуктами категории САЕ (ComputerAidedDesign) определяет возможность импортировать из них геометрическую модель объекта, что уменьшает срок подготовки исходных данных. Если переводить дословно, то название этой категории программных продуктов будет звучать, как «Вспомогательные вычислительные средства для проектирования». Отметим, что обе категории (САЕ и САЕ) программных продуктов входят в состав систем, которые в России принято называть системами автоматизированного проектирования (САПР).

Подходы к реализации задачи определяют прогрессивность технологии использования комплекса. Например, в наиболее совершенных продуктах предусматривается так называемая кластерная технология решения задач, основанная на распараллеливании процесса решения и использовании многопроцессорных устройств, распределенных по высокоскоростной сети. Подобные подходы позволяют предоставлять ресурсы для решения задач даже через ИНТЕРНЕТ, если у пользователя наблюдается дефицит таких ресурсов.

Открытость архитектуры и базы данных определяет возможность дополнения комплекса пользовательскими приложениями, в которых нередко возникает потребность. Кроме того, открытость архитектуры и базы данных косвенно говорит об их продуманности.

Степень сопровождения комплекса разработчиком является одним из признаков, который позволяет оценить степень серьезности намерений фирмы. Как правило, в менее мощных разработках страдает качество документации, хуже отработано взаимодействие с пользователями, система обучения невысокого уровня или отсутствует совсем, менее оперативно исправляются ошибки и вводятся в эксплуатацию доработанные версии. Время эксплуатации комплекса на рынке программных продуктов является интегральной оценкой жизнеспособности фирмы-разработчика. Естественно, что при прочих равных условиях предпочтение следует отдавать продукту с более длинной историей эксплуатации.

Несомненно, существуют и другие признаки, отличающие программные комплексы друг от друга и характеризующие их с разных сторон, но ограничимся сказанным выше, считая, что информация достаточна для первоначального представления о свойствах разработок. С другой стороны, существуют некоторые общие вопросы технологии использования комплексов.

Прежде чем переходить к рассмотрению указанных вопросов, назовем некоторые разработки, находящие применение на мировом и отечественном рынках. Начать следует, несомненно, с продуктов фирмы MSC.SoftwareCorporation, известных под общим названием MSC.visualNASTRAN. Эта среда превосходит своих конкурентов по широте охвата задач, глубине их проработки и другим признакам и, как следствие, по степени распространенности среди ведущих фирм всех отраслей, использующих МКЭ в процессе проектирования. Другая известная среда создана и поддерживается фирмой ANSYS Incorporated под общим названием ANSYS Inc. Products. Обе эти среды были вызваны к жизни потребностями машиностроительной, автомобильной, авиационной, космической отраслей, поэтому ориентированы в основном на эти области, но в последние годы сфера их применения все больше распространяется на другие отрасли - от строительства до медицины. Одной из характерных черт названных продуктов является возможность решения различных задач: механики твердых деформируемых тел, механики жидкости и газа, теплопроводности, электромагнетизма, а также взаимодействия этих явлений.

Из менее глобальных разработок общего назначения можно назвать ADINA, SUP, COSMOS. Хорошо известны в мире комплексы ABAQUS и MARC, ориентированные на решение задач высокой степени нелинейности и быстротекущие процессы. Отметим, что несколько лет назад MARC вошел в состав MSC. visualNASTRAN и называется теперь MSC. MARC. Из более узко ориентированных продуктов отметим комплекс CAN, разработанный «Инженерным центром прочности» Министерства атомной энергетики России, который используется для расчета конструкций атомной энергетики и смежных отраслей, в частности химического и нефтехимического машиностроения, судостроения, приборостроения, аэрокосмической промышленности. Комплекс PLAXIS (штаб-квартира в Голландии) узко ориентирован на решение задач механики грунтов, причем при достаточно серьезной постановке его интерфейс рассчитан на инженеров-проектировщиков. Из российских аналогов можно привести продукт FEMmodels, предлагаемый Санкт Петербургской фирмой Геореконструкция, который наряду с дружественным интерфейсом для инженера-проектировщика обладает специальными средствами для пользовательских разработок, к том числе и моделей конечных элементов и произвольным числом степеней свободы в узле.

Из комплексов, применяемых при проектировании сооружений и строительных конструкций, укажем известный в Европе MicroFe, причем в его создании и сопровождении участвует российская сторона. Продукты украинских разработчиков LIRA и SCAD также ориентированы на строительство и так же, как MicroFe активно эксплуатируются в российских проектных организациях. Важным достоинством всех трех разработок является наличие блоков конструирования, привязанных как к европейским, так и к российским нормам. Недавно появившийся на российском рынке комплекс ROBOT Millennium французско-польской фирмы RoboBAT так же ориентирован на строительство, как и три последние продукта. Но в отличие от них он обеспечен адекватными современным условиям методами решения систем уравнений, более близким к проектировщику интерфейса пользователя, привязкой к большинству европейских и американских норм проектирования, более развитой конструкторской частью. Недостатком является неполная пока привязка к российским нормам проектирования.

Как уже отмечалось выше, существует еще много программных продуктов перечислить которые в настоящем разделе не представляется возможным, что вовсе не означает их недооценки авторами учебника.

2. Программные комплексы МКЭ. Некоторые вопросы применения и направления развития

Рассмотрим некоторые вопросы применения обсуждаемой категории программных продуктов, важные с точки зрения потенциальных пользователей.

Состав комплекса все чаще дополняется подсистемами, более полезными проектировщику, причем наблюдается тенденция охвата всех этапов процесса создания объекта: замысел - проектирование - изготовление. Следует правильно представлять место программного обеспечения на всех этапах: оно призвано помочь специалистам сделать каждый этап создания и жизненного цикла объекта более эффективным, т.е. сократить продолжительность этапов создания и улучшить качество изделия, по возможности уменьшая затраты на реализацию каждого этапа. К сожалению, кажущаяся простота разработки модели объекта с помощью современных интерфейсов пользователя порождает у некоторых категорий участников процесса проектирования впечатление, что на том или ином этапе можно обойтись без специалиста в каждой конкретной области. Им, например, кажется, что решать задачи механики деформируемых твердых тел, строительной механики, механики грунтов, аэрогидроупругости и т.д. могут лица, освоившие не указанные области знаний и приложив к ним МКЭ, а формальные приемы подготовки исходных данных. Подобные заблуждения приводят к получению недостоверных данных о поведении объекта для собственно проектирования со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Одним из приемов, увеличивающим достоверность получаемой информации, является решение одной и той же задачи с использованием разных программных продуктов. При этом желательно выполнять процесс решения «в две руки», т.е. силами разных лиц или даже групп лиц. Именно так и поступают в организациях, где качество изделия действительно определяется степенью достоверности результатов расчетов. Обычно это бывает в тех случаях, когда при решении поставленной задачи по созданию изделия проектировщики вынуждены выходить за рамки существующих отраслевых норм проектирования и рассчитывать только на квалификацию коллектива, выполняющего работу. Будущий инженер должен понимать, что рано или поздно такой момент наступает, и ответственность приходится брать на себя. Представляется, что на этом можно завершить обсуждение вопросов технологии использования комплексов, хотя перечень тем для рассмотрения в действительности далеко не исчерпан, но выходит за рамки учебника. Более подробно эти вопросы следует изучать по специальной литературе, в первую очередь по документации, представленной разработчиком в рамках сопровождения комплекса.

Переходя к обсуждению тенденций в развитии комплексов, можно отметить возрастание порядков решаемых в задачах систем уравнений. Этот показатель достиг в 2002 году значения 108 в наиболее мощных разработках. Но даже в гораздо менее громоздких комплексах значение 100-300 тысяч неизвестных считается нормой. Решение систем уравнений таких порядков стало возможным с применением итерационных и комбинированных методов, в частности, широкое распространение получило совмещение процесса так называемого предобуславливания по методу Холецкого с последующим итерационным процессом. Эти методы и МКЭ допускают распараллеливание процесса вычислений, что также позволяет повысить скорость решения и порядок системы.

Все большее внимание в составах комплексов уделяется задачам взаимодействия явлений различной физической природы, например аэрогидроупругости, термоупругости, магнитоупругости. Широко распространены задачи взаимодействия объектов, укладываемых в одно и то же явление, но обладающих существенно разными свойствами. Примерами являются задачи взаимодействия сооружения с основанием или с окружающей средой, если речь идет о подземном сооружении. Комплекс считается неполным, если он не позволяет решать нелинейные и динамические задачи хотя бы частных типов. Например, задача взаимодействия сооружения с окружающей средой часто ставится как задача контактного взаимодействия, фактически как конструктивно нелинейная.

Большое значение в составе комплекса придается подсистемам оптимизации объекта по различным критериям. Все чаще ставится вопрос о решении задач целиком в вероятностной постановке, хотя примеры реализации таких подсистем авторам неизвестны. Можно считать осознанной потребностью в обеспечении комплексов МКЭ различными вспомогательными базами данных: о свойствах материалов, о геометрических характеристиках сечений типовых изделий металлопроката и не только его, о значениях критериев и о коэффициентах надежности в условиях оценки различных свойств системы и т. п. Многие разработки в своем составе имеют такие сведения, но различие состоит в степени обеспеченности их необходимой информацией и в ее качестве. Например, база данных о свойствах материалов фирмы MSC. SoftwareCorporation очень интересуют многие организации; она поставляется в виде подсистемы в составе MSC. visualNASTRAN за дополнительную плату.

ЛЕКЦИЯ № 2

Программные комплексы МКЭ. Общие понятия о структуре

Обсудив основные тенденции в развитии комплексов программ, основывающихся на МКЭ, попытаемся создать представление о типовой структуре комплекса по нескольким признакам. В перечне типов решаемых задач строительной механики, как правило, присутствуют:

- линейный статический расчет;
- определение частот и форм собственных колебаний;
- определение значения критического параметра нагрузки в задаче о потере устойчивости равновесия в линейной постановке;
- расчет вынужденных колебаний, иногда частного вида, например гармонических;
- построение амплитудно-частотной характеристики;
- нелинейный статический расчет с ограниченным набором нелинейностей частного вида, например физическая - пластичность; геометрическая - расчет по деформируемой схеме при малых перемещениях; конструктивная - расчет системы с отключающимися связями.

Управляющая оболочка
Постпроцессор
Дополнительные подсистемы
Препроцессор
Решатель

С организационной точки зрения комплекс МКЭ можно упрощенно представить в виде схемы, показанной на рис. 1. Части комплекса функционируют под управлением программы верхнего уровня, названной на схеме управляющей оболочкой и являющейся посредником между пользователем и основными частями комплекса. Она по указанию пользователя осуществляет инициализацию и завершение сеанса работы с комплексом, инициализацию его частей и передачу управления между ними.

Препроцессор - система средств, позволяющих выполнить разработку и описание математической модели объекта. Решатель - система средств, позволяющих сформировать (в соответствии с выполненным ранее описанием) и реализовать математическую модель объекта, т. е. вычислить основные и вспомогательные параметры, определяющие поведение модели.

Постпроцессор - система средств, позволяющих выполнить визуализацию полученных результатов в различных формах, способствующих эффективному их анализу. Дополнительные подсистемы, как правило, позволяют выполнить работу, не связанную буквально с применением МКЭ, а являющуюся процессом переработки информации, полученной в результате применения МКЭ с целью создания проекта объекта. Вспомогательные базы данных (о свойствах материалов и т. п.) обсуждались выше.

В современных условиях все части комплекса, за исключением решателя, работают в интерактивном режиме. Под интерактивным будем понимать процесс взаимодействия человека с программным продуктом в условиях постоянного обмена информацией в обоих направлениях в реальном масштабе времени. Как правило, такой процесс предполагает принятие решений, без которых невозможно выполнение поставленной задачи. Пользователю следует представлять, что препроцессор, преобразуя директивы пользователя и используя информацию вспомогательных баз данных, как правило, готовит описание модели на языке низкого уровня, который может воспринимать решатель. В таком случае говорят, что информация представлена во внешнем формате, являющемся свернутой формой описания модели. Можно составить описание модели на этом языке без применения препроцессора, что значительно более трудоемко и менее надежно. Укороченное описание преобразуется решателем в значительно более обширный внутренний формат, содержание которого составляет часть основной базы данных задачи. Затем решатель перерабатывает эту информацию в соответствии с процедурой МКЭ в результаты, которые составляют еще одну часть основной базы данных задачи. Препроцессор, как правило, пользуется обеими выше указанными частями базы данных задачи и вспомогательными базами данных комплекса, чтобы на основании директив пользователя представить результаты в более легко воспринимаемой человеком форме. Дополнительные подсистемы, как правило, ведут себя аналогично постпроцессору в части использования информации, т.е. берут, содержащееся в основной базе данных задачи во внутреннем формате и вспомогательных баз данных комплекса в качестве исходных данных. Далее эта информация перерабатывается дополнительными подсистемами в элементы проекта (форму и размеры сечений, параметры армирования, ответы на вопросы о выполнении условий прочности, жесткости, устойчивости и т.п.).

Программные комплексы МКЭ. Представление о библиотеке конечных элементов

Создав у читателя некоторое представление о свойствах и структуре конечно-элементного комплекса, остановимся отдельно на содержании библиотеки конечных элементов. Как уже отмечалось выше, эта библиотека является в МКЭ аналогом таблицы метода перемещений для стержневых систем. Не представляя ее содержания, нельзя подготовить модель для решения задачи. Состав библиотеки КЭ определяется типами систем и задач, на решение которых ориентирован комплекс. Так, можно указать примерный типовой набор конечных элементов, характерный для решения задач строительной механики и присутствующий почти в любой разработке, предназначенной для указанной области. Следует иметь в виду, что содержание библиотеки КЭ в принципе не ограничивается никакими обстоятельствами объективного характера и поэтому имеет особенности в каждом конкретном случае.

Чтобы будущий инженер мог легче ориентироваться в составах библиотек различных комплексов, обсудим типовой состав библиотеки, сгруппировав конечные элементы в семейства для облегчения восприятия информации. Семейство элементов служит для представления элементов расчетной схемы сооружения, которая, как известно, состоит из стержней, пластин, оболочек, массивов или их комбинаций, соединенных между собой определенным образом. Иногда в расчетной схеме присутствуют некоторые специальные модели сред, отличные от вышеуказанных, например, полубесконечное основание или бесконечная область, с которыми взаимодействует сооружение.

Прежде чем приступать к рассмотрению представителей различных семейств, остановимся на двух обстоятельствах, общих для всех типов конечных элементов. Во-первых, с каждым конечным элементом библиотеки связываются наборы параметров, определяющих его напряженно-деформированное состояние, которые принято обозначать определением «местный». Например, местная система координат, совокупность местных степеней свободы в узле, местные внутренние усилия (напряжения) в точках конечного

элемента и т. д. При описании каждого элемента библиотеки обычно пользуются информацией, относящейся именно к «местным» категориям. Во-вторых, в типовые совокупности свойств не включены линейные размеры элементов, а именно: для стержневых элементов не указывается их длина, для двумерных - их длина и ширина, для трехмерных - их длина, ширина и высота. Эта информация восстанавливается по координатам узлов конечных элементов.

Семейство стержневых конечных элементов в большинстве случаев представлено несколькими типами. Во-первых, двухузловым прямолинейным стержнем постоянного сечения с одной местной линейной степенью свободы в каждом узле - линейным перемещением, ориентированным вдоль оси стержня: (рис. 2,а). Поскольку он испытывает только один вид деформации, а именно: растяжение-сжатие, то в типовом наборе геометрических характеристик присутствует только один параметр: площадь A сечения стержня плоскостью, перпендикулярной его оси. Результатом вычислений, кроме перемещений узлов для него, является значение продольной силы. Как правило, этот элемент может не только в одномерных расчетных схемах, но и в плоских, и в пространственных.

Во-вторых, двухузловым прямолинейным стержневым элементом для плоских расчетных схем с тремя степенями свободы в узле: двумя линейными и одной угловой (рис. 2,б). Местная система координат привязывается к главным плоскостям инерции сечения. В конечном элементе учитываются три вида деформаций: растяжение-сжатие, изгиб и сдвиг в плоскости изгиба. Соответственно в типовом наборе геометрических характеристик присутствуют: площадь поперечного сечения A , осевой момент инерции J_z , коэффициент k_Y , учитывающий неравномерность распределения касательных напряжений по высоте сечения. Результатом вычислений для этого элемента являются линейные и угловые перемещения, а также значения продольной и поперечной сил и изгибающего момента в каждом из двух узлов.

Аналогом предыдущего конечного элемента для пространственных расчетных схем является двухузловой прямолинейный стержневой элемент постоянного поперечного сечения с шестью степенями свободы в узле: тремя линейными и тремя угловыми (рис. 2,в). Местная система координат привязывается к главным плоскостям инерции сечения. В конечном элементе учитываются шесть видов стержневых деформаций: растяжение-сжатие, изгиб в двух плоскостях, сдвиг в двух плоскостях изгиба, кручение. Соответственно, в типовом наборе геометрических характеристик в простейшем случае присутствуют: площадь поперечного сечения A , осевые моменты инерции J_y , J_z , коэффициенты сдвига $k_x k_y$, момент инерции при кручении J_x . В качестве результата для него вычисляются линейные и угловые перемещения, а также значения продольной и двух поперечных сил, двух изгибающих моментов и крутящего момента в каждом из двух узлов. Примеры возможных распределенных внешних силовых воздействий на стержни показаны на рис. 2, а-в.

Семейство для моделирования пластин обычно также представлено несколькими типами конечных элементов. Простейшими из них являются элементы для плоских расчетных схем с нагрузкой в плоскости пластины. Они имеют формы четырехугольника и треугольника с двумя степенями свободы в узле: линейными перемещениями в плоскости пластины (рис. 3,а,б). Угловое перемещение в плоскости пластины, как правило, отсутствует в соответствии с наиболее распространенной постановкой плоской задачи теории упругости, хотя существуют модели КЭ, в которых угловая степень свободы участвует в формировании напряженного состояния. Четырехугольные элементы допускают незначительное искажение прямого угла, и оба типа - небольшое отличие отношения длин сторон от единицы. Оба типа допускают небольшое отличие толщин в узлах.

В простейшем случае набор задаваемых типовых геометрических характеристик состоит из толщин пластин в узлах элемента: $\langle t_1 \rangle$, $\langle t_2 \rangle$, $\langle t_3 \rangle$, $\langle t_4 \rangle$. Примером возможного распределенного внешнего силового воздействия на элемент является линейно распределенная по поверхности нагрузка в срединной поверхности. В качестве результатов

вычисляются перемещения узлов и компоненты $\langle \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy} \rangle$ тензора напряжений в центральной точке КЭ или соответствующие значения интенсивностей усилий N_x, N_y, N_{xy} в этой точке, ориентированные в плоскости КЭ, в местной системе координат. Дополнительно компоненты тензора напряжений могут преобразовываться к главным направлениям и к эквивалентным напряжениям по какой-либо теории прочности.

Элементы для плоских расчетных схем с нагрузкой нормальной плоскости пластины также имеют формы четырехугольника и треугольника, но уже с тремя степенями свободы в узле: линейным перемещением нормально плоскости пластины и двумя угловыми (рис. 3, в, г). Четырехугольные элементы допускают незначительное искажение прямого угла, и оба типа - небольшое отличие отношения длин сторон от единицы. Оба типа допускают небольшое отличие толщин в узлах. В простейшем случае набор задаваемых типовых геометрических характеристик состоит из толщин пластин в узлах элемента: $\langle h_x, h_y, h_{xy} \rangle$. Примером возможного распределенного внешнего силового воздействия на элемент является линейно распределенная по поверхности нагрузка, нормальная срединной плоскости. В качестве результатов вычисляются прогибы и углы поворота, а также компоненты $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ тензора напряжений в центральной точке КЭ верхней и нижней плоскостях пластины и (или) соответствующие значения интенсивностей усилий в этой точке $M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$ в местной системе координат. Дополнительно компоненты тензора напряжений могут преобразовываться к главным направлениям и к эквивалентным напряжениям по какой-либо теории прочности.

Существуют расчетные схемы, в которых пластины произвольно ориентированы друг относительно друга в пространстве - так называемые складчатые системы. Для моделирования подобных систем семейство КЭ дополняется конечными элементами, испытывающими деформации растяжения-сжатия, сдвига, изгиба кручения с шестью степенями свободы в каждом узле: тремя линейными тремя угловыми перемещениями (рис. 3, д, е).

Особенностью последних двух представителей семейства пластин является наличие угловой степени свободы σ_z в плоскости срединной поверхности КЭ в каждом его узле. Как правило, эта степень свободы вводится для возможности расположения пластин произвольно в пространстве и не участвует в формировании напряженного деформированного состояния КЭ, если обратное явно не отворено в документации комплекса. Четырехугольные элементы допускают незначительное искажение прямого угла, и оба типа - небольшое отличие отношения длин сторон от единицы. Оба типа допускают небольшое отличие толщин в узлах. В простейшем случае набор задаваемых типовых геометрических характеристик состоит из толщин пластин в узлах элемента: S_1, S_2, S_3, S_4 .

Примером возможного распределенного внешнего силового воздействия на элемент является линейно распределенная по поверхности нагрузка, произвольно ориентированная в пространстве. Результатом вычислений для конечного элемента являются линейные и угловые перемещения каждого узла, а также компоненты $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ тензора напряжений в центральной точке

КЭ в верхней и нижней плоскостях пластины и (или) соответствующие значения интенсивностей усилий в этой точке $N_x, N_y, N_{xy}, M_x, M_y, M_{xy}, Q_x, Q_y$ в местной системе координат.

Чтобы вычислить внутренние усилия для группы конечных элементов в каком либо одном глобальном направлении, требуется директива на дополнительное преобразование результатов, и некоторые комплексы предусматривают подобные средства. Дополнительно компоненты тензора напряжений могут преобразовываться к главным направлениям и к эквивалентным напряжениям по какой-либо теории прочности.

Нередко обсуждаемое семейство для моделирования пластин дополняется так называемыми элементами высоких порядков, которые имеют такую же форму и свойства, как элементы на рис. 3. Отличие состоит в том, что они имеют промежуточные узлы. Примеры расположения узлов в таких КЭ показаны на рис. 4, а, б, причем предполагается, что

наблюдатель смотрит на КЭ, находясь на положительном направлении оси Z МесТ- Функции формы КЭ высоких порядков обладают улучшенными аппроксимационными свойствами. Вследствие этого обеспечивается устойчивая односторонняя сходимость результатов точному решению, что является интегральным показателем корректности модели. Как правило, одна и та же приемлемая точность результата достигается с меньшим числом неизвестных при использовании КЭ высоких порядков. Кроме того, допускается значительное искажение формы по сравнению с КЭ без промежуточных узлов. Остальные характеристики обсуждаемых элементов формально совпадают с характеристиками аналогов без промежуточных узлов.

Семейство для моделирования оболочек также может быть представлено элементами высоких порядков, внешне похожими на обсуждавшиеся выше. При соответствующем построении эти элементы допускают искажение формы не только в плоскости, но и из плоскости, что позволяет моделировать кривизну срединной поверхности (рис. 5,а,б). Прочие их характеристики формально совпадают с характеристиками КЭ (см. рис. 3,д,е) соответствующей формы.

Нередко семейство для моделирования пластин дополнено вариантами вышеприведенных представителей (см. рис. 3-5) для расчета многослойных материалов. В таких случаях типовые совокупности характеристик дополняются сведениями о толщинах слоев и их физических характеристиках как двумерных объектах, иногда с учетом анизотропии различной степени.

Отметим, что типовые совокупности свойств, характеризующие КЭ обоих обсуждавшихся выше семейств, могут быть дополнены различными параметрами в конкретных разработках. Примером такого параметра, общим для всех конечных элементов двух семейств, является так называемая присоединенная масса, распределенная по оси или по срединной поверхности в зависимости от семейства. Это понятие и соответствующий параметр позволяют учитывать наличие материала, распределенного по модели, но не участвующего в формировании ее жесткости и, следовательно, в восприятии нагрузки, не прибегая к его явному представлению в виде распределенных силовых воздействий.

Простейшими представителями семейства для моделирования массивных тел являются конечные элементы, имеющие формы параллелепипеда или тетраэдра с тремя степенями свободы в каждом узле -линейными перемещениями (рис. 6). КЭ первого типа допускают незначительное искажение прямого угла, и оба типа - небольшое отличие отношения длин сторон от единицы. Примерами внешних силовых воздействий на КЭ являются распределенные по объему или по поверхностям граней нагрузки. В качестве результатов вычисляют линейные перемещения узлов и компоненты $\langle \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx} \rangle$ тензора напряжений в центральной точке КЭ.

Семейство для моделирования массивных тел может быть дополнено элементами высоких порядков таких же топологических типов, что и показанных на рис. 6. Так же как и в пластинах, элементы высоких порядков отличает наличие промежуточных узлов. Функции формы КЭ высоких порядков обладают улучшенными аппроксимационными свойствами, вследствие чего при их использовании одна и та же приемлемая точность результата достигается с меньшим числом неизвестных. Кроме того, допускается значительное искажение формы (включая искривление сторон) по сравнению с КЭ без промежуточных узлов.

Кроме представителей вышеупомянутых семейств, в состав библиотеки обычно включают некоторые специальные типы конечных элементов, в основном для моделирования связей и среды, с которой взаимодействует сооружение. Они могут быть отнесены к тем или иным семействам, но в силу некоторых отличительных особенностей обсуждаются отдельно. Одним из таких типов является одномерная пружина, реагирующая на растяжение-сжатие или на взаимный поворот, или на закручивание. Как правило, это двухузловой линейный элемент, относящийся к первому из обсуждавшихся здесь семейств. Отличие состоит в том, что пружина может опираться на узлы, совпадающие друг с другом в

пространстве, т. е. не иметь длины, чего другие представители семейства не допускают. Обычный КЭ пружины характеризуется только одной жесткостью. Существуют разновидности пружинных КЭ, допускающие различную жесткость при положительных и отрицательных перемещениях узлов в одном и том же направлении. В этом случае предусматриваются две характеристики жесткости. Если одна из них может иметь нулевое значение, то в комплексе фактически допускается односторонняя связь. Следует иметь в виду, что использование подобных разновидностей КЭ предполагает выполнение нелинейного расчета. Линейные КЭ с различной реакцией на перемещения разных знаков в одном направлении (в том числе и «односторонние») могут быть представлены в различных формах (например, не только пружин, но и стержней).

Отличным от представителей всех обсуждавшихся семейств является так называемый абсолютно жесткий конечный элемент. Это понятие не имеет геометрического аналога, как было с КЭ до сих пор. По существу, это совокупность ссылок на узлы модели, один из которых объявляется независимым, а остальные - зависимыми. Степени свободы в зависимых узлах определяются степенями свободы независимого узла. Это означает, что перемещения, например, вдоль оси абсцисс глобальной системы координат всех зависимых узлов одинаковы и совпадают с соответствующим перемещением независимого узла. Подобные КЭ используются для моделирования связей, жесткость которых существенно превосходит жесткость остальной части системы в соответствующих направлениях.

Семейство для моделирования среды, с которой взаимодействует сооружение, в простейшем случае может быть представлено конечными элементами податливого основания как одномерными, так и двухмерными. Во многих комплексах эти типы конечных элементов рассматриваются совместно с соответствующими типами КЭ, используемыми при моделировании сооружения. Так, линейные КЭ податливого основания совмещены со стержневыми КЭ (см. рис. 2,б,в), а двумерные - с КЭ для моделирования пластин и оболочек (см. рис. 3-5). В таких случаях к типовой совокупности задаваемых свойств обычного конечного элемента добавляются параметры, характеризующие податливость основания в рамках выбранной для этого модели. В простейших моделях типа Фусса - Винклера используются один или два коэффициента постели в каждом направлении взаимодействия.

Продолжая обсуждение состава типовой библиотеки, во-первых, отметим, что вышеприведенные описания КЭ составлены в основном с ориентировкой на выполнение линейного статического расчета. Пригодность того или иного конечного элемента к использованию в расчетах других типов следует устанавливать по документации к используемому комплексу. Во-вторых, напомним еще раз, что приведенный здесь пример состава библиотеки является пересечением множеств типовых конечных элементов из библиотек некоторого количества комплексов. В большинстве случаев библиотеки элементов реальных разработок значительно шире, но может оказаться, что каких-либо из указанных здесь типов КЭ нет в каком-то продукте. Последнее обстоятельство не является формальным препятствием к использованию комплекса, так как для решения задач определенного класса можно обойтись и меньшим составом библиотеки.

Завершая обсуждение состава библиотеки конечных элементов, еще раз напомним, что основным источником сведений о ней все же является документация по эксплуатации комплекса. Тем не менее, авторы надеются, что материалы настоящей главы, и в частности информация о составе библиотеки КЭ, помогут читателю быстрее разобраться в системной документации, составленной порой не совсем удачно.

ЛЕКЦИЯ № 3 Некоторые вопросы технологии выполнения расчетов

Перейдем к рассмотрению технологии выполнения расчетов методом конечных элементов применительно к решениям задач строительной механики. Несмотря на бурное развитие средств компьютерного моделирования, и регулярное появление в нем новых направлений и подходов к сопровождению процесса создания объекта, представляется

справедливой общей схемой работы по инициализации расчета, его выполнению и реализации результатов, показанная на рис.7. В известном смысле она помогает осознать роль и место расчета в процессе проектирования. В действительности, процесс, представленный схемой на этом рисунке, значительно сложнее. В частности, он усложняется за счет возможных возвратов с текущего шага на практически любой из предыдущих. Однако современные средства моделирования настолько облегчают и ускоряют выполнение промежуточных этапов, что все чаще представляется возможным возвращаться назад только с последних этапов (позиции 10-12 на рис.7), имея хорошо обоснованные предложения по изменению объекта. Это обстоятельство, в конечном счете, снижает количество итераций в процессе разработки проекта в целом.

Хотя формально предметом внимания должны являться этапы 6-9, начнем обсуждение с четвертого этапа. Такой порядок действий определяется, с одной стороны, важностью этого этапа в процессе решения задачи, а с другой - особенностями применения современных комплексов программ. Кроме того, уточним некоторые понятия, что, позволит читателю избежать путаницы в его будущей или настоящей производственной деятельности в качестве проектировщика, расчетчика или производителя работ.

Если признать, что целью расчета является получение данных для надежного проектирования, то основной его задачей является реализация математической модели. Однако процессы формирования и реализации математической модели полностью автоматизированы, поэтому задачей человека является выработка существенных решений, определяющих качество модели, и описание этих решений с помощью современных технических средств. Большинство таких решений принимается на этапе создания расчетной схемы. Можно утверждать, что решения, принимаемые на последующих этапах, могут оставить без изменений или даже ухудшить свойства модели, заложенные в расчетной схеме, но не улучшить их. Поэтому этап создания расчетной схемы так важен с точки зрения обеспечения всего процесса проектирования корректными сведениями о свойствах объекта.

Будем считать, что РАСЧЕТНАЯ СХЕМА - нематериальная физическая (в отличие от математической) модель объекта проектирования, создаваемая для решения конкретной задачи строительной механики. Напомним, что процесс ее разработки включает разделение объекта на основные и вспомогательные части, последующее представление их в виде различных элементов модели: стержней, пластин, оболочек, массивов и связей между ними, моделирование воздействий на сооружение, наделение элементов модели (включая модели воздействия) соответствующими физико-механическими свойствами и геометрическими характеристиками. При оговоренных условиях представить расчетную схему можно только с помощью совокупности геометрических образов, которую в дальнейшем будем называть ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. Тогда можно рассматривать расчетную схему как некую геометрическую модель, элементы которой наделены определенными свойствами, воспринимают нагрузку и взаимодействуют между собой. Отметим, что такое представление расчетной схемы близко к понятию ТВЕРДОТЕЛЬНАЯ МОДЕЛЬ, в которое не входит представление о нагрузке, связях и граничных условиях.

- Осознание потребности в создании объекта
- Создание конструктивной схемы
- Осознание потребности в расчете
- Разработка расчетной схемы
- Выбор численного метода решения задачи
- Разработка дискретной схемы численного метода: для МКЭ - конечно-элементной модели
- Формирование математической модели
- Реализация математической модели, т.е. собственно решение

Представление результатов решения и их анализ

Пробное использование результатов расчета в разработке проекта

Реализация обратной связи с инициатором решения задачи

Использование результатов расчета на следующих этапах разработки проекта

Основой для создания расчетной схемы являются техническое задание на проектирование объекта и его конструктивная схема. Последняя имеет вид геометрической модели.

В оговоренных в настоящем параграфе условиях вопрос о выборе численного метода не стоит (этап 5), поэтому перейдем к обсуждению позиции 6 на рис.7. Поскольку расчетная схема является, как правило, континуальной моделью, количество степеней свободы в ней бесконечно велико. ДИСКРЕТНАЯ СХЕМА - нематериальная физическая модель объекта, полученная из расчетной схемы путем снижения количества степеней свободы до конечного значения в соответствии с применяемым численным методом расчета. В случае МКЭ дискретную схему называют КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛЬЮ. Процесс создания дискретной схемы (конечно-элементной модели) называют дискретизацией. Обратим внимание, что дискретизация может выполняться как по пространству, так и по времени. Математическая модель формируется на основании именно дискретной схемы. В процессе выполнения дискретизации нужно принять ряд решений, которые, как указывалось выше, могут испортить свойства математической модели. Корректность принимаемых на этом этапе решений определяется степенью владения методом конечных элементов.

Этапы формирования и реализации математической модели (позиции 7, 8), как уже отмечалось выше, не требуют вмешательства человека и инициализируются из препроцессора специальной директивой. Техника представления результатов (позиция 9) определяется устройством препроцессора каждого комплекса, которое следует изучать по системной документации, а анализ результатов выполняется практически так же, как и при использовании любого другого метода решения задачи. Поэтому подробное раскрытие его содержания в рамках настоящей главы нецелесообразно. Завершая обсуждение общей схемы выполнения расчета, еще раз подчеркнем, что задача расчетчика в условиях применения программного комплекса, реализующего МКЭ, сводится к разработке расчетной схемы и конечно-элементной модели (дискретной схемы), их описанию средствами препроцессора и анализу результатов. Поскольку обсуждение первой и последней задач считается завершенным, сосредоточимся на разработке дискретной модели.

Понятия технологии разработки конечно-элементной модели

Уточним некоторые определения, используемые в конечно-элементном моделировании и анализе, чтобы впоследствии у читателя не возникало противоречий в толковании тех или иных понятий.

СТЕПЕНИ СВОБОДЫ - независимые параметры, определяющие напряженно-деформированное состояние расчетной схемы в любой момент времени. В настоящем разделе рассматривается подход, в котором указанными параметрами считаются величины кинематического характера, в частности линейные и угловые перемещения. ОБЩИЕ степени свободы - степени свободы, определенные в единой для всей расчетной схемы системе координат. МЕСТНЫЕ степени свободы - степени свободы, определенные в частной (местной), связанной с каким-либо фрагментом расчетной схемы, системе координат. Местные степени свободы однозначно выражаются через общие и называются «степенями свободы» в известном смысле условно. Местные степени свободы и системы координат используются для удобства описания формы, свойств, граничных условий и воздействий модели. В настоящем параграфе рассматривается дискретизация по пространству.

ПОДОБЛАСТЬ - относительно крупная часть расчетной схемы, выделенная по ряду признаков: физические и геометрические характеристики, форма, граничные условия, воздействия, средства дискретизации, удобство описания создаваемой модели. В частном

случае расчетная схема может состоять из одной подобласти. Иногда такие подобласти называют подконструкциями.

СЕТКА ЛИНИЙ (ПОВЕРХНОСТЕЙ) - совокупность линий (поверхностей), условно разделяющих каждую двухмерную (трехмерную) подобласть расчетной схемы на более мелкие части. Для трехмерной модели сеткой линий можно считать совокупность линий пересечения поверхностей сетки.

ОСНОВНЫЕ УЗЛЫ - точки в местах пересечения линий сетки.

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ УЗЛЫ - точки на линиях сетки между основными узлами или между линиями (поверхностями) сетки.

ОСНОВНЫЕ НЕИЗВЕСТНЫЕ - общие степени свободы в основных и промежуточных узлах.

КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ (КЭ) - более мелкая часть расчетной схемы, полученная путем условного деления каждой подобласти линиями сетки (или поверхностями в трехмерном объекте). Каждому конечному элементу ставится в соответствие группа узлов сетки, состав которой определяется так называемой моделью конечного элемента, или, как говорят, типом конечного элемента. Конечный элемент сохраняет основные свойства фрагмента расчетной схемы (которому он принадлежит) в части деформирования, несмотря на формально изменившиеся соотношения определяющих его размеров по сравнению с соотношениями размеров всего фрагмента.

Другими словами, конечный элемент реализует определенную модель деформирования среды. Способ и густота конечной элементной сетки определяет качество дискретизации ее по пространству. Чем выше степень сгущения и приближения форм конечных элементов к правильной (своей для каждого топологического типа), тем выше качество окончательного результата. Следует учитывать, что чрезмерное увеличение количества основных неизвестных может привести к проблемам, связанным с ограниченностью разрядной сетки в ЭВМ дискретного действия. Конкретные соотношения параметров, определяющие указанное явление, зависят от используемого оборудования и математического обеспечения.

Как отмечалось выше, различным по свойствам деформирования фрагментам расчетной схемы должны соответствовать различные модели конечных элементов. Требуемый состав совокупности свойств деформирования конечных элементов определяется моделью деформирования фрагмента расчетной схемы, т.е. постановкой задачи. Обычно в комплекс программ включены различные модели конечных элементов с совокупностью свойств деформирования заранее известного состава. Задача пользователя состоит в выборе подходящих моделей из существующего набора (библиотеки конечных элементов) в соответствии со свойствами фрагментов расчетной схемы. В связи с отмеченным обстоятельством используется понятие **ТИП КОНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА** - обозначение модели конечного элемента с установленной совокупностью свойств деформирования в составе комплекса программ.

Свойства деформирования модели конечного элемента представляются рядом физико-геометрических параметров, которые сгруппированы определенным образом для удобства использования. В связи с отмеченным обстоятельством вводится еще несколько понятий. **ТИП МОДЕЛИ МАТЕРИАЛА** - установленная совокупность физических законов, определяющих механическое поведение материала. **ТИП ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК** - установленная совокупность законов и соответствующих констант, определяющих физические свойства материалов в дискретной схеме. Состав совокупности определяется моделью материала. **ТИП ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК** - установленная совокупность констант, определяющих геометрические характеристики подобластей расчетной схемы в дискретной схеме. Состав совокупности определяется типом применяемого в данной подобласти конечного элемента. Например, для пластин важнейшей геометрической характеристикой является толщина. Иногда в состав совокупности

включается ссылка на тип физических характеристик, тогда совокупность называется ТИПОМ СВОЙСТВ.

Для упорядочения представления информации о граничных условиях различного типа иногда вводятся еще несколько понятий.

ТИП СВЯЗЕЙ - установленная совокупность одиночных бесконечно жестких связей в узле, ориентированных вдоль узловых степеней свободы. Состав совокупности определяется кинематическими граничными условиями и набором степеней свободы в решаемой задаче, которым должны соответствовать выбранные типы конечных элементов. ТИП ВОЗДЕЙСТВИЯ - установленная совокупность параметров какого-либо воздействия. Состав совокупности определяется физической природой воздействия и набором степеней свободы в решаемой задаче, которым также должны соответствовать выбранные типы конечных элементов.

Дискретная схема МКЭ состоит из объектов большинства вышеупомянутых категорий (узлы, конечные элементы, неизвестные, типовые характеристики, связи и воздействия). Остальные используются в геометрической модели и для удобства представления информации в дискретной схеме. При определении параметров дискретной схемы следует иметь в виду, что описание ее элементов всех категорий в базе данных комплекса программ выполняется с помощью чисел в целой или экспоненциальной формах. Большинство современных программных комплексов предоставляют более или менее дружелюбный интерфейс, существенно облегчающий процесс описания моделей всех уровней сложности. Однако пользователь комплекса должен быть готов (до начала диалога с препроцессором) отвечать на некоторые вопросы программы именно в числовой форме. В частности, следует помнить, что элемент любой категории однозначно определяется в описании любой модели своим номером, который должен быть уникальным в пределах соответствующей категории. Речь идет о номерах узлов, конечных элементов, типов конечных элементов, типов характеристик и т. д., причем не может быть, например, двух узлов, имеющих в описании одинаковый номер. То же самое касается элементов остальных категорий. В то же время допускается существование элементов разных категорий, имеющих одинаковые номера. Например, возможно существование в описании одной модели узла № 5, конечного элемента № 5, типа физических характеристик № 5 и т. д.

В качестве руководства к действию в среде комплекса предлагается уточненная схема решения задачи МКЭ, составленная в предположении, что расчетная схема объекта уже разработана

Обсудим подробнее процесс подготовки КЭ модели (позиция 1 таблицы 1) на примере пластины, расчетная схема которой проработана (рис.8). Изложим основную часть условий задачи. Рассмотрим пластину как пространственный объект. Представим ее в составе расчетной схемы срединной поверхностью с соответствующими граничными условиями. Будем считать, что при нагружении в плоскости пластины справедливы допущения плоской задачи классической теории упругости, а при нагружении перпендикулярно плоскости - допущения технической теории изгиба пластин. В частности, в каждой точке расчетной схемы имеется пять степеней свободы: два линейных перемещения в срединной поверхности (U , V), одно линейное перемещение нормально срединной поверхности (W), два угловых перемещения вокруг нормалей в срединной поверхности $\{(r), (p_v)\}$. Угол поворота вокруг нормали к срединной поверхности $\{(r_w)\}$ в качестве степени свободы плоской задачи теории упругости не рассматривается.

Форма объекта, распределение физических и геометрических свойств и связей по поверхности считаются заданными. Толщина пластины постоянна. Материал пластины однородный и подчиняется закону Гука.

Таким образом, система в целом является линейно деформируемой. Значения физико-геометрических параметров составляют: $E = 3 \cdot 10^{10}$ [Н/м²], $\nu = 0,15$, $\rho = 2400$ [кг/м³], $S = 0,2$ [м], $a = 1,2$ [м], $b = 1,8$ [м], $c = 2,0$ [м], $d = 1,2$ [м]. Будем считать, что при указанных выше

условиях требуется решить методом конечных элементов две типовые задачи. Одна - в том, чтобы найти распределения по срединной поверхности перемещений и внутренних усилий (напряжений) при силовом воздействии в срединной поверхности. Другая задача такая же, но нагрузка распределена нормально к срединной плоскости пластины.

Определим предмет и задачи моделирования. Результатами обсуждаемого в настоящем пункте этапа решения задачи являются варианты условного разделения расчетной схемы на подобласти и на конечные элементы. Процесс выработки решений должен привести в соответствие потребности заказчика расчета и возможности, предоставляемые имеющимся в распоряжении математическим обеспечением. Следует учитывать как существенные (наборы типов конечных элементов, моделей материалов, свойства численных алгоритмов и тому подобное), так и организационные возможности (связанные с формальной стороной использования математического обеспечения, например ограничения на количественные или качественные параметры решаемых задач). Следует также иметь в виду, что разделение должно, с одной стороны, обеспечивать техническую возможность описания модели, а с другой - упрощать процесс описания. Поэтому следует по возможности использовать простейшие формы подобластей: треугольные и четырехугольные (тетраэдры и параллелепипеды в трехмерных фрагментах расчетной схемы). Варианты разделения (т. е. параметры КЭ модели) определяются обстоятельствами, которые можно объединить в три группы, связанные с целями расчета и постановкой задачи, свойствами расчетной схемы, средствами дискретизации, предусмотренными в используемом математическом обеспечении.

Рассмотрим, как связаны параметры КЭ модели и цели расчета. Будем различать четыре вида целей расчета. Прикидочный расчет выполняется для получения грубых оценок напряженно-деформированного состояния системы. В этом случае важно получить хотя бы весьма приближенный результат как можно быстрее. Допускаются даже некоторые изменения в постановке задачи. В качестве результатов скорее всего потребуются обобщенные характеристики напряженно-деформированного состояния, например эквивалентные напряжения (или деформации) по какой-либо теории прочности, которые позволят быстро выявить наиболее напряженные области системы. Чаще всего достаточно бывает графической формы представления законов распределения напряженно-деформированного состояния по поверхности или по объему расчетной схемы. Как правило, рекомендуется небольшое количество простых подобластей с относительно редкой сеткой линий и наиболее простыми типами конечных элементов.

Учебный расчет выполняется с целью освоения определенного математического обеспечения или практического приложения метода расчета. Изменения в постановке задачи в сторону ее упрощения, как правило, не допускаются. В этом случае также следует стремиться получить хотя бы весьма приближенный результат как можно быстрее. Особое внимание следует обратить на то, что в качестве результатов, скорее всего, потребуются параметры напряженно-деформированного состояния (осевые напряжения и(или) соответствующие относительные деформации), которые могут быть легко сопоставлены с результатами других расчетов. Может потребоваться не только графическая, но и числовая форма представления. В этом случае также рекомендуется небольшое количество по возможности простых подобластей с относительно редкой сеткой линий, делящей подобласти на наиболее простые конечные элементы как можно более правильной формы. Несмотря на некоторые отличия, прикидочный и учебный расчеты могут быть объединены понятием «упрощенный расчет».

Основной расчет имеет целью получить основную часть информации о напряженно-деформированном состоянии для принятия большей части проектных решений. В этом случае напряженно-деформированное состояние регулярных областей расчетной схемы должно быть определено как можно более достоверно. Изменения в постановке задачи в сторону ее упрощения не допускаются. В зависимости от отрасли, для которой выполняется расчет, могут потребоваться не только напряжения и деформации, но также усилия и

перемещения. Первая форма более характерна для машиностроения, вторая - для строительства. Выборочная числовая форма представления результатов более предпочтительна, чем графическая, хотя последняя также привлекается в целях иллюстрации. В обсуждаемом типе расчета заранее идут на менее точное определение параметров напряженно-деформированного состояния в областях расчетной схемы, содержащих особенности (как правило, концентраторы различных типов: выточки, входящие углы, отверстия относительно малых диаметров, сосредоточенные воздействия, сингулярные граничные условия и тому подобное). Как правило, рекомендуется более частое деление на подобласти, чем в предыдущем случае, и более частая сетка линий, достаточная для достоверного определения факторов напряженно-деформированного состояния в регулярных областях расчетной схемы. Используются также типы конечных элементов повышенной точности, например, с промежуточными узлами на сторонах или внутри конечного элемента, с увеличенным количеством степеней свободы в каждом узле.

Уточненный расчет, как правило, имеет целью повышение достоверности результатов в областях с особенностями. Деление расчетной схемы на подобласти должно допускать построение сетки линий, обеспечивающей достоверные результаты в областях с особенностями. В ряде случаев последнего достигают за счет растяжения сетки линий в прочих подобластях расчетной схемы. Рекомендуется применение типов конечных элементов со специальными свойствами. Возможно выделение областей расчетной схемы, содержащих особенности, в отдельные фрагменты с привлечением результатов расчетов предыдущего типа в качестве граничных условий силового или кинематического характера. Допускается изменение постановки задачи в сторону ее усложнения. Могут потребоваться все формы представления результатов.

Рассмотрим далее, как связаны параметры КЭ модели и свойства расчетной схемы. В перечень свойств расчетной схемы, влияющих на дискретизацию, включим физические и геометрические свойства, форму, силовые и кинематические граничные условия. Разделение расчетной схемы на подобласти должно обеспечивать отсутствие разрывов в распределении вышеперечисленных факторов внутри любой подобласти. Допустим, например, что прямоугольная пластина состоит из двух частей разного материала, границей между которыми является диагональ прямоугольника. Пусть та же пластина состоит из двух частей разных толщин, границей между которыми является другая диагональ прямоугольника. В этом случае следует разделить пластину на четыре треугольные подобласти, каждая из которых ограничена одной стороной и примыкающими к ней полудиagonалями прямоугольника. Если внутри какой-либо из указанных подобластей имеется скачкообразное изменение закона распределения силового воздействия, то скорее всего, целесообразно будет разделить ее на более мелкие части с границами, соответствующими геометрическому месту точек разрыва. Если границы расчетной схемы описываются разными функциями, может оказаться целесообразным поместить их в разные подобласти. В зонах резкого изменения формы может потребоваться разделение на подобласти, обеспечивающее последующее уточнение решения, если это не входит в противоречие с целями расчета.

Для предложенной пластины (см. рис.8) не требуется создания специальных подобластей с точки зрения распределения физико-геометрических характеристик и кинематических граничных условий. А с учетом учебной категории расчета не обязательно реагировать на резкое изменение формы, образующее входящий угол. Допустим также, что уточнение условий воздействий в последующих пунктах не повлияет на принятые в настоящем пункте решения. Последнее допущение может привести к необходимости пересмотра решений, принятые без учета изменений законов распределения силовых воздействий. Поэтому в реальной задаче следует сразу учитывать все факторы, включенные выше в перечень свойств расчетной схемы.

Рассмотрим далее, как связаны параметры КЭ модели и средства дискретизации. Это последняя группа обстоятельств, влияющих на решения обсуждаемого этапа, связана со средствами дискретизации используемого программного обеспечения. Среди этих средств

определяющую роль играют модели материалов и типы конечных элементов, включенные в состав комплекса программ, т.е. фактически составы библиотек конечных элементов и моделей материалов. Понятие **БИБЛИОТЕКИ МОДЕЛЕЙ МАТЕРИАЛОВ** аналогично понятию библиотеки конечных элементов: фактически - это совокупность процедур, реализующих различные модели поведения различных материалов. Обычно библиотека материалов дополняется совокупностями параметров для разных материалов в рамках каждой модели материала. Такая информация составляет часть содержания вспомогательных баз данных комплекса.

Примером такой модели может являться закон Гука для материалов с различными видами анизотропии. Во вспомогательной базе данных должны содержаться значения параметров этой модели для различных материалов. Не имеющими значения по существу, но очень важными с технической точки зрения являются средства создания геометрической модели и условного разделения ее на конечные элементы. Принимаемые решения должны в известной степени ориентироваться на последнюю часть средств. Однако следует иметь в виду, что в современных программных комплексах технические средства создания геометрических моделей и условного разделения последних на конечные элементы, как правило, весьма развиты и редко накладывают ограничения на способ создания дискретной схемы. Поэтому в настоящем разделе уделим основное внимание моделям материалов и типам конечных элементов.

В соответствии с постановкой задачи следует использовать модель изотропного материала, которая, как уже отмечалось выше, определяет состав типовой совокупности физических характеристик: номер типа материала (первый и единственный), далее с учетом постановки задачи можно ограничиться значениями модуля упругости и коэффициента Пуассона. Далее следует выбрать тип конечного элемента в соответствии с постановкой задачи. Для обоснованного выбора выполняется анализ типов конечных элементов, предназначенных в комплексе для расчета пластин. В нашем случае он приводит к выводу о целесообразности (с точки зрения целей расчета) и возможности (с точки зрения постановки задачи), а также с учетом требований условий задачи о решении при двух различно ориентированных относительно срединной поверхности нагрузках, использования простейшего четырехугольного элемента для расчета пластины, произвольно ориентированной в пространстве (см. рис. 3, д). Сделанный выбор позволяет представить состав типовой совокупности свойств: номер типа свойств (первый и единственный), ссылка на номер типа материала (на № 1), ссылка на номер типа конечного элемента, присвоенный ему в библиотеке КЭ, поля содержательной части со значениями соответствующих констант (в простейшем случае можно ограничиться толщиной в первом или во всех узлах КЭ, хотя в других примерах могут потребоваться дополнительные параметры).

Рассмотрим далее практические результаты процесса разработки КЭ модели. Итогом проделанной в настоящем пункте работы являются материалы: рис.9, таблицы 2, 3, 4. В них в различных формах отражены принятые решения. Способ разделения на подобласти (A1, A2, A3) определяется нежелательностью искажения формы конечных элементов выбранного типа как с точки зрения сохранения их аппроксимационных свойств, так и с точки зрения удобочитаемости результатов вычисления погонных усилий. Кроме того, принятый способ позволяет достаточно легко управлять степенью сгущения сетки линий, не ухудшая ее вышеотмеченных параметров. На рис. 9 M1- тип физических характеристик подобластей, P1 - тип свойств, C1, C2 - типы связей. Последние целесообразно использовать для всех типов задач как плоской, так и изгибающей, потому что они, во всяком случае, обеспечивают геометрическую неизменяемость объекта в целом.

В трех последних таблицах представлены минимальные наборы элементов соответствующих типовых совокупностей. Рассмотрение нагрузки не представляет в данном случае интереса, так как во многих комплексах существует возможность задать ее проекциями интенсивности на оси глобальной системы координат на уровне твердотельной

модели. Исходные данные, предоставленные на рис.9 и таблицы 2, 3, 4, должны быть подготовлены пользователем в виде твердой копии (возможно «от руки») до начала диалога с препроцессором.

Вышерассмотренная часть материалов настоящего параграфа дает некоторое представление о решениях, которые следует принять для создания конечно-элементной модели. Процесс описания принятых решений и выполнение расчета определяются устройствами препроцессоров и постпроцессоров конкретных комплексов. Их целесообразно изучать по системной документации фирмы-разработчика или по специальной методической литературе, например [26,27,28,14], поэтому в настоящем параграфе позиции 2-12 таблицы 1 не рассматривались.

По результатам проделанной выше работы (см. рис. 9, таблицы 2, 3, 4) с помощью трехсотузловой модификации комплекса MSC.NASTRAN for WINDOWS версии 4.5 были выполнены примеры расчета. Сначала была создана конечно-элементная модель пластины, пригодная для решения обеих задач: при загрузке в срединной плоскости и при загрузке нормально этой плоскости. На рис.10 показаны основные элементы конечно-элементной модели: узлы, конечные элементы, связи, условное изображение воздействия в срединной плоскости. Связи обеспечивают пространственное закрепление модели. Символами F обозначена полная пространственная заделка, а символами 23 - линейные связи в направлениях осей Y и Z общей системы координат. Загрузка нормально срединной плоскости обсудим ниже. В процессе генерации модели были, в частности, автоматически присвоены соответствующие номера каждому узлу и конечному элементу.

После формирования системы основных разрешающих уравнений МКЭ выполнено ее решение, в результате которого определены основные неизвестные: линейные и угловые перемещения узлов в пространстве. В силу постановки обсуждаемой части задачи линейное перемещение вдоль оси Z и угловые перемещения вокруг осей X и Y получились равными нулю, а угловое перемещение вокруг оси Z отличным от нуля, но не имеющим физического смысла. Таким образом, в качестве «ответа» следует рассматривать линейные перемещения узлов вдоль осей X и Y, т.е. происходящие в срединной плоскости пластины.