

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ НАУК
МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИИ

Челябинский Государственный агроинженерный университет

ЖИЛКИН В.А.

РАСЧЕТЫ НА ПРОЧНОСТЬ И ЖЕСТКОСТЬ ЭЛЕМЕНТОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН

Учебное пособие для студентов специальности 171000 –
Сельскохозяйственные машины и оборудование

Под редакцией чл-корр. РАСХН В.В. Бледных

Челябинск 2004

УДК 539.4.01:624.04: 631.3(075.8)

Жилкин В.А. Расчеты на прочность и жесткость элементов сельскохозяйственных машин. Часть I. Теоретические основы проектирования элементов сельхозмашин: Учебное пособие. Челябинский государственный агроинженерный университет. – Челябинск, 2005.- 427 с.

В учебном пособии излагаются основные положения теории упругости, пластин средней толщины, расчет статически неопределимых стержневых систем, основы динамики конструкций, методы расчета на прочность и устойчивость, основы механики почв, изучение которых не предусмотрено учебными планами подготовки дипломированных специалистов по направлению **653200** – «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы», специальность **171000** «Сельскохозяйственные машины и оборудование». Поэтому в данном пособии приводится минимальная информация как о стандартных методах расчета на прочность и жесткость элементов с.-х. машин, так и о **МКЭ**, необходимая для понимания вычислительных процессов, заложенных в стандартных программных продуктах, в качестве которых выбраны два широко распространенных на пространстве России русскоязычных пакета **АПМ WinMachine** и **SCAD**.

Учебное пособие предназначено для студентов старших курсов специальности 171000 «Сельскохозяйственные машины и оборудование», аспирантов и инженерно-технических работников АПК.

Рецензенты

Забродин В.П. –доктор техн. наук, проф. (АЧГАА)
Черноволов В.А. –доктор техн. наук, проф. (АЧГАА)
Сапожников С.Б. - доктор техн. наук, проф. (ЮУрГУ)

Печатается по решению редакционно-издательского совета ЧГАУ

ISBN 5-88156-332-8

© Челябинский государственный агроинженерный университет,
2005.

1. ВВЕДЕНИЕ

Возросший интерес конструкторов и исследователей нашей страны к теоретическим основам рабочих процессов сельскохозяйственных машин, развитие методов автоматизированного проектирования свидетельствуют о том, что эмпирический путь создания техники уже не соответствует современным требованиям.

Современные информационные технологии позволяют существенно повысить производительность труда в управлении производством, проектировании и исследовании объектов и процессов. Если производительность труда в сфере производства с начала прошлого века возросла в сотни раз, то в области проектирования только в полтора-два раза. Это обуславливает большие сроки проектирования новых объектов, что не отвечает потребностям развития экономики. Одним из направлений решения этой проблемы является использование **систем автоматизированного проектирования (САПР)**.

В настоящее время многие задачи, считавшиеся сугубо интеллектуальными и подлежащими компетенции только человека, перешли в разряд вычислительных, и ЭВМ все больше вместо элементарных функций помощника-вычислителя начинает играть роль соавтора конструктора. Теперь машине нужно задать не мелочно регламентированную последовательность предписанных вычислений, а только основные сведения об объекте исследования и постановку задачи. Даже выбор конкретного метода решения ЭВМ в принципе может сделать сама, опираясь, например, на сравнение объемов вычислений по имеющимся в её распоряжении алгоритмам.

В последнее десятилетие резко возросла сложность задач, которые ставит перед механикой техника. Как правило, эти задачи имеют объем, делающий невозможным их решение средствами традиционной “бумажно-ручной” технологии. Даже в тех случаях, когда соответствующие расчеты могут быть проведены вручную, они оказываются чрезвычайно громоздкими и занимают неоправданно много времени.

При неавтоматизированном проектировании результаты во многом определяются инженерной подготовкой конструкторов, их производственным опытом, профессиональной интуицией и другими факторами. Автоматизированное проектирование позволяет значительно сократить субъективизм при принятии решений, повысить точность расчетов, выбрать наилучшие варианты для реализации на основе строгого математического анализа всех или большинства вариантов проекта с оценкой технических, технологических и экономических характеристик производства и эксплуатации проектируемого объекта, значительно повысить качество конструкторской документации, существенно сократить сроки проектирования и передачи её в производство, эффективнее использовать технологическое оборудование с программным управлением. Автоматизация проектирования способствует более полному использованию унифицированных изделий в качестве стандартных компонентов проектируемого объекта.

Автоматизация разработки только графической части проекта сейчас уже мало кого устраивает. Предприятиям требуется комплексная автоматизация всего процесса проектирования, с возможностью накопления информации для систем АСУ с целью дальнейшей подготовки производства. Ведь необходимо не только разработать комплект чертежей - на них необходимо выпустить спецификации по установленным в отрасли или на предприятии правилам, но и провести и утвердить комплект конструкторской документации в различных службах и в конце концов сдать документацию в архив. Следующий этап - технологическая подготовка производства. По завершении проектно-конструкторских работ технологи должны получить от конструкторов комплект конструкторской документации на разрабатываемое изделие для написания тех-

нологии его изготовления. При этом как конструктор, так и технолог должны пользоваться единой базой данных материалов, комплектующих и архивной информацией.

Автоматизация конструкторско-технологического проектирования позволяет объединить конструкторские и технологические системы проектирования, базу данных стандартных элементов и материалов, электронный архив технической документации в одном комплексе, в едином информационном пространстве и создать сквозной цикл конструкторско-технологической подготовки производства.

В настоящее время в конструкторской практике используются **специализированные интегрированные системы автоматизированного проектирования**, в которых предусматривается полная автоматизация всех расчетных и чертежных работ, а также технологической подготовки производства (проектирование технологической оснастки, определение оптимальных маршрутов, выбор оборудования и инструмента и др.). Кроме того, в них предусматривается полная или частичная автоматизация изготовления всей необходимой документации (чертежей, таблиц, текстов и др.). В частности, к таким системам относится сочетание программных продуктов **SolidWorks, DesignSpace**, комплекс систем **ИНТЕРМEX** для **SolidWorks**, профессиональная система автоматизированного проектирования **T-flex CAD** и др.

Эти программные комплексы позволяют всем подразделениям конструкторского бюро работать в единой информационной среде и осуществлять сквозной цикл проектирования изделий и технической подготовки производства на предприятии.

Геометрическое моделирование сложных конструкций и методы их расчета на прочность и жесткость в современных САПР базируются на методе конечных элементов (**МКЭ**), в котором упрощение геометрии реальной конструкции минимально. Это позволяет проектировать машины и агрегаты, не закладывая высоких коэффициентов запаса, поскольку уровень детализации расчетов таков, что включает в себя не только общие, но и местные напряжения, традиционно выводимые за рамки расчетов в матричных методах расчета статически неопределимых пространственных стержневых систем, использующих подходы методов сопротивления материалов и строительной механики. Для этой цели чаще всего используют программные продукты **АПМ WinMachine, SCAD, COSMOS, NASTRAN, ANSYS, ALGOR, COSMOS/Works 6.0** и др.

Как показала практика, порядка **80-90%** прочностных задач описываются линейной статикой - либо непосредственно, либо с небольшими допущениями, а потому для целей проектирования можно отказаться от желания «**считать все**» и выбрать более дешевые программные продукты.

Учебные планы подготовки дипломированных специалистов по направлению **653200** – «Транспортные машины и транспортно-технологические комплексы», специальность **171000** «Сельскохозяйственные машины и оборудование», не предусматривают изучение основополагающих курсов прочностного расчета элементов машин и механизмов, таких, как «Теория упругости», «Теория пластичности», «Механика машин», «Теория колебаний» и другие дисциплины. Поэтому в данном пособии приводится минимальная информация как о стандартных методах расчета на прочность и жесткость элементов с.-х. машин, так и о **МКЭ**, необходимая для понимания вычислительных процессов, заложенных в стандартных программных продуктах, в качестве которых выбраны два широко распространенных на пространстве России русскоязычных пакета **АПМ WinMachine** и **SCAD**¹.

¹ 1. Замрий А.А.. Проектирование и расчет методом конечных элементов трехмерных конструкций в среде **APM Structure3D**. – М.: Издательство АПМ, 2004. – 208 с.

2. Вычислительный комплекс **SCAD** /Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. – М.: Издательство АСВ, 2004. – 592 с.

А

Автор надеется, что учебное пособие будет полезным студентам, аспирантам, инженерам-механикам, разрабатывающим технологические процессы и проектирующим отдельные узлы сельскохозяйственной техники.

Автор благодарит рецензентов пособия докторов техн. наук, профессоров Азово-Черноморской государственной агроинженерной академии Забродина В.П., Черноволова В.А. и доктора техн. наук, профессора Южно-Уральского государственного университета Сапожникова С.Б., взявших на себя труд прочесть работу и сделать ряд ценных замечаний, а также инженеров К.Н. Граборова и В.Н. Граборова за помощь при оформлении данного пособия. Он будет благодарен всем, приславшим отзывы об успехах и неудачах в использовании предлагаемого материала, и просит направлять замечания на **кафедру сопротивления материалов ЧГАУ** по адресу: 454080, Челябинск, проспект Ленина, 75.

В.Жилкин

2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ²

Задача теории упругости состоит в определении напряжений, деформаций и перемещений, возникающих в упругом теле под действием заданной системы внешних сил.

В отличие от теории сопротивления материалов, стремящейся получить решение тех же задач с помощью различных упрощающих рабочих гипотез, теория упругости ставит своей целью получение строгих и полных решений. Это дает возможность оценить степень точности расчетных формул, полученных в теории сопротивления материалов, а также решать такие задачи, которые элементарным путем не могут быть решены.

В классической теории упругости рассматривается упругое тело, обладающее следующими свойствами:

- А.** Тело является упругим, т. е. обладает способностью после удаления внешних нагрузок возвращаться в свое исходное состояние, возвращая при этом всю работу, затраченную на его деформацию. Формоизменение идеально упругого тела в каждый момент времени зависит только от нагрузок, действующих в этот момент на тело, и не зависит от того, в какой последовательности нагрузки приложены.
- В.** Между нагрузкой тела и его деформацией существует линейная зависимость (закон Гука).
- С.** Упругое тело является однородным и изотропным, т. е. упругие свойства во всех точках тела одинаковы и не зависят от направления.
- Д.** Материал в упругом теле заполняет непрерывно весь объем, т. е. тело является сплошным. Тело непрерывное до деформаций, остается непрерывным и после деформаций.

В связи с этим перемещения, деформации и напряжения считаются непрерывными функциями координат. Эта гипотеза позволяет по известному значению функции $f_M(x, y, z)$ в точке $M(x, y, z)$ найти ее значение f_N в близкой точке N с координатами $(x + dx, y + dy, z + dz)$. Разлагая функцию f_N в окрестности точки M в ряд Тейлора и удерживая только члены первой степени малости, получим

$$\begin{aligned} f_N(x + dx, y + dy, z + dz) = \\ = f_M(x, y, z) + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_M dx + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)_M dy + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)_M dz. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Таким образом, свойство непрерывности функции $f(x, y, z)$ позволило найти значение этой функции в близлежащей точке N через значение этой функции и её

2

1. Никифоров С.Н. Теория упругости и пластичности. – М.: Стройиздат, 1955. – 284 с.
2. Справочник по строительной механике корабля. Том I. /Под ред. академика Ю.А. Шиманского. – Л.: Судпромгиз. 1958. – 628 с.
3. Филоненко-Бородич М.М. Теория упругости. – М.: Физматгиз, 1959. – 364 с.
4. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. – М.: Высшая школа, 1961. – 538 с.
5. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. – М.: Наука, 1975. – 576 с.

первых частных производных в точке M . В случае если обе рассматриваемые точки находятся на прямой параллельной одной из координатных осей, выражение (2.1) упрощается. Так, если отрезок прямой MN параллелен оси x и, следовательно $dy = dz = 0$, то

$$f_N(x+dx, y, z) = f_M(x, y, z) + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)_M dx \quad (2.2)$$

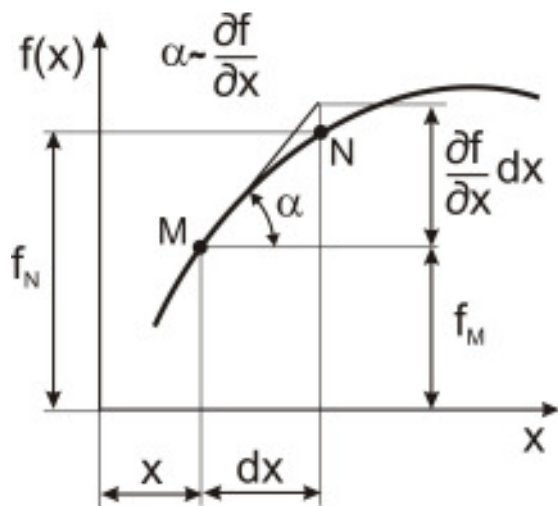


Рис.2.1

Геометрический смысл уравнения (2.2) иллюстрируется на рис.2.1, из которого видно, что формула (2.2) есть не что иное, как линейная экстраполяция в близлежащую точку. Точность формулы тем выше, чем меньше шаг dx .

Формулой (2.1) мы будем в дальнейшем часто пользоваться при выводе различных дифференциальных соотношений.

Е. Упругое тело является относительно жестким; подразумевается, что перемещение и деформации точек тела весьма малы по сравнению с размерами тела.

Основные задачи теории упругости в общем виде пока не решены вследствие значительных математических трудностей, однако все они решаются численными методами,

в частности, методом конечных элементов (МКЭ).

2.1. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОБЪЕКТОВ

По геометрическим соображениям все объекты, встречающиеся в машинах, механизмах, строительных конструкциях, разделяют на три типа: **массивное тело; оболочка; брус**.

Массивное тело (или массив) – элемент конструкций, все основные размеры которого одного и того же порядка. К числу таких тел относятся фундаменты, сферические тела (например, шарики в подшипниках), детали машин (шестерни, водила планетарных редукторов и т.п.), сплошные опоры мостов и т.п.

Оболочка – тело, два размера которого (ширина и длина) во много раз больше третьего (толщины), а внешние контуры образованы криволинейными поверхностями. Например, емкости для хранения жидкости, зерна, трубопроводы и т.д. Геометрическое место точек, равноудаленных от наружной и внутренней поверхностей оболочки, называется *срединой поверхностью*. Частным случаем оболочки является **пластина** – оболочка, срединная поверхность которой представляет собой плоскость (крышка стола, плиты перекрытий, элементы кабины трактора и т.п.).

Брус (стержень) – тело, один размер (длина) которого во много раз больше двух других размеров поперечного сечения. Брус можно представить себе как тело, образованное плоской фигурой, центр тяжести которой движется вдоль некоторой кривой, причем нормаль к плоской фигуре всегда совпадает с касательной к этой кривой. В этом случае кривая называется осью бруса, а плоская фигура – поперечным сечением.

Ось бруса – линия, проходящая через центры тяжести поперечных сечений.

Поперечное сечение – сечение бруса, образованное плоскостью, проведенной перпендикулярно оси стержня.