

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ В МЕТАЛЛУРГИИ

Учебная программа дисциплины

Конспект лекций

Лабораторный практикум

Методические указания по самостоятельной работе

- Методические указания по выполнению курсовой работы
- Банк тестовых заданий в системе UniTest



УДК 669:519.216
ББК 34.3-02
Я60

Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» подготовлен в рамках инновационной образовательной программы «Многоуровневая подготовка специалистов и инновационное обеспечение горно-металлургических предприятий по сертификации, управлению качеством, технологической и экономической оценке минерального, вторичного и техногенного сырья», реализованной в ФГОУ ВПО СФУ в 2007 г.

Рецензенты:

Красноярский краевой фонд науки;
Экспертная комиссия СФУ по подготовке учебно-методических комплексов дисциплин

Я60 Моделирование процессов и объектов в металлургии. Версия 1.0 [Электронный ресурс]: метод. указания по выполнению курсовой работы / сост. Т. А. Янковская. – Электрон. дан. (1 Мб). – Красноярск: ИПК СФУ, 2008. – (Моделирование процессов и объектов в металлургии: УМКД № 214-2007 / рук. творч. коллектива А. Ш. Любанова). – 1 электрон. опт. диск (DVD). – Систем. требования: *Intel Pentium* (или аналогичный процессор других производителей) 1 ГГц; 512 Мб оперативной памяти; 1 Мб свободного дискового пространства; привод *DVD*; операционная система *Microsoft Windows 2000 SP 4 / XP SP 2 / Vista* (32 бит); *Adobe Reader 7.0* (или аналогичный продукт для чтения файлов формата *pdf*).

ISBN 978-5-7638-1276-3 (комплекса)

Номер гос. регистрации в ФГУП НТЦ «Информрегистр» 0320802566 от 05.12.2008 г. (комплекса)

Настоящее издание является частью электронного учебно-методического комплекса по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии», включающего учебную программу, конспект лекций, лабораторный практикум, методические указания по самостоятельной работе, контрольно-измерительные материалы «Моделирование процессов и объектов в металлургии. Банк тестовых заданий», наглядное пособие «Моделирование процессов и объектов в металлургии. Презентационные материалы».

Приведены порядок и методика выполнения курсовой работы. Рассмотрено построение регрессионных моделей с помощью пакетов прикладных программ, изложены общие требования к оформлению. Приведены варианты заданий.

Предназначены для студентов направления подготовки магистров 150100.68 «Металлургия» укрупненной группы 150000 «Материаловедение, металлургия и машиностроение».

© Сибирский федеральный университет, 2008

Рекомендовано к изданию
Инновационно-методическим управлением СФУ

Редактор Л. Г. Семухина

Разработка и оформление электронного образовательного ресурса: Центр технологий электронного обучения информационно-аналитического департамента СФУ; лаборатория по разработке мультимедийных электронных образовательных ресурсов при КрЦНИТ

Содержимое ресурса охраняется законом об авторском праве. Несанкционированное копирование и использование данного продукта запрещается. Встречающиеся названия программного обеспечения, изделий, устройств или систем могут являться зарегистрированными товарными знаками тех или иных фирм.

Подп. к использованию 14.11.2008

Объем 1 Мб

Красноярск: СФУ, 660041, Красноярск, пр. Свободный, 79

Оглавление

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	4
2. СТРУКТУРА КУРСОВОЙ РАБОТЫ. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ	7
3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ	10
4. СЕМЕСТРОВЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	17
5. МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ	19
5.1. Постановка задачи математического моделирования.....	19
Выделение объекта моделирования из среды.....	19
Методы проверки гипотез адекватности структуры модели.....	21
5.2. Методика решения оптимизационных задач.....	25
Определение границ системы.....	25
Обоснование характеристического критерия.....	26
Выбор независимых переменных.....	26
Построение объекта системы	27
5.3. Методика выполнения работы в пакете MS EXCEL.....	27
Общий подход к построению управления регрессии на примере линейной модели.....	27
Расчет теоретических значений по модели. Проверка модели на адекватность	31
5.4. Методика проведения защиты	31
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	33
ПРИЛОЖЕНИЕ	34

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Математические модели являются основой функционирования автоматизированных систем управления и представляют собой упрощение реальной ситуации. Создание моделей помогает избежать полного перебора вариантов при проектировании и выборе оптимальных режимов работы оборудования и технологических процессов за счет использования вычислительной техники.

Данные методические указания по выполнению курсовой работы по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» предназначены для студентов металлургических специальностей.

Курсовая работа необходима для практического усвоения студентами основных разделов дисциплины («Моделирование детерминированных процессов», «Общие вопросы синтеза математических моделей технологических процессов цветной металлургии», «Управление технологическими процессами в динамике», «Идентификация математических моделей»), закрепления знаний по математическим и программным средствам системного моделирования, развития практических навыков комплексного решения задач исследования и проектирования технологических процессов и объектов цветной металлургии на базе современных ЭВМ.

Целями написания курсовой работы являются:

закрепление и углубление знаний по моделированию процессов и объектов в металлургии цветных металлов;

реализация алгоритма решения оптимизационной задачи с использованием пакетов прикладных программ;

использование приобретенных навыков практического применения наиболее распространенных методов решения оптимизационных задач в области металловедения и термической обработки металлов и литейного производства;

построение для конкретного технологического процесса необходимой математической модели с помощью различных инструментальных средств программирования, включая пакеты прикладных программ;

проверка модели на адекватность и обоснование использования разработанной модели для решения прикладных технических задач.

В *задачи курсовой работы* по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» входят: развитие у студента навыков научно-исследовательской и проектно-конструкторской работы в области исследования процессов, протекающих при производстве и обработке металлов и их сплавов; постановка и проведение имитационных экспериментов с моделями процессов функционирования систем на базе современных ЭВМ для оценки вероятностно-временных характеристик процессов функционирования систем, принятия экономически и технически обоснованных решений.

На выполнение и защиту курсовой работы отводится 0,64 з.е. (23 академических часа) в течение одного семестра.

Объем пояснительной записки курсовой работы должен быть в пределах 15–20 страниц печатного текста (без приложений), выполнен на одной стороне белых листов формата А4, без внешней рамки и основной надписи, в том числе введение – не более 2-3 листов.

В курсовой работе студент должен решать актуальные задачи по совершенствованию технологических процессов производства, ориентируясь на усложнения технологических агрегатов и повышение требований к качеству продукции. При этом следует учитывать, что с повышением уровня автоматизации роль человека и требования к уровню его квалификации возрастают. Чем выше сложность автоматизированных систем, тем большие потери несет производство при их возможных отказах, так как операторы оказываются не готовыми к действиям в редко встречающихся ситуациях. Практическое обучение на реальных агрегатах сопряжено с большими потерями материальных и энергетических ресурсов из-за неизбежных при этом проб и ошибок. Для успешного решения этой задачи, безусловно, необходимы новые методы и технические средства, к числу которых можно отнести создаваемые математические модели технологических процессов.

После построения модели ее следует подвергнуть проверке. В действительности адекватность модели до некоторой степени проверяется обычно в ходе постановки задачи. Уравнения или другие математические соотношения, сформулированные в модели, постоянно сопоставляются с исходной ситуацией. Существует несколько аспектов проверки адекватности. Во-первых, сама математическая основа модели должна быть непротиворечивой и подчиняться всем обычным законам математической логики. Во-вторых, справедливость модели зависит от ее способности адекватно описывать исходную ситуацию.

Решение оптимизационных задач в моделировании характеризуется выбором такого значения входных параметров, при которых может быть достигнуто оптимальное значение выходных показателей. Решение данной задачи реализуется с использованием пакетов прикладных программ и методов условной и безусловной оптимизации. Поэтому для оценки идентичности модели реальному объекту используются не только качественные, но и количественные оценки.

Выполнение курсовой работы должно способствовать углубленному усвоению лекционного курса и приобретению навыков в области решения производственных задач и разрешения ситуаций. Она базируется на изучении законов, нормативных и методических материалов, литературных источников, а также на практическом материале технологических процессов, экспериментальных и статистических данных.

Выполнение курсовой работы способствует развитию и формированию у студента в соответствии с требованиями ФГОС ВПО следующих компетенций:

умение моделировать физические, химические и технологические процессы;

умение прогнозировать свойства материалов и эффективность процессов;

умение использовать информационные средства и технологии моделирования в области металлургии;

умение проводить расчеты и делать выводы.

2. СТРУКТУРА КУРСОВОЙ РАБОТЫ. ТРЕБОВАНИЯ ПО ОФОРМЛЕНИЮ

Структура курсовой работы должна способствовать раскрытию избранной темы и отдельных её вопросов. Для конкретного технологического процесса необходимо построить математическую модель, используя пакеты прикладных программ (например, MS Excel), проверить ее на адекватность или решить задачу оптимизации функционирования процесса и сделать вывод об использовании разработанной модели для решения прикладных технических задач. Выполнение курсовой работы рассчитано на *один семестр*.

Отчет о выполнении курсовой работы требуется оформить в виде пояснительной записки, которая должна включать в указанной последовательности такие разделы: титульный лист; аннотацию; бланк задания, подписанный руководителем и заведующим кафедрой; оглавление (содержание); введение; разделы и подразделы основной части; заключение; библиографический список; приложения (при необходимости).

Титульный лист должен соответствовать установленному образцу ([см. прил.](#)).

Аннотация в краткой форме раскрывает содержание пояснительной записки к курсовой работе.

Бланк задания, полностью оформленный, должен содержать отзыв руководителя о курсовой работе студента и ее оценку.

Оглавление включает наименование всех разделов курсовой работы, а также подразделов и пунктов, если они имеют наименование, с указанием номеров страниц, на которых размещается начало материала разделов, подразделов, пунктов.

Введение содержит постановку задачи, анализ актуальности и цели моделирования. Во введении дается краткий анализ возможных методов решения поставленной задачи, но так, чтобы он не заслонял основного содержания работы. Указываются литературные источники, по которым делается обзор, позволяющий судить, насколько полно изучена литература по моделированию конкретного процесса. Обзор должен содержать краткую оценку изложенных материалов и принципов моделирования.

Основная часть состоит из разделов, в которых рассматривается сущность проблемы, дается аналитический обзор возможностей исследования заданного объекта моделирования, обоснование выбранного подхода к моделированию, формализация и алгоритмизация модели, описание алгоритмов и программ, инструкций по использованию программ при моделировании, анализ полученных на модели результатов и выводы по их использованию для исследования и разработки объекта моделирования.

В основной части выделяются следующие разделы:

1. *Теоретическое введение.* Описывается и анализируется технология ведения процесса, его основные параметры, устанавливается их связь, производится анализ влияния основных управляющих воздействий на выходные показатели процесса, описываются физико-химические превращения. При этом используются схемы, графики, картинки и т.д.

2. *Математическое моделирование.* Приводится обзор отечественных и зарубежных источников о методах математического моделирования с анализом их преимуществ и недостатков. Обосновывается выбор того или иного метода моделирования для данного технологического процесса. Строятся математические модели с учетом особенностей конкретного процесса. Составленные математические модели проверяются на адекватность.

3. *Постановка задачи оптимизации* (исходя из задания). Ставится задача оптимизации, выбирается критерий оптимальности, записываются ограничения. Для решения задачи оптимизации может использоваться условная и безусловная оптимизация.

4. *Практическое применение.* Здесь прилагается распечатка программы и результатов, а также приводится описание пакета программ (общие сведения, состав и структура пакета, функции программных модулей, входные и выходные данные, эксплуатационные характеристики и особенности пакета, если это требуется по заданию).

В *заключении* делаются выводы о проделанной работе с анализом полученных результатов.

Библиографический список содержит перечень источников, использованных при выполнении курсовой работы. Указываются только те источники, на которые имеются ссылки в тексте пояснительной записки.

Приложение содержит вспомогательный материал (листинги программ, инструкции по пользованию программами и т.п.).

Все части курсовой работы должны быть изложены в строгой логической последовательности и взаимосвязи.

Оформление пояснительной записки по курсовой работе должно соответствовать требованиям СТО СФУ:

1. Машинные текстовые документы должны быть выполнены в текстовом редакторе Word: расширение – .doc или .rtf; размер шрифта – 14; межстрочный интервал – одинарный или полуторный; абзацный отступ – пять знаков.

2. Для заголовков разделов рекомендуется шрифт 14 кегля, допускается выделять их жирным шрифтом.

3. Текст документов, выполненный на листах формата А4 (210×297 мм), без внешней рамки, следует оформлять с соблюдением следующих полей: левое, верхнее и нижнее – 20 мм, правое – 15–17 мм.

4. Абзацы в тексте начинают отступом, равным 15–17 мм.

5. Опечатки, опiski и графические неточности, обнаруженные в процессе выполнения документа, допускается исправлять подчисткой или за-

крашиванием белой краской и нанесением на том же месте исправленного текста (графики).

6. В тексте курсовой работы не должно быть сокращенных слов, за исключением общепринятых.

7. Титульный лист должен соответствовать установленному образцу ([см. прил.](#)).

Законченная пояснительная записка подписывается студентом, руководителем и заведующим кафедрой.

На заключительном этапе выполнения курсовой работы проводится защита, на которую выносятся результаты решения практической задачи и пакет прикладных программ как использованное инструментальное средство.

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

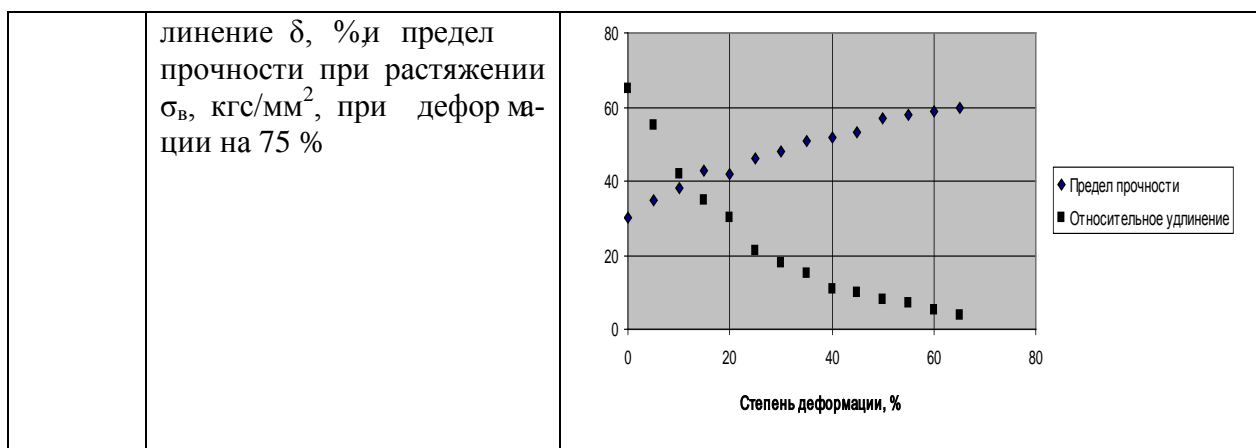
Тематика курсовых работ должна соответствовать основным разделам учебной программы по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии».

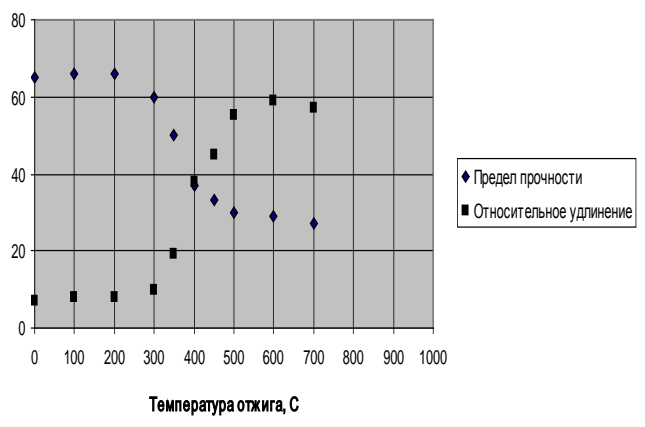
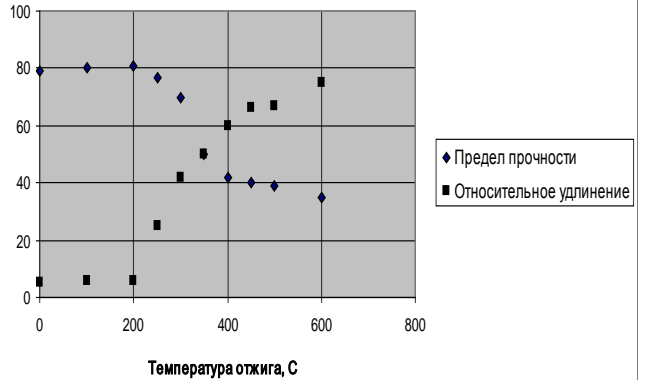
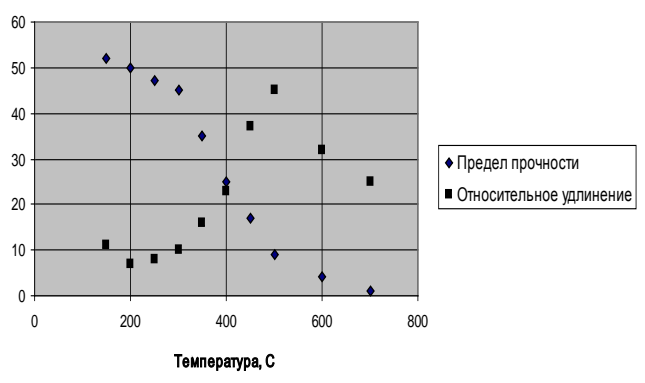
Для выполнения курсовой работы и построения математической модели каждый студент предварительно получает у руководителя курсового проектирования вариант задания, содержащий описание объекта моделирования и численные данные о переменных и параметрах объекта моделирования, характеристики процесса функционирования объекта, которые необходимо оценить в ходе моделирования.

Исходные данные для выполнения курсовой работы представлены в таблице:

Номер варианта	Задание	График																																																
1	Определить зависимость механических свойств латуни ЛН65-5 от степени деформации. Исходный материал – проволока мягкая диаметром от 0,25 мм и более. Спрогнозировать относительное удлинение δ , %, и предел прочности при растяжении σ_b , кгс/мм ² , при деформации на 80 %	<table border="1"> <caption>Данные для графика 1</caption> <thead> <tr> <th>Степень деформации, %</th> <th>Предел прочности, кгс/мм²</th> <th>Относительное удлинение, %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>40</td><td>35</td></tr> <tr><td>5</td><td>45</td><td>32</td></tr> <tr><td>10</td><td>50</td><td>28</td></tr> <tr><td>15</td><td>55</td><td>25</td></tr> <tr><td>20</td><td>60</td><td>22</td></tr> <tr><td>25</td><td>65</td><td>20</td></tr> <tr><td>30</td><td>70</td><td>18</td></tr> <tr><td>35</td><td>75</td><td>16</td></tr> <tr><td>40</td><td>80</td><td>15</td></tr> <tr><td>45</td><td>85</td><td>14</td></tr> <tr><td>50</td><td>90</td><td>13</td></tr> <tr><td>55</td><td>95</td><td>12</td></tr> <tr><td>60</td><td>98</td><td>11</td></tr> <tr><td>65</td><td>100</td><td>10</td></tr> <tr><td>70</td><td>102</td><td>9</td></tr> </tbody> </table>	Степень деформации, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	0	40	35	5	45	32	10	50	28	15	55	25	20	60	22	25	65	20	30	70	18	35	75	16	40	80	15	45	85	14	50	90	13	55	95	12	60	98	11	65	100	10	70	102	9
Степень деформации, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %																																																
0	40	35																																																
5	45	32																																																
10	50	28																																																
15	55	25																																																
20	60	22																																																
25	65	20																																																
30	70	18																																																
35	75	16																																																
40	80	15																																																
45	85	14																																																
50	90	13																																																
55	95	12																																																
60	98	11																																																
65	100	10																																																
70	102	9																																																
2	Определить зависимость механических свойств латуни ЛН65-5 от степени деформации. Исходный материал трубки – манометрические с толщиной стенки 2 мм. Спрогнозировать относительное удлинение δ , %, и предел прочно при растяжении σ_b , кгс/мм ² , при деформации на 70 %	<table border="1"> <caption>Данные для графика 2</caption> <thead> <tr> <th>Степень деформации, %</th> <th>Предел прочности, кгс/мм²</th> <th>Относительное удлинение, %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>40</td><td>35</td></tr> <tr><td>5</td><td>45</td><td>32</td></tr> <tr><td>10</td><td>50</td><td>28</td></tr> <tr><td>15</td><td>55</td><td>25</td></tr> <tr><td>20</td><td>60</td><td>22</td></tr> <tr><td>25</td><td>65</td><td>20</td></tr> <tr><td>30</td><td>70</td><td>18</td></tr> <tr><td>35</td><td>75</td><td>16</td></tr> <tr><td>40</td><td>80</td><td>15</td></tr> <tr><td>45</td><td>85</td><td>14</td></tr> <tr><td>50</td><td>90</td><td>13</td></tr> <tr><td>55</td><td>95</td><td>12</td></tr> <tr><td>60</td><td>100</td><td>11</td></tr> </tbody> </table>	Степень деформации, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	0	40	35	5	45	32	10	50	28	15	55	25	20	60	22	25	65	20	30	70	18	35	75	16	40	80	15	45	85	14	50	90	13	55	95	12	60	100	11						
Степень деформации, %	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %																																																
0	40	35																																																
5	45	32																																																
10	50	28																																																
15	55	25																																																
20	60	22																																																
25	65	20																																																
30	70	18																																																
35	75	16																																																
40	80	15																																																
45	85	14																																																
50	90	13																																																
55	95	12																																																
60	100	11																																																
3	Определить зависимость механических свойств латуни ЛН65-5 от степени деформации. Исходный материал – ленты мягкие толщиной 1,6 мм. Спрогнозировать относительное уд-																																																	

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ



Номер варианта	Задание	График
4	<p>Определить зависимость механических свойств латуни ЛО90-1 от температуры отжига. Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал – полосы толщиной 3 мм, деформированные на 60 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, % и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	 <p style="text-align: center;">Температура отжига, С</p>
5	<p>Определить зависимость механических свойств латуни ЛО70-1 от температуры отжига. Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал – трубы конденсаторные, деформированные на 50 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, % и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 700 °С</p>	 <p style="text-align: center;">Температура отжига, С</p>
6	<p>Определить зависимость изменения механических свойств латуни ЛО70-1 при высоких температурах. Исходный материал – прутки диаметром 25 мм, деформированные на 35 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, % и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	 <p style="text-align: center;">Температура, С</p>

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

7	<p>Определить зависимость изменения механических свойств латуни ЛО60-1 при высоких температурах. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении $\sigma_{в}$, кгс/мм², при 800 °С</p>	
Номер варианта	Задание	График
8	<p>Определить зависимость изменения механических свойств латуни ЛС60-1 при высоких температурах. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении $\sigma_{в}$, кгс/мм², при 800 °С</p>	
9	<p>Определить зависимость изменения механических свойств латуни ЛС60-1, содержащей 0,4 % Ni, при высоких температурах. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении $\sigma_{в}$, кгс/мм², при 800 °С</p>	
10	<p>Определить зависимость механических свойств латуни ЛС59-1 от температуры отжига (58,5 % Cu, 1,2 % Pb, остальное Zn). Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал прутки диаметром 5 мм, деформированные на 15 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении $\sigma_{в}$, кгс/мм², при 800 °С</p>	

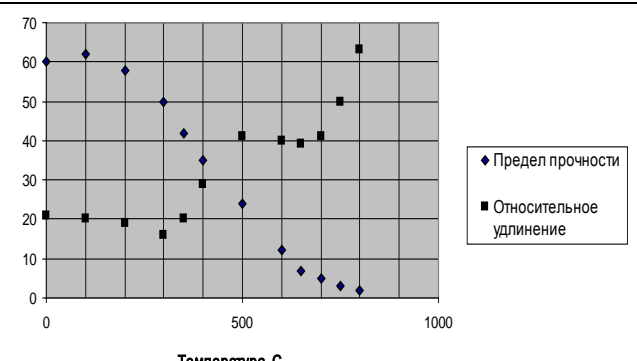
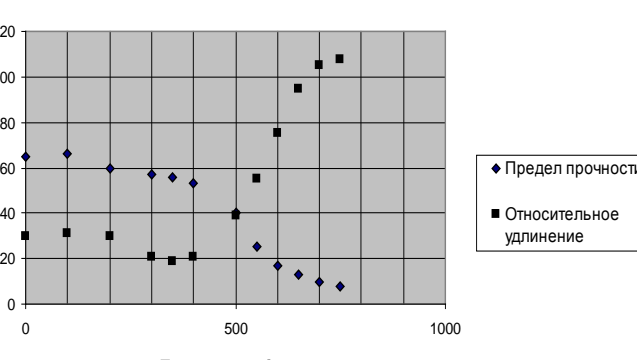
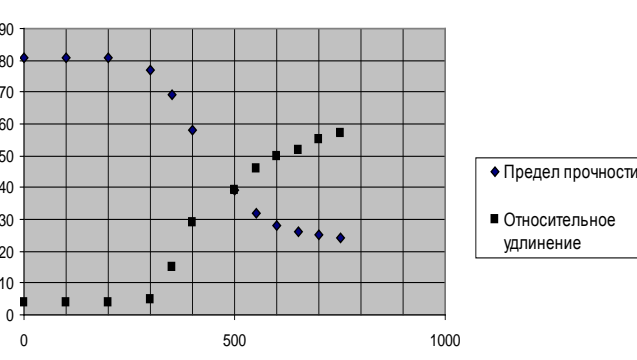
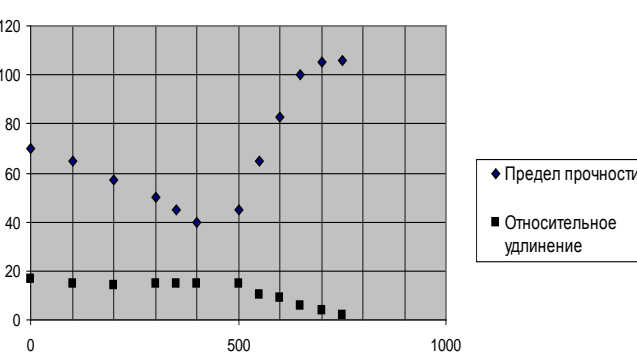
3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

11	<p>Определить зависимость механических свойств литых оловянных бронз от содержания олова. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 15 % Sn (по массе)</p>	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Данные для графика 11</caption> <thead> <tr> <th>Sn, % (по массе)</th> <th>Предел прочности (кгс/мм²)</th> <th>Относительное удлинение (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>22</td><td>50</td></tr> <tr><td>2</td><td>23</td><td>49</td></tr> <tr><td>4</td><td>28</td><td>47</td></tr> <tr><td>6</td><td>32</td><td>43</td></tr> <tr><td>8</td><td>38</td><td>39</td></tr> <tr><td>10</td><td>39</td><td>32</td></tr> <tr><td>12</td><td>38</td><td>24</td></tr> <tr><td>14</td><td>37</td><td>11</td></tr> </tbody> </table>	Sn, % (по массе)	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)	0	22	50	2	23	49	4	28	47	6	32	43	8	38	39	10	39	32	12	38	24	14	37	11			
Sn, % (по массе)	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)																														
0	22	50																														
2	23	49																														
4	28	47																														
6	32	43																														
8	38	39																														
10	39	32																														
12	38	24																														
14	37	11																														
Номер варианта	Задание	График																														
12	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.ОФ7,5-0,4 от температуры отжига. Продолжительность отжига 2 ч. Исходный материал – полосы, деформированные на 20 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 700 °С</p>	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Данные для графика 12</caption> <thead> <tr> <th>Температура отжига, С</th> <th>Предел прочности (кгс/мм²)</th> <th>Относительное удлинение (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>80</td><td>5</td></tr> <tr><td>100</td><td>82</td><td>6</td></tr> <tr><td>200</td><td>80</td><td>9</td></tr> <tr><td>300</td><td>70</td><td>20</td></tr> <tr><td>350</td><td>60</td><td>40</td></tr> <tr><td>400</td><td>50</td><td>60</td></tr> <tr><td>500</td><td>45</td><td>70</td></tr> <tr><td>600</td><td>40</td><td>75</td></tr> <tr><td>700</td><td>38</td><td>80</td></tr> </tbody> </table>	Температура отжига, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)	0	80	5	100	82	6	200	80	9	300	70	20	350	60	40	400	50	60	500	45	70	600	40	75	700	38	80
Температура отжига, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)																														
0	80	5																														
100	82	6																														
200	80	9																														
300	70	20																														
350	60	40																														
400	50	60																														
500	45	70																														
600	40	75																														
700	38	80																														
13	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.ОФ6,5-0,4 от температуры отжига. Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал – прутки твердые диаметром 4 мм. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Данные для графика 13</caption> <thead> <tr> <th>Температура отжига, С</th> <th>Предел прочности (кгс/мм²)</th> <th>Относительное удлинение (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>85</td><td>2</td></tr> <tr><td>100</td><td>83</td><td>4</td></tr> <tr><td>200</td><td>80</td><td>5</td></tr> <tr><td>300</td><td>60</td><td>15</td></tr> <tr><td>350</td><td>50</td><td>40</td></tr> <tr><td>400</td><td>50</td><td>55</td></tr> <tr><td>500</td><td>45</td><td>65</td></tr> <tr><td>600</td><td>40</td><td>65</td></tr> <tr><td>700</td><td>38</td><td>62</td></tr> </tbody> </table>	Температура отжига, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)	0	85	2	100	83	4	200	80	5	300	60	15	350	50	40	400	50	55	500	45	65	600	40	65	700	38	62
Температура отжига, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)																														
0	85	2																														
100	83	4																														
200	80	5																														
300	60	15																														
350	50	40																														
400	50	55																														
500	45	65																														
600	40	65																														
700	38	62																														
14	<p>Определить зависимость изменения механических свойств бронзы Бр.ОФ6,5-0,4, при высоких температурах. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 750 °С</p>	<table border="1" style="display: none;"> <caption>Данные для графика 14</caption> <thead> <tr> <th>Температура, С</th> <th>Предел прочности (кгс/мм²)</th> <th>Относительное удлинение (%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>24</td><td>30</td></tr> <tr><td>100</td><td>30</td><td>33</td></tr> <tr><td>200</td><td>30</td><td>35</td></tr> <tr><td>300</td><td>33</td><td>32</td></tr> <tr><td>350</td><td>31</td><td>27</td></tr> <tr><td>400</td><td>30</td><td>22</td></tr> <tr><td>500</td><td>23</td><td>10</td></tr> <tr><td>600</td><td>15</td><td>5</td></tr> <tr><td>700</td><td>10</td><td>4</td></tr> </tbody> </table>	Температура, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)	0	24	30	100	30	33	200	30	35	300	33	32	350	31	27	400	30	22	500	23	10	600	15	5	700	10	4
Температура, С	Предел прочности (кгс/мм ²)	Относительное удлинение (%)																														
0	24	30																														
100	30	33																														
200	30	35																														
300	33	32																														
350	31	27																														
400	30	22																														
500	23	10																														
600	15	5																														
700	10	4																														

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

15	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.ОФ4-0,5 (наклеп 60 %) от температуры отжига. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 750 °С</p>	
Номер варианта	Задание	График
16	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.ОЦ4-3 от температуры отжига. Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал – полосы твердые толщиной 4 мм. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	
17	<p>Определить зависимость механических свойств алюминиевых бронз от химического состава. Исходный материал – литье в кокиль. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 12 % Al</p>	
18	<p>Определить зависимость механических свойств алюминиевых бронз от химического состава. Исходный материал – полосы, деформированные на 40 % и отожженные при 650 °С, 30 мин. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 12 % Al</p>	

3. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

19	<p>Определить зависимость изменения механических свойств бронзы Бр.АЖМц10-3-1,5 при высоких температурах. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 900 °С</p>	
Номер варианта	Задание	График
20	<p>Определить зависимость механических свойств бериллиевой бронзы Бр.Б2 от температуры испытания. Исходный материал – полоса горячекатаная толщиной 10 мм. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	
21	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.КМц3-1 от температуры отжига. Продолжительность отжига 1 ч. Исходный материал – полосы мягкие, деформированные на 50 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	
22	<p>Определить зависимость изменения механических свойств бронзы Бр.КМц3-1 при высоких температурах. Выдержка при испытании 1 ч. Исходный материал – прутки диаметром 25 мм. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	
23	<p>Определить зависимость механических свойств бронзы Бр.КН1-3 от температуры отжига. Продолжитель-</p>	

	<p>ность отжига 1 ч. Исходный материал – полосы мягкие толщиной 2 мм, деформированные на 70 %. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 800 °С</p>	<p>График зависимости предела прочности (♦) и относительного удлинения (■) от температуры отжига (°C). Ось X: 0, 500, 1000. Ось Y: 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80. Легенда: ♦ Предел прочности, ■ Относительное удлинение.</p> <table border="1"> <caption>Данные для графика 1</caption> <thead> <tr> <th>Температура отжига, °C</th> <th>Предел прочности, кгс/мм²</th> <th>Относительное удлинение, %</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>60</td><td>2</td></tr> <tr><td>50</td><td>60</td><td>2</td></tr> <tr><td>100</td><td>62</td><td>3</td></tr> <tr><td>150</td><td>65</td><td>4</td></tr> <tr><td>200</td><td>68</td><td>5</td></tr> <tr><td>250</td><td>70</td><td>6</td></tr> <tr><td>300</td><td>70</td><td>7</td></tr> <tr><td>350</td><td>65</td><td>8</td></tr> <tr><td>400</td><td>50</td><td>10</td></tr> <tr><td>450</td><td>45</td><td>12</td></tr> <tr><td>500</td><td>42</td><td>15</td></tr> <tr><td>550</td><td>38</td><td>18</td></tr> <tr><td>600</td><td>35</td><td>20</td></tr> <tr><td>650</td><td>35</td><td>22</td></tr> </tbody> </table>	Температура отжига, °C	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %	0	60	2	50	60	2	100	62	3	150	65	4	200	68	5	250	70	6	300	70	7	350	65	8	400	50	10	450	45	12	500	42	15	550	38	18	600	35	20	650	35	22
Температура отжига, °C	Предел прочности, кгс/мм ²	Относительное удлинение, %																																													
0	60	2																																													
50	60	2																																													
100	62	3																																													
150	65	4																																													
200	68	5																																													
250	70	6																																													
300	70	7																																													
350	65	8																																													
400	50	10																																													
450	45	12																																													
500	42	15																																													
550	38	18																																													
600	35	20																																													
650	35	22																																													
Номер варианта	Задание	График																																													
24	<p>Определить зависимость твердости HV, кгс/мм², закаленной и деформированной циркониевой бронзы от температуры отпуска. Исходный материал – проволока, деформированная на 90 %. Спрогнозировать твердость при 700 °С</p>	<p>График зависимости твердости HV (♦) от температуры отжига (°C) для Cu+0,19% Zr (♦) и Cu+0,03% Zr (■). Ось X: 0, 200, 400, 600, 800. Ось Y: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90. Легенда: ♦ Cu+0,19% Zr, ■ Cu+0,03% Zr.</p> <table border="1"> <caption>Данные для графика 2</caption> <thead> <tr> <th>Температура отжига, °C</th> <th>Твердость HV, Cu+0,19% Zr</th> <th>Твердость HV, Cu+0,03% Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>50</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>100</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>150</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>200</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>250</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>300</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>350</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>400</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>450</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>500</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>550</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>600</td><td>45</td><td>35</td></tr> <tr><td>650</td><td>45</td><td>35</td></tr> </tbody> </table>	Температура отжига, °C	Твердость HV, Cu+0,19% Zr	Твердость HV, Cu+0,03% Zr	0	45	35	50	45	35	100	45	35	150	45	35	200	45	35	250	45	35	300	45	35	350	45	35	400	45	35	450	45	35	500	45	35	550	45	35	600	45	35	650	45	35
Температура отжига, °C	Твердость HV, Cu+0,19% Zr	Твердость HV, Cu+0,03% Zr																																													
0	45	35																																													
50	45	35																																													
100	45	35																																													
150	45	35																																													
200	45	35																																													
250	45	35																																													
300	45	35																																													
350	45	35																																													
400	45	35																																													
450	45	35																																													
500	45	35																																													
550	45	35																																													
600	45	35																																													
650	45	35																																													
25	<p>Определить зависимость изменения механических свойств мельхиора МН19 при высоких температурах. Исходный материал -прутки диаметром 25 мм (с величиной зерна 0,035 мм), деформированные на 20 %. Выдержка при температуре испытания 1 ч. Спрогнозировать относительное удлинение δ, %, и предел прочности при растяжении σ_B, кгс/мм², при 1 000 °С</p>	<p>График зависимости механических свойств (♦) от температуры отжига (°C) для Cu+0,19% Zr (♦) и Cu+0,03% Zr (■). Ось X: 0, 200, 400, 600, 800. Ось Y: 50, 70, 90, 110, 130, 150, 170. Легенда: ♦ Cu+0,19% Zr, ■ Cu+0,03% Zr.</p> <table border="1"> <caption>Данные для графика 3</caption> <thead> <tr> <th>Температура отжига, °C</th> <th>Свойство, Cu+0,19% Zr</th> <th>Свойство, Cu+0,03% Zr</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>50</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>100</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>150</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>200</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>250</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>300</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>350</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>400</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>450</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>500</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>550</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>600</td><td>130</td><td>110</td></tr> <tr><td>650</td><td>130</td><td>110</td></tr> </tbody> </table>	Температура отжига, °C	Свойство, Cu+0,19% Zr	Свойство, Cu+0,03% Zr	0	130	110	50	130	110	100	130	110	150	130	110	200	130	110	250	130	110	300	130	110	350	130	110	400	130	110	450	130	110	500	130	110	550	130	110	600	130	110	650	130	110
Температура отжига, °C	Свойство, Cu+0,19% Zr	Свойство, Cu+0,03% Zr																																													
0	130	110																																													
50	130	110																																													
100	130	110																																													
150	130	110																																													
200	130	110																																													
250	130	110																																													
300	130	110																																													
350	130	110																																													
400	130	110																																													
450	130	110																																													
500	130	110																																													
550	130	110																																													
600	130	110																																													
650	130	110																																													

Далее, руководствуясь методикой выполнения курсовой работы и используя пакеты прикладных программ, разрабатывает математическую модель или решает оптимизационную задачу.

Студент, заканчивая очередной этап работы (согласно графику выполнения курсовой работы), представляет готовый материал (описания, схемы алгоритмов и программ, листинги программ и т.п.) для проверки правильности полученных промежуточных результатов и направления хода дальнейших работ по моделированию конкретного процесса.

4. СЕМЕСТРОВЫЙ ГРАФИК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Наименование дисциплины	Се-местр	Часов на курсовую работу		Недели учебного процесса семестра																
		Все-го	По видам	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Моделирование процессов и объектов в металлургии	9	57	ТО – 34	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО	ТО
			КР – 23		ВКР			РКР							РКР					РКР

График выполнения курсовой работы студентов по дисциплине «Моделирование процессов и объектов в металлургии» приведен в таблице:

Условные обозначения: ТО – изучение теоретического курса; КР – курсовая работа; ВКР – выдача курсовой работы; РКР – выполнение курсовой работы; СКР – сдача курсовой работы.

В соответствии с этим графиком преподавателю рекомендуется проверять ход выполнения курсовой работы студентами, что позволяет обеспечить их равномерную загрузку и возможность вмешательства в случае появления ошибок.

Руководитель указывает сроки проведения промежуточного контроля в задании на курсовую работу.

Рекомендуется осуществлять контроль, ориентируясь на следующие этапы выполнения курсовой работы.

Подготовительный этап (2–5-я недели). Студент должен понять поставленную задачу моделирования технологического процесса и ознакомиться с рекомендованной литературой и подготовить обзор. Целью проверки является оценка степени теоретической и практической подготовленности студентов, правильности понимания ими поставленной задачи моделирования и умения проводить системный анализ различных вариантов.

Проектный и реализационный этап (6–11-я недели). На этом этапе студент должен рассмотреть различные пути решения поставленной задачи, предложить критерий оценки эффективности полученных результатов моделирования и оценить с его помощью различные варианты. На этом этапе разрабатывается алгоритмическое и программное обеспечение моделирования. Целью проверки является оценка правильности выбранных алгоритмических решений и возможностей программной реализации модели на ЭВМ, контроль правильности разработанного программного обеспечения моделирования и оценка корректности полученных результатов моделирования с привлечением соответствующих статистических методов.

Оформительский этап (16-я неделя). Студент обязан оформить пояснительную записку и графический материал в соответствии с требованиями к оформлению пояснительной записки ([см. п. 2](#)). Целью проверки является

ся контроль знаний по оформлению пояснительной записки и подготовленность студента к защите курсовой работы.

Заключительный этап (17-я неделя). На этом этапе осуществляется защита курсовой работы. Методика проведения защиты курсовой работы рассмотрена в следующем разделе.

5. МЕТОДИКИ ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

5.1. Постановка задачи математического моделирования

Моделирование как метод исследования процессов (систем) включает в себя две составляющие – построение модели и использование ее для исследования свойств и поведения объекта. Одному и тому же объекту – оригиналу – в зависимости от целей моделирования может соответствовать большое число моделей, отражающих разные его стороны и поэтому имеющих разную структуру.

Построение математических моделей состоит из следующих основных этапов: формулировки целей моделирования; выделения объекта моделирования из среды; построения модели отдельных технологических блоков; переноса знаний с модели на объект.

Выделение объекта моделирования из среды

Начальный этап моделирования состоит из определения границ объекта. Выделение объекта *в пространстве* представляет собой определение граничных емкостей технологического процесса, основных и вспомогательных рабочих агрегатов объекта, направления материальных и энергетических потоков.

При изучении объекта *во времени* выбирают временной интервал функционирования модели (для аппаратов периодического действия – длительность рабочего цикла; для непрерывных производств – межремонтный срок).

В *пространстве координат* поведение объекта тесно связано с целью управления, так как из всей совокупности входных переменных, характеризующих протекание процессов, необходимо выбрать те величины, которые будут изменяться при решении задач исследования или управления.

Математическая модель процесса или объекта в общем виде представляется зависимостью

$$\bar{Y}(t) = \varphi\{\bar{U}(t), \bar{X}(t), \bar{P}\},$$

где $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$ – вектор выходных переменных; $\bar{U} = (U_1, U_2, \dots, U_k)$ – вектор управляющих воздействий; $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ – вектор входных переменных; $\bar{P} = (P_1, P_2, \dots, P_L)$ – вектор внутренних параметров; $\varphi\{\bar{U}(t), \bar{X}(t), \bar{P}\}$ – вектор-функция, зависящая от управляющих воздействий, входных воздействий и внутренних параметров.

Наиболее полное отображение процессов в реальных объектах дают системы алгебраических (статика процессов) и дифференциальных уравне-

ний (динамика процессов), которые широко используются в математическом моделировании.

В основе методологии построения математических моделей стохастических процессов и зависимостей, отражающих взаимосвязи между данными, полученными экспериментальным путем, лежит теория случайных величин и регрессионный анализ.

К ним относятся управляющие воздействия $\bar{U} = (U_1, U_2, \dots, U_k)$; входные воздействия $\bar{X} = (X_1, X_2, \dots, X_n)$; выходные параметры $\bar{Y} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_m)$.

Далее следует определить *подход*, на базе которого будет осуществляться построение модели. *Теоретический подход* влечет за собой построение модели на основе соотношений, вытекающих из физических законов. Этот путь применяется, когда законы известны априори. *Формальный подход* строится на основе «черного ящика», когда информация о законах протекания процесса отсутствует или объект очень сложен и не поддается описанию.

В дальнейшем по имеющейся исходной информации выбирается *вид модели*. Этот выбор осуществляется на основании требований к объему и качеству исходных данных.

При выборе *детерминированных моделей* следует отметить ряд преимуществ: их можно разработать даже при отсутствии действующего объекта (например, на стадии проектирования); они качественно более правильно характеризуют процессы, протекающие в объекте, даже при наличии недостаточно точных в количественном отношении параметров модели; они пригодны для прогноза поведения процесса.

Построение *стохастических моделей* следует осуществлять при неполной информации об объекте из-за его сложности и большого числа подпроцессов, невозможности описать все входы и если влияние ненаблюдаемых переменных на выходные существенно.

Динамические модели дают наиболее полное представление о поведении системы, технологического объекта в динамике. Однако их использование приводит иногда к сложным вычислительным задачам. Поэтому, если можно пренебречь динамикой, применяют *статистические модели*, которые описывают системы в статике.

В качестве *методов экспериментального определения* выделяют пассивные и активные методы.

Пассивные методы экспериментального определения предполагают наблюдение за ходом процесса без влияния на процесс.

Активные методы экспериментального определения предусматривают не только наблюдения, но и внесение управляющих воздействий в процесс.

1. Определение подхода			
Теоретический		Формальный	
2. Выбор вида модели			
Детерминированная		Стохастическая	
Статическая	Динамическая	Статическая	Динамическая
3. Выбор методов экспериментального определения			
Пассивные		Активные	

Рис. 1. Классические подходы к выбору модели

Рассмотренные этапы можно представить в виде упрощенной схемы (рис. 1).

Методы проверки гипотез адекватности структуры модели

Об адекватности структуры модели можно судить по коэффициенту корреляции r (корреляционному отношению η), гистограмме распределения остатков и содержательному анализу остатков.

Корреляция – это связь между двумя или несколькими величинами или исследуемыми объектами. Корреляция бывает двух видов: *детерминированная* (определяется строгими закономерностями и обычно описывается физико-химическими формулами) и *стохастическая* (случайная, вероятностная – проявляется в том, что одна из величин влияет на изменение другой изменениями своего закона распределения).

Характеристикой системы двух случайных величин, описывающей связь между ними, является **коэффициент корреляции**

$$r_{xy} = \frac{M \left[(X - m_x) (Y - m_y) \right]}{\sigma_x \sigma_y},$$

где m_x, m_y – сокращенное обозначение математического ожидания величины X и Y , соответственно, $m_x = M[X]$, $m_y = M[Y]$. Если $r_{xy} = 0$, то корреляционная связь между величинами отсутствует.

Зависимость между случайными величинами называется **регрессией**. Она понимается как зависимость между математическими ожиданиями этих величин.

Форма связи между случайными величинами определяется линией регрессии, показывающей, как в среднем изменяется величина Y при изменении величины X , что характеризуют условным математическим ожиданием $m_{y/x}$ величины Y , вычисляемым при $X = x$. Таким образом, кривая регрессии Y на X есть зависимость условного математического ожидания Y от известного значения X .

Задача регрессионного анализа ставится следующим образом: для каждого i -го опыта имеется набор значений входных параметров $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$ и соответствующее этому набору значение выходного параметра Y .

Необходимо определить зависимость выходного параметра Y от входных факторов $X_{1i}, X_{2i}, \dots, X_{ni}$, которая в случае, например, линейной связи может иметь следующий вид:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + \dots + b_nX_n.$$

Такая зависимость называется *линейной регрессией*. Любая другая зависимость называется *нелинейной регрессией*.

Задача сводится к тому, чтобы при измеренных во время опытов значениях входных переменных X_1, X_2, \dots, X_n и выходной переменной Y определить коэффициенты уравнения регрессии $b_0, b_1, b_2, \dots, b_n$, которые с определенной степенью вероятности будут отражать влияние аргументов X_1, X_2, \dots, X_n на Y .

Регрессионная зависимость вида $Y = f(X_i)$ называется *однофакторной* или *парной* и описывает связь между двумя переменными: входной X и выходной Y .

Регрессионная зависимость вида $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ называется *многофакторной* или *множественной* и описывает связь между несколькими входными X_1, X_2, \dots, X_n и одной выходной Y .

Построение и исследование регрессионной модели состоит из четырех этапов.

1. Проверка наличия стохастической связи между исследуемыми величинами. Для этого нужно определить по значению r_{xy} , существует ли корреляционная связь между X и Y .

2. Выбор вида уравнения регрессии. Вид уравнения регрессии выбирается исходя из особенностей изучаемой системы случайных величин. Один из возможных подходов при этом – экспериментальный подбор типа уравнения регрессии по соответствующим критериям адекватности. В случае же, когда имеется определенная априорная (доопытная) информация об объекте, более эффективным является использование для этой цели теоретических представлений о процессах и типах связей между изучаемыми параметрами.

3. Расчет параметров (коэффициентов) уравнения регрессии. Для определения параметров (коэффициентов) уравнения регрессии используется метод наименьших квадратов (МНК). Сущность метода заключается в том, что выбирается такая линия регрессии, при которой сумма квадратов разностей между экспериментальными значениями выходной переменной Y_i , полученными на объекте, и значениями, рассчитанными по выбранной регрессионной формуле (модели) $\tilde{Y}_i = f(X_i)$, будет минимальной:

$$q = \sum_{i=1}^n (Y_i - \tilde{Y}_i)^2 \Rightarrow \min ,$$

где q – критерий близости модели и объекта, называемый невязкой модели; n – количество экспериментальных данных.

Задача построения линейной модели сводится к минимизации функции невязки следующего вида:

$$q = \sum_{i=1}^n [Y_i - (b_0 + b_1x_{1i} + b_2x_{2i} + \dots + b_nx_{ni})]^2 \Rightarrow \min.$$

В качестве нелинейных регрессионных моделей чаще всего используются полиномы разной степени:

$$Y_i = b_0 + b_1X_i + b_2X_i^2 + b_3X_i^3 + \dots + b_mX_m^{m-1}.$$

4. Проверка адекватности структуры модели. Об адекватности структуры модели можно судить по коэффициенту корреляции r или корреляционному отношению η , гистограмме распределения остатков и содержательному анализу остатков модели.

Коэффициент корреляции r характеризует степень тесноты линейной связи между \tilde{Y} и Y и приближенное значение r определяется по формуле

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i Y_i - \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i \sum_{i=1}^n Y_i}{\sqrt{\left[n \sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \tilde{Y}_i \right)^2 \right] \left[n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2 \right]}}, \quad (1)$$

где n – число экспериментальных данных. Коэффициент корреляции изменяется от -1 до $+1$.

Корреляционное отношение η характеризует степень тесноты нелинейной связи между переменными \tilde{Y} и Y и рассчитывается по формуле

$$\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}, \quad (2)$$

где \tilde{Y}_i – текущее значение параметра Y , вычисленное по математической модели; Y_i – текущее значение, полученное на объекте; \bar{Y} – выборочное среднее значение,

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i. \quad (3)$$

Корреляционное отношение изменяется от 0 до $+1$.

Следует иметь в виду, что коэффициент корреляции является частным случаем корреляционного отношения и используется обычно только при ис-

следовании линейных моделей. Диапазон изменения коэффициента корреляции (корреляционного отношения) указывает на корреляцию (связь) между \tilde{Y} и Y .

Выводы о степени адекватности модели делаются не только на основании значения коэффициента корреляции или корреляционного отношения, но и на основании гистограммы распределения и содержательного анализа остатков модели.

Гистограмма распределения остатков модели строится следующим образом. Весь диапазон изменения остатков (от минимального из остатков до максимального) разбивается на несколько равных интервалов, или поддиапазонов (обычно от 6 до 20), которые откладываются на оси абсцисс. Далее на оси ординат отмечается число попаданий остатка в каждый интервал, или поддиапазон. Число попаданий ошибки можно откладывать как в натуральных показателях, так и в процентном соотношении. При адекватности модели реальному объекту гистограмма распределения приобретает колоколообразный вид, при неадекватности модели она имеет несимметричный характер или второй горб ([рис. 2](#)).

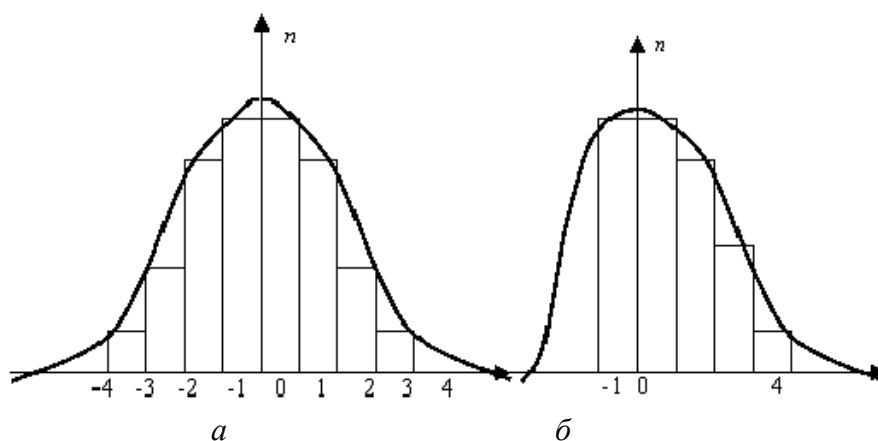


Рис. 2. Гистограмма распределения остатков: *a* – при адекватности модели объекту управления; *б* – при неадекватности модели объекту управления

Содержательный анализ остатков модели состоит в построении распределения остатков модели в зависимости от времени t , от входного параметра X , выходного параметра Y . Графики возможных зависимостей остатков (ошибки) модели от вектора входных параметров X представлен на [рис. 3](#).

Попадание большинства данных в горизонтальную полосу свидетельствует о том, что наши предположения оправданы, т.е. модель адекватна объекту управления. Графики для случаев неадекватности модели объекту управления имеют вид, аналогичный [рис. 3, б–г](#).

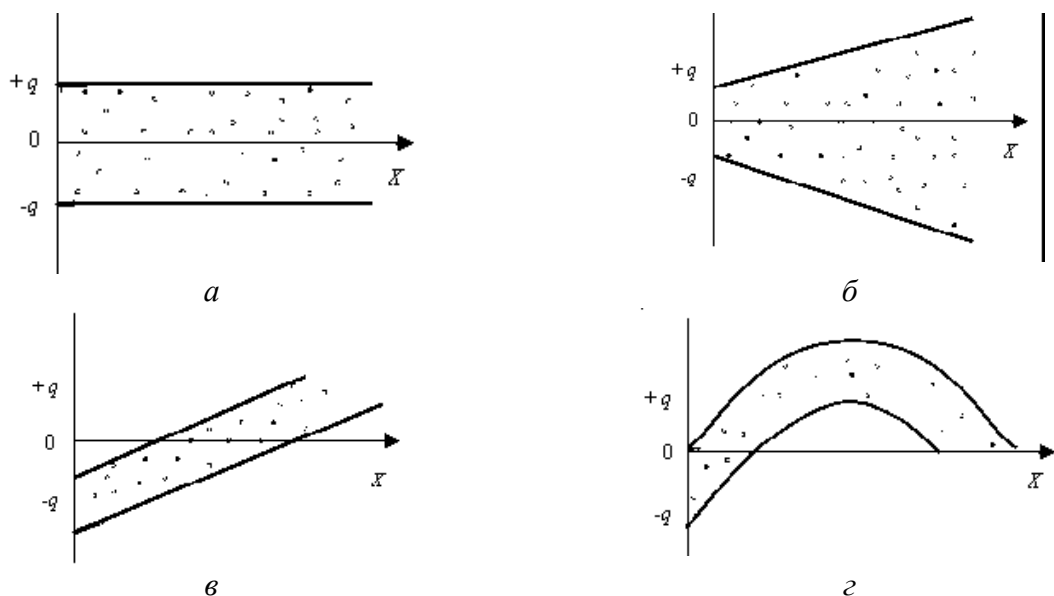


Рис. 3. Графики зависимости остатков от t : a – эффект времени не влияет на ошибку; $б$ – дисперсия непостоянна, необходимо использование взвешенного метода наименьших квадратов; $в$ – следует включить в модель линейный член; $г$ – необходимо включить в модель линейный и квадратичный члены

Графики остатков по каждой из независимых переменных x строят и анализируют соответствующим образом.

Большой интерес при исследовании остатков могут представлять *выбросы*, т.е. значительные отклонения параметров от установленного закона распределения. С точки зрения получения устойчивых средних значений выбросы за зону шириной $\pm 3\sigma$ рекомендуется не учитывать.

Окончательное суждение об адекватности модели принимают на основании анализа коэффициента корреляции, гистограммы распределения и содержательного анализа остатков.

5.2. Методика решения оптимизационных задач

Решение оптимизационных задач предусматривает выполнение следующих этапов: 1) выбор цели проведения оптимизационных исследований; 2) определение границ системы, подлежащей оптимизации; 3) обоснование характеристического критерия, по которому осуществляется оптимизация; 4) выбор независимых переменных; 5) построение объекта системы.

Определение границ системы

Прежде чем приступить к оптимальному исследованию, важно четко определить границы изучаемой системы. Границы системы задаются пределами, отделяющими систему от внешней среды, и служат для выделения системы из её окружения. При проведении анализа обычно предполагается, что взаимосвязь между системой и внешней средой зафиксирована на некотором выбранном уровне. В ряде случаев может оказаться, что первоначальный вы-

бор границы был слишком жестким. Для более полного анализа может возникнуть необходимость расширения установленных границ системы путем включения дополнительных подсистем.

Обоснование характеристического критерия

При выборе характеристического критерия, по которому осуществляется оптимизация, необходимо иметь в виду, что все критерии подразделяются на обобщенные (экономические) и частные (технические). К *обобщенным* относят чистую прибыль, валовые капитальные затраты, издержки в единицу времени и т.д. Следует отметить, что обобщенные (экономические) критерии являются наиболее мощными, но они не могут быть использованы по техническим возможностям для текущей оценки состояния объекта управления и определения воздействий с процессом.

Кроме обобщенных используют *частные критерии*, основанные на некоторых технологических факторах. Эти критерии могут быть измерены в текущий момент времени. К ним относятся, например, производительность оборудования, удельный расход электроэнергии, крутящий момент на валу двигателя и т.д.

Независимо от того, какой критерий выбирается в качестве главного (первичного) при оптимизации, наилучшему варианту всегда соответствует минимальное или максимальное значение характеристического показателя качества функционирования системы.

Выбор независимых переменных

На этом этапе постановки задачи оптимизации осуществляется выбор независимых переменных, которые должны адекватно описывать проектируемые объекты или условия функционирования системы. В процессе выбора независимых переменных необходимо принимать во внимание следующее.

Во-первых, нужно провести различие между переменными, значения которых могут изменяться в широких пределах, и переменными, значения которых фиксируются и определяются внешними факторами. К первым можно отнести текущие параметры технологического режима, ко вторым – сорт металла, технические условия на оборудование и т.д.

Во-вторых, при постановке задачи следует учитывать все основные переменные, которые влияют на функционирование системы или качество проекта.

В-третьих, при выборе переменных существенное влияние на решение оптимизационной задачи оказывает уровень детализации при исследовании системы. Очень важно рассмотреть все главные независимые переменные, но нельзя перегружать задачу большим количеством мелких несущественных деталей.

Построение объекта системы

На этом этапе необходимо построить модель, которая описывает взаимосвязь между переменными задачи и отражает влияние независимых переменных на степень достижения цели, определяемой характеристическим критерием.

В самом общем виде структура модели включает основные уравнения материального и энергетического балансов, соотношения, связанные с проектными решениями, а также уравнения, описывающие физические процессы, которые протекают в системе. Эти уравнения обычно дополняются неравенствами, которые определяют область допустимых значений независимых переменных и позволяют установить требования, накладываемые на верхние или нижние границы изменения характеристик функционирования системы, и лимиты имеющихся ресурсов.

Таким образом, элементы модели содержат всю необходимую информацию, которая используется при расчете решений оптимизационных задач. Для решения оптимизационной задачи функционирования объекта могут использоваться как методы условной, так и безусловной оптимизации.

5.3. Методика выполнения работы в пакете MS EXCEL

Рассмотрим методику решения задач нахождения коэффициентов регрессионной модели. Ниже с помощью средства поиска решений будет решена задача нахождения уравнения регрессии для одной зависимой и одной независимой переменных. Хотя данная модель имеет очень специфический вид, описанный подход позволяет исследовать любое уравнение регрессии. При-

ведены функции $z = \sum_{i=1}^n$ рабочего листа, с помощью которых непосредствен-

но вычисляются различные характеристики линейного уравнения регрессии, которые позволяют значительно упростить процедуру регрессионного анализа для этих наиболее часто встречающихся на практике моделей.

Общий подход к построению управления регрессии на примере линейной модели

Рассмотрим, как решается задача нелинейной оптимизации с помощью средства поиска решений на примере построения линейного уравнения регрессии. Имеются две наблюдаемые величины x и y , например, производительность предприятия за шесть недель его работы. Значения этих наблюдаемых величин приведены на [рис. 4](#), [рис. 5](#), где x – отчетная неделя, а y – выпуск за эту неделю.

Необходимо построить линейную модель $y = mx + b$, наилучшим образом описывающую наблюдаемые значения. Обычно коэффициенты m и b подбираются так, чтобы минимизировать сумму квадратов разностей между наблюдаемыми и теоретическими значениями зависимой переменной y , т.е.

$$z = \sum_{i=1}^n (y_i - mx_i - b)^2 \rightarrow \min, \quad (4)$$

где n – число наблюдений (в данном случае $n = 6$); y_i – экспериментальные данные; $mx_i - b$ – данные, полученные в результате расчетов.

	А	В	С	Д	Е
1	Экспериментальные данные		Расчетные значения		
2	X_i	Y_i	Y_i теор.	$q=Y_i - Y_i$ теор.	
3	1	1			
4	2	5			
5	3	6			
6	4	5			
7	5	4			
8	6	3			
9	7	4			
10	8	6			
11	9	9			
12	10	10			
13					
14					
15					

Рис. 4. Исходные данные для построения модели

Построить точечный график по диапазону ячеек A3:B12, выделить точки графика щелчком левой кнопки мыши в диапазоне точек на графике, а затем щелкнуть на них правой кнопкой.

Существует несколько способов для решения этой задачи. Рассмотрим решения с помощью построения линии тренда (Trendline).

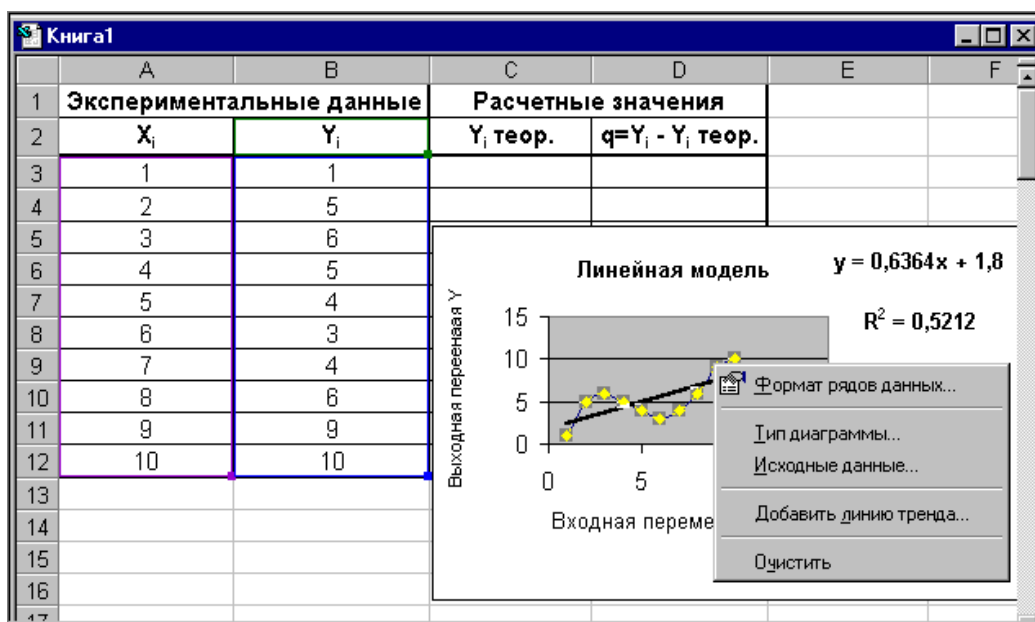


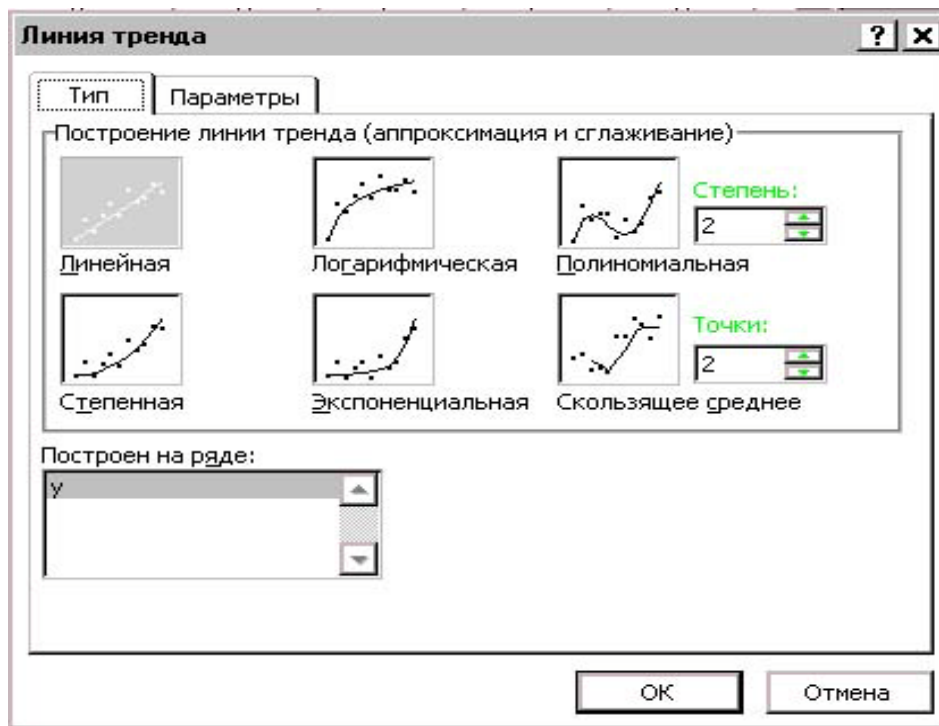
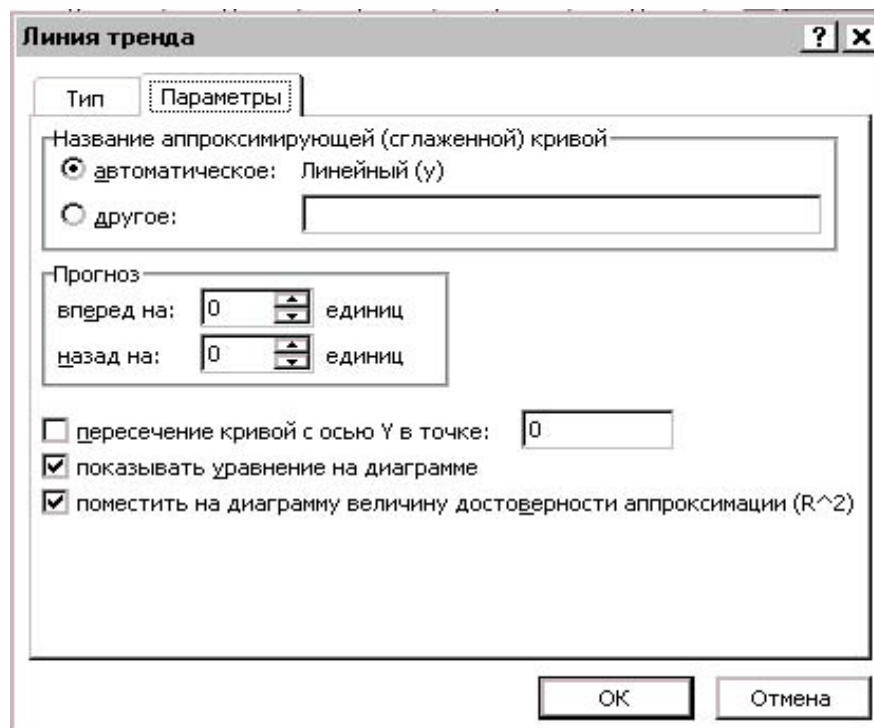
Рис. 5. Начало построения линии тренда

Вначале нужно построить точечный график по диапазону ячеек А3:В12, затем выделить точки графика щелчком левой кнопки мыши в диапазоне точек на графике, а затем щелкнуть их правой кнопкой. В раскрывшемся контекстном меню следует выбрать команду **Добавить линию тренда** (рис. 5).

В диалоговом окне **Линия тренда** (Trendline) на вкладке **Тип** (Type) в группе **Построение линии тренда (аппроксимация и сглаживание)** (Trend/Regression type) выбрать параметр **Линейная** (Linear) (рис. 6), а на вкладке **Параметры** (Options) установить флажки **Показывать уравнение на диаграмме** (Display Equation on Chart) и **Поместить на диаграмму величину достоверности аппроксимации (R^2)** (Display R-squared), т.е. на диаграмму необходимо поместить значение квадрата коэффициента корреляции (рис. 7).

По коэффициенту корреляции можно судить о правомерности использования линейного уравнения регрессии. Если он лежит в диапазоне от 0,9 до 1, то данную зависимость можно использовать для предсказания результата. Чем ближе к единице коэффициент корреляции, тем более обоснованно это указывает на линейную зависимость между наблюдаемыми величинами. Если коэффициент корреляции близок к -1 , то это свидетельствует об обратной зависимости между наблюдаемыми величинами.

Флажок **Пересечение кривой с осью Y в точке** (Set Intercept) (рис. 7) устанавливается только в том случае, если эта точка известна. Например, если этот флажок установлен и в его поле введен 0, это означает, что ищется модель уравнения $y = mx$.

Рис. 6. Вкладка **Тип** диалогового окна **Линия тренда**Рис. 7. Вкладка **Параметры** диалогового окна **Линия тренда**

Результат выполнения команды **Линия тренда** (Trend-line) приведен на [рис. 8](#).

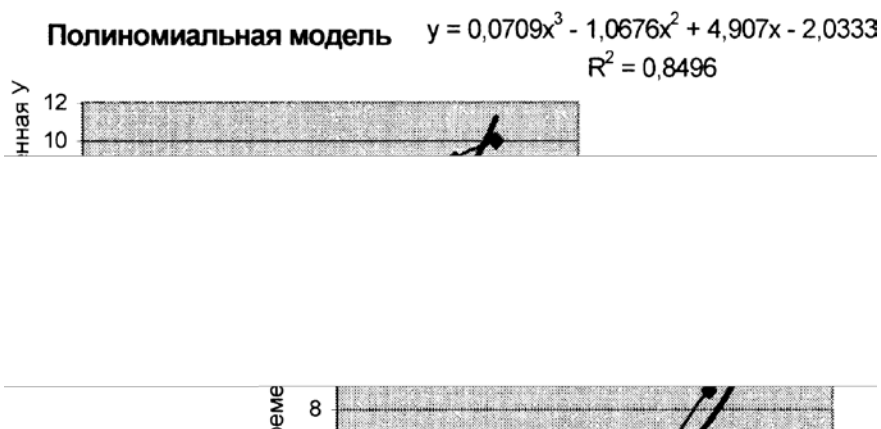


Рис. 8. График линии тренда полиномиальной модели

При малом коэффициенте корреляции необходимо проверить модель на линейность. Если она нелинейна, то аналогично построить линии тренда для других моделей: логарифмической, полиномиальной, степенной, экспоненциальной. Для этого нужно выделить линию тренда с помощью щелчка левой кнопки. Потом вызвать контекстное меню с помощью правой кнопки мыши и выбрать опцию **Формат линии тренда**. Затем выбрать другую модель и также по приведенному выше алгоритму построить линию и найти уравнение и коэффициент корреляции.

Для полиномиальной модели (рис. 8) коэффициент корреляции получился более близким к 1, поэтому в качестве расчетной следует выбрать именно эту модель.

В диалоговом окне **Линия тренда** на вкладке **Параметры** в разделе **Прогноз** (см. рис. 7) можно увидеть поведение функции **вперед** и **назад** на определенное количество единиц.

Расчет теоретических значений по модели. Проверка модели на адекватность

Последовательность проведения расчета теоретических значений по заданной модели и проверка ее на адекватность изложены в лабораторном практикуме [3, с. 4–16].

5.4. Методика проведения защиты

Выполнение курсовой работ рассчитано на один семестр.

Постановка задачи моделирования технологического процесса или объекта определяет подход к построению модели, который включает в себя следующие операции:

1. Анализ состояния технологического процесса с целью оценки возможности использования математических методов для описания функционирования технологического процесса.

2. Построение математической модели на основе регрессионного анализа или использования уравнений физико-химических превращений и уравнений материального баланса.

3. Решение оптимизационной задачи, которая предусматривает выбор оптимальных значений параметров на основе методов условной и безусловной оптимизации, в соответствии с заданием. Распределение вариантов работы осуществляется преподавателем кафедры – руководителем курсового проектирования.

4. Анализ полученных результатов.

Как указывалось выше (см. п. 4), на заключительном этапе проводится защита курсовой работы.

Студент обязан представить руководителю окончательно оформленную записку к курсовой работе не позже чем за два дня до защиты. На заключительном этапе проводятся подготовка доклада и защита курсовой работы перед комиссией. Доклад должен сопровождаться демонстрацией иллюстративного материала в виде презентации в MS PowerPoint. Для доклада студенту отводится 5–7 мин, в связи с чем необходимо тщательно продумать его содержание, а также составить тезисы выступления и согласовать их с руководителем. В докладе в сжатой и четкой форме следует представить поставленную задачу, основное содержание курсовой работы, иллюстрируя принципиальные положения графическим материалом. При необходимости более подробных сведений члены комиссии будут задавать соответствующие вопросы.

При подготовке доклада основное внимание нужно обратить на последовательность изложения:

1. Тема курсовой работы.
2. Постановка задачи моделирования процессов или объектов.
3. Краткий анализ состояния изучаемого вопроса. Обоснование и принятие решения по машинному моделированию.
4. Анализ полученных результатов моделирования.

В результате выполнения курсовой работы по «Моделированию процессов и объектов» студент должен научиться работать с научно-технической литературой.

Выполнение курсовой работы дает возможность студенту подготовиться к решению более сложной задачи, завершающей обучение, – дипломному проектированию на базе использования метода моделирования на ЭВМ для принятия обоснованных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вержбицкий, В. М. Основы численных методов / В. М. Вержбицкий. – М. : Высш. шк., 2002.
2. Моделирование процессов и объектов в металлургии : конспект лекций / Б. М. Горенский, А. Ш. Любанова, С. В. Капустина [и др.]. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Моделирование процессов и объектов в металлургии : УМКД № 214-2007 / рук. творч. коллектива А. Ш. Любанова).
3. Моделирование процессов и объектов в металлургии : лаб. практикум / Б. М. Горенский, Л. А. Лапина, А. Ш. Любанова, Р. А. Шигапов. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008. – (Моделирование процессов и объектов в металлургии : УМКД № 214-2007 / рук. творч. коллектива А. Ш. Любанова).
4. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс : учеб. пособие / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1988.
5. Любанова, А. Ш. Методы оптимизации : учеб. пособие / А. Ш. Любанова; ГАЦМиЗ. – Красноярск, 2002.
6. Новые информационные технологии в управлении металлургическими процессами : лаб. практикум / Б. М. Горенский, Г. Б. Даныкина, О. В. Кирякова; ГУЦМиЗ. – Красноярск, 2006.
7. Новиков, Ф. А. Дискретная математика для программистов : учеб. пособие / Ф. А. Новиков. – СПб. : Питер, 2000.
8. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах / А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – М. : Высш. шк., 2002.
9. СТО 4.2-07-2008. Система менеджмента качества. Общие требования к построению, изложению и оформлению документов учебной и научной деятельности / разработ. Т. В. Сильченко, Л. В. Белошапко, В. К. Младенцева, М. И. Губанова. – Введ. впервые 09.12.2008. – Красноярск : ИПК СФУ, 2008.
10. Советов, Б. Я. Моделирование систем : учеб. пособие / Б. Я. Советов, С. А. Яковлев. – М. : Высш. шк., 1998.
11. Реклейтис, Г. Оптимизация в технике : в 2 кн. : учеб. / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М. : Мир, 1986.
12. Цымбал, В. П. Математическое моделирование металлургических процессов : учеб. пособие / В. П. Цымбал. – М. : Металлургия, 1986.

ПРИЛОЖЕНИЕ

ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Сибирский федеральный университет»

Институт _____

Кафедра _____

Группа _____

Дисциплина Моделирование процессов и объектов в металлургии

КУРСОВАЯ РАБОТА

.....
.....
.....

Пояснительная записка

.....
(обозначение документа)

Заведующий кафедры _____
(подпись, дата)

Иванов И. И.
(фамилия, инициалы)

Руководитель работы _____
(подпись, дата)

Иванов И. И.
(фамилия, инициалы)

Разработал студент _____
(подпись, дата)

Петров А. И.
(фамилия, инициалы)

Красноярск, 2008

