

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

**Кафедра автоматизации технологических процессов
и производств**

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 15.03.04*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022**

УДК 621.926.2 (073)

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ: Методические указания к курсовой работе / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *Н.В. Васильева, Э.Р. Федорова*. СПб, 2022. 27 с.

Методические указания к выполнению курсовой работы содержат информацию о порядке проведения, об основных требованиях к содержанию разделов, объему, а также процедуре защиты и критериях оценки курсовой работы.

Методические указания к выполнению курсовой работы предназначены для студентов направления подготовки 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств» (уровень бакалавриата).

Научный редактор профессор *В.Ю. Бажин*

Рецензент канд. техн. наук *А.Н. Николаев* (ООО «ЦПА «РЕСУРС»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2022

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 15.03.04*

Сост.: *Н.В. Васильева, Э.Р. Федорова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
автоматизации технологических процессов и производств

Ответственный за выпуск *Н.В. Васильева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 27.05.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 50 экз. Заказ 327.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ВВЕДЕНИЕ

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.

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;
- 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.

1. ПОРЯДОК ПОДГОТОВКИ, ОФОРМЛЕНИЯ И ЗАЩИТЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа по дисциплине «Моделирование систем и процессов» выполняется студентами направления подготовки 15.03.04 – «Автоматизация технологических процессов и производств» (уровень бакалавриата) в седьмом семестре. В ходе выполнения курсовой работы студенты: самостоятельно прорабатывают теоретическую часть вопроса; производят поиск решений, поставленных в работе задач; посещают консультации, проводимые преподавателем в целях получения разъяснений; формируют пояснительную записку, а также готовят презентацию работы к защите курсовой работы перед комиссией.

При этом необходимо учитывать, что для получения допуска к защите перед комиссией, студенту необходимо сдать готовую курсовую работу преподавателю не позднее, чем за неделю до предполагаемой даты защиты.

Основным документом курсовой работы по дисциплине «Моделирование систем и процессов» является пояснительная записка. В ней кратко и четко необходимо раскрыть творческий замысел работы, обоснование методов расчета, сами расчеты, анализ результатов, выводы.

Пояснительная записка должна содержать: титульный лист, лист задания для курсовой работы, содержание, введение, основную часть, выводы, приложения, список литературы.

Объем пояснительной записки должен быть не менее 18 печатных листов.

1.1. ПОЛУЧЕНИЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Первым шагом при выполнении курсовой работы является получение задания. Каждый студент получает индивидуальное задание. При выдаче задания преподаватель заполняет лист задания, и студент расписывается в ведомости о его получении. Студентам необходимо сохранить выданный преподавателем лист задания, так как он подшивается к пояснительной записке (вторая страница пояснительной записки, сразу за титульным листом).

1.2. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ

1. Пояснительная записка должна быть написана на одной стороне листа бумаги формата А4 с размерами 297×210 мм. По всем сторонам листа должны быть оставлены поля. Размер левого поля 30 мм, правого – 15 мм, верхнего и нижнего – 20 мм. Шрифт – Times New Roman, кегль 12. Междустрочный интервал – 1,5.

2. Листы пояснительной записки нумеруют арабскими цифрами, проставляя их по центру нижнего поля листа без знаков препинания. На первом листе (титульный лист) номер не ставят. Нумерация листов должна быть сквозной. Рисунки и таблицы, расположенные на отдельных листах, приложения и список литературы включают в общую нумерацию листов.

3. Содержание пояснительной записки делится на разделы, подразделы. Каждый раздел (подраздел) должен иметь наименование, соответствующее его содержанию.

Наименование раздела должно быть кратким и записано в виде заголовка прописными буквами. Точку в конце наименования не ставят. Разделы должны быть пронумерованы арабскими цифрами (нумеруются только разделы основной части пояснительной записки). После номера ставят точку.

Подразделы в пределах раздела должны быть пронумерованы тоже арабскими цифрами. Номер состоит из номеров раздела и подраздела, разделенных точкой. После номера ставят точку.

4. Титульный лист пояснительной записки должен быть выполнен по форме, утвержденной методическим советом Университета.

5. Содержание помещают после листа задания. В нем последовательно перечисляют все разделы пояснительной записки с указанием номеров листов, на которых они помещены.

6. Во введении необходимо обосновать значимость математического моделирования для решения задач промышленности (расчет технологических процессов и оборудования применительно к действующим и проектируемым производствам; исследование процесса с целью оптимального управления).

7. В основной части пояснительной записки должна содержаться методика обработки данных, а также расчетная часть.

8. В выводах необходимо указать, какие инженерные задачи могут быть решены с помощью полученной математической модели.

9. Список литературы (указываются только источники, на которые имеются ссылки в тексте) должен включать фамилию и инициалы автора, заглавие книги, место издания, издательство, год выпуска, количество страниц.

10. В тексте дают ссылки на использованные источники литературы: в квадратных скобках указывают порядковый номер источника по мере появления его в тексте и в списке литературы.

11. Иллюстрированный материал, таблицы и прочее могут быть оформлены как по тексту, так и в виде приложений, на которые должны быть даны ссылки в тексте пояснительной записки.

Каждое приложение должно начинаться с нового листа, иметь тематический заголовок и в правом верхнем углу над заголовком слово «Приложение», без кавычек.

Если в записке больше одного приложения, их нумеруют арабскими цифрами без знака №, например: ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Все приложения должны иметь сквозную нумерацию в пределах всей записки.

Курсовая работа должна быть надлежащим образом скреплена (рекомендуется использовать скоросшиватель). Это предполагает, что при многократном обращении к ней, она должна сохранять свою целостность, то есть не рассыпаться на отдельные листы. Поэтому работы, листы которых скреплены обычной скрепкой, либо вообще не скреплены, а просто вложены в полиэтиленовый файл или папку, приниматься не будут.

1.3. ПОРЯДОК ЗАЩИТЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Общее руководство и контроль за ходом выполнения курсовой работы осуществляет научный руководитель – преподаватель соответствующей дисциплины.

На время выполнения курсовой работы составляется расписание консультаций. Необходимо правильно распределить и продуктивно использовать время, отведенное для непосредственного

выполнения курсовой работы и подготовки ее к защите. Студент обязан регулярно (согласно графику консультаций) информировать научного руководителя о ходе выполнения курсовой работы, представляя ему для ознакомления и проверки текста отдельные разделы и подразделы в рамках утвержденной программы выполнения работы. В случае серьезных замечаний научного руководителя текст основательно перерабатывается. В исправленном виде в полном объеме и вместе с иллюстрациями он снова подается на проверку руководителю в установленный срок.

Оформленная и подписанная студентом на титульном листе курсовая работа за одну неделю до защиты должна быть сдана научному руководителю. Несвоевременное представление курсовой работы приравнивается к неявке на экзамен, поэтому студент, не сдавший без уважительных причин в срок курсовую работу, получает неудовлетворительную оценку, считается имеющим академическую задолженность и не допускается к сдаче экзаменов. Преподаватель рассматривает курсовую работу в течение 3 рабочих дней с момента ее сдачи. Работа, получившая положительную оценку, допускается к защите и возвращается студенту для подготовки к защите. Отрицательная рецензия предполагает полную или частичную переработку курсовой работы, ее повторное рецензирование и (в случае положительной оценки) ее защиту. При подготовке к защите курсовой работы студент должен внимательно ознакомиться со всеми замечаниями, отмеченными руководителем, и устранить недостатки.

Защита курсовой работы – подведение итогов изучения дисциплины. Защита курсовой работы организуется руководителем курсовой работы и проводится в сроки, определенные расписанием занятий. Она проводится в присутствии студенческой группы, т.е. открыто. Защита студентами курсовых работ проводится перед комиссией в составе 2-3 преподавателей, назначаемых заведующим кафедрой. В состав комиссии включается и руководитель курсовой работы. Защита курсовой работы включает в себя следующие части:

1. презентация курсовой работы,
2. ответ на вопросы членов комиссии по теме работы.

Время доклада на защите курсовой работы не должно превышать 3-5 минут. Примерная структура доклада при защите курсовой работы приведена ниже:

- наименование темы работы;
- основные цели и задачи работы;
- логика построения работы в разделах работы;
- основные результаты, полученные в работе, выводы и обоснование предложений.

Защита курсовой работы имеет целью выявить глубину и самостоятельность знаний студента по избранной теме. На защите студент должен хорошо ориентироваться в представленной работе, уметь объяснить источники цифровых данных, отвечать на вопросы как теоретического, так и практического характера, относящиеся к теме работы.

Качество защиты курсовой работы оценивается на основании следующих показателей:

1. Форма доклада. Степень свободы и уверенности изложения материала, четкости мысли, корректности и правильности использования научно-технических понятий и терминов, лаконичность, умение использовать графический, иллюстративный материал.

2. Содержание доклада. Полнота, аргументированность и логическая последовательность изложения актуальности курсовой работы, ее цели и решаемых в ней задач, обоснование используемых методов решения, полученных в работе результатов, практических рекомендаций, выводов, доказательство их корректности, достоверности и практической значимости.

3. Адекватность восприятия. Степень адекватности восприятия, правильность и полнота ответов на поставленные вопросы.

4. Знание исходного теоретического материала. Знание студентом теоретических основ по теме курсовой работы.

5. Эрудиция. Уровень научной и инженерной эрудиции студента в теоретических и прикладных аспектах выполненной курсовой работы.

6. Уровень культуры. Внешний вид студента, культура поведения и речь, умение владеть собой.

1.4. ПРИМЕРНЫЕ ТЕМЫ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

1. Разработка математической модели электрической дуговой печи.
2. Математическое моделирование процесса плавки белого электрокорунда в руднотермической печи.
3. Разработка математической модели процесса конвертирования медно-цинкового сырья.
4. Математическое моделирование кислородного конвертера с верхней подачей дутья.
5. Разработка математической модели процесса Ванюкова.
6. Разработка математической модели процесса электрорафинирования меди.
7. Разработка математической модели сгустителя красных шламов.
8. Разработка математической модели доменной печи.
9. Разработка математической модели печи кипящего слоя для обжига никелевого концентрата.
10. Разработка математической модели вращающейся печи для спекания известняково-нефелиновых шихт.

2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Полное представление о результатах производимого технологического процесса дает его материальный баланс, а об эффективности работы – тепловой (энергетический) баланс. Балансы представляют собой способ сопоставления «прихода» (загрузки, поступления) и «расхода» (разгрузки, оттока) веществ или энергии, которые для незамкнутых систем формулируются в терминах потоков и могут быть записаны математически в виде уравнений.

Балансы потоков отвечают единице времени работы металлургического аппарата. Можно составлять балансы и для произвольного промежутка времени. Металлурги-технологи для наглядности составляют балансы на время получения 100 (или 1000) единиц массы целевого продукта или на время переработки 100 (или 1000) единиц массы. Такие балансы удобны для оценки расходных показателей. В терминах потоков удобно анализировать работу аппарата в динамике в переходных режимах.

Задачей моделирования является определение ожидаемых результирующих показателей основных материальных потоков технологического процесса. Нахождение этих показателей требует составления развернутого (полного) материального баланса. Имея развернутый баланс, простым пересчетом можно определить ожидаемые извлечения продуктов.

2.1. АЛГОРИТМ РАЗРАБОТКИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Выбор метода создания модели зависит от свойств моделируемого объекта. В целом алгоритм создания модели иллюстрирует рис. 1.

Рассмотрим основные этапы построения модели.

Проблемная ситуация возникает, как правило, когда изменяются внешние условия функционирования технологического объекта. Это означает изменение параметров либо на входе, либо на выходе (например, изменение состава перерабатываемого сырья, повышение требований к качеству готовой продукции).

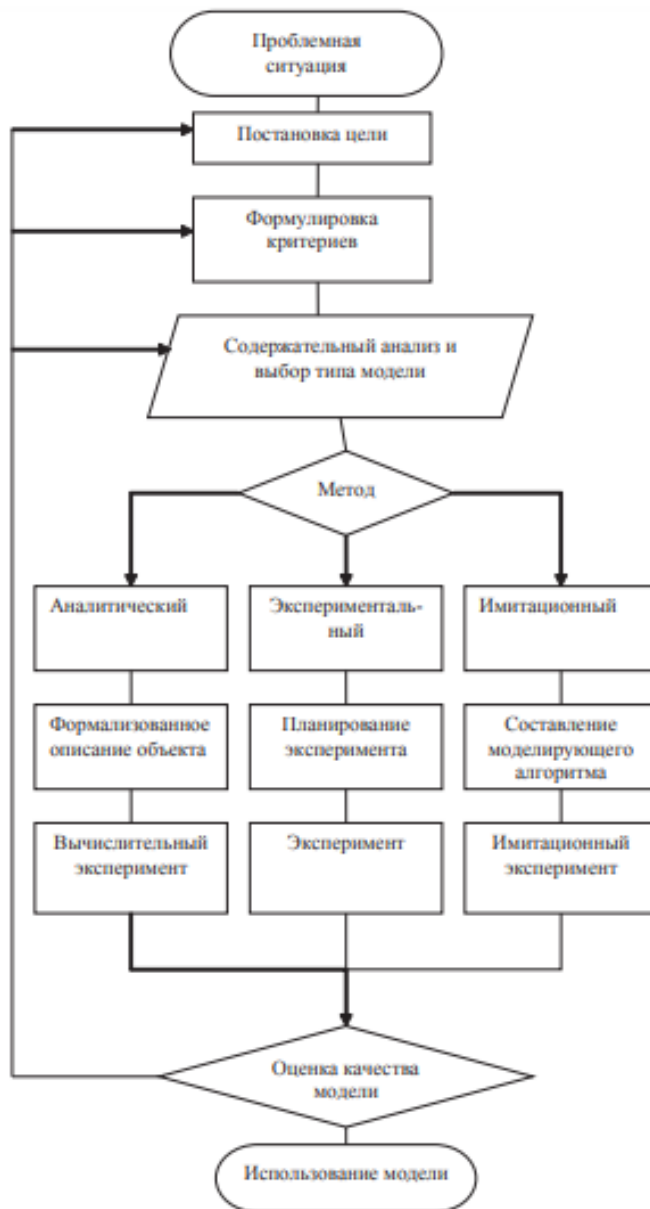


Рис. 1. Алгоритм создания математической модели объекта

Изменившиеся условия требуют адекватных изменений в технологическом объекте. Необходимо ответить на вопрос о том, какие изменения в работе технологического объекта необходимы для достижения поставленной технологической цели при изменившихся условиях.

Постановка цели – определение цели создания модели. Цели создания модели могут быть различными:

- исследование – уточнение закономерностей, управляющих технологическим процессом;

- прогнозирование поведения объекта – расчет выходных характеристик объекта по известным значениям входных величин;

- оптимизация – поиск оптимальных условий работы технологических объектов;

- оптимальное управление технологическим процессом (в результате поиска оптимальных условий найденные решения используются для управления технологическим процессом).

Формулировка критериев – вводят критерии для оценки качества модели. Например, сумма квадратов отклонений наблюдаемых и предсказанных величин на выходе дает основания судить о том, насколько точно модель воспроизводит работу объекта моделирования. Если модель идеально точно прогнозирует наблюдаемый результат, то сумма квадратов отклонений стремится к нулю.

Содержательный анализ и выбор типа модели – применяя методы системного подхода, необходимо определить границы моделируемой системы, выделить ее из внешней среды и определить ее входы и выходы. На следующем этапе системного анализа выявляется внутренняя структура объекта, определяются его элементы и связи этих элементов, образующие структуру моделируемого объекта. На данном этапе становится понятно, к какому классу в соответствии со своими свойствами принадлежит моделируемый объект.

Завершением содержательного анализа является **выбор метода построения модели**. Здесь возможно три дальнейших направления. **Аналитический метод**, или структурный подход, используется для детерминированных систем с известной нам структурой внутренних связей. **Экспериментальный метод**, или эмпирический подход, применяется для стохастических систем, подверженных

действию возмущений, которыми нельзя пренебречь. Характер и величина возмущений при этом нам неизвестны, и учесть их действие аналитически невозможно. Экспериментальный подход также является единственным выбором для систем, внутренняя структура которых нам недостаточно известна. **Имитационный метод** используется для некоторых классов систем, например, для дискретно-непрерывных систем массового обслуживания.

После выбора метода построения модели содержание дальнейших шагов определяется выбранным методом.

Составление формализованного описания – на данном этапе, используя установленную структуру связей объекта и применяя фундаментальные законы, создают математическое описание моделируемого объекта. Модель в этом случае представляет собой алгоритм вычислений, уравнение или систему уравнений различного вида. Выполняя расчеты согласно алгоритму, решая системы уравнений по заданным начальным условиям, можно рассчитать состояние выхода объекта. Наиболее популярными формами описания для металлургических процессов и объектов является материальный и тепловой баланс. Уравнения материального и теплового балансов могут быть записаны в дифференциальной или интегральной форме.

На этапе **планирования эксперимента** выбирается количество опытов, условия каждого опыта, т. е. сочетание факторов на входе системы в каждом проводимом опыте. Составляется план эксперимента. Выполнение эксперимента – выполнение запланированных опытов.

Определение порядка проведения опытов называют рандомизацией. Каждый раз измеряют значение выходной величины (отклика) и записывают результат в соответствующую строку матрицы. Обработка результатов полного факторного эксперимента подробно изложена в литературе и проводится в соответствии с известным алгоритмом.

Имитационное моделирование применяется для создания моделей дискретных или дискретно-непрерывных систем. Такие системы плохо описываются аналитически, а их экспериментальное изучение затруднено. Модель создается как моделирующий алго-

ритм, воспроизводящий работу моделируемого объекта в «ускоренном времени».

Независимо от того, на основе какого подхода создана модель, необходима **оценка ее качества**. На данном этапе необходим эксперимент с участием объекта моделирования. Идея состоит в том, чтобы проверить насколько точно модель воспроизводит состояние объекта управления.

Использование модели позволяет ответить на главный вопрос: какими должны быть по величине управляющие воздействия (соотношение между компонентами в шихте, продолжительность, температура, интенсивность перемешивания и др.) для достижения наилучшего результата (максимального извлечения металла в целевой продукт, максимальной производительности, минимальных затрат энергии или топлива и др.).

2.2. РАЗРАБОТКА БАЛАНСОВОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

Разработка модели материального баланса

Задача составления модели технологии сводится к получению системы уравнений материального баланса процесса. Эта система должна обладать следующими свойствами:

1) быть замкнутой и определенной, то есть давать однозначное решение относительно всех показателей и параметров технологии, подлежащих определению;

2) уравнения баланса должны быть сформированы таким образом, что закладываемые в них величины, играющие роль постоянных коэффициентов при неизвестных и свободных членах, могли быть с наибольшей достоверностью выбраны на основании данных исследовательских работ и (или) заводской практики.

При моделировании металлургического процесса главным этапом является расчет количества и составов всех материальных потоков. Нахождение количеств и составов материальных потоков в расчете в значительной степени формализовано в том смысле, что не требует учета в модели технологии химических реакций процесса.

Базовыми неизвестными, относительно которых составляется и решается система уравнений, являются в модели массы пото-

ков. Через указанные неизвестные выражаются количества всех компонентов этих материалов и продуктов. Уравнениями системы являются балансовые выражения для всех материальных потоков.

Именно это и позволяет получить замкнутую систему уравнений, не учитывая реакции процесса.

Составленная модель позволяет проанализировать все зависимости, которые определяют параметры процессов в той области, которая охватывается моделью. При этом применение современных компьютерных технологий позволяет количественно проанализировать влияние на интересующие нас конечные результаты любых варьируемых величин, составляющих модель.

Разработка модели теплового (энергетического) баланса

Энергетический баланс – это количественная характеристика производства, потребления и потерь энергии или мощности за установленный интервал времени для определенной отрасли хозяйства, зоны энергоснабжения, предприятия, установки

Энергетический (тепловой) баланс любого аппарата может быть представлен в виде уравнения, связывающего приход и расход энергии (тепла) процесса (аппарата). Энергетический баланс составляется на основе закона сохранения энергии, в соответствии с которым в замкнутой системе сумма всех видов энергии постоянна.

В общем случае уравнения теплового баланса (УТБ) металлургического аппарата складываются из следующих тепловых потоков:

1) энтальпии (теплосодержания, физического тепла) всех подаваемых в аппарат технологических материалов как технологических (руды, концентраты, реагенты), так и энергоносителей (топливо, окислитель для него), $\sum Q_{\text{физ}}^{\text{исх}}$;

2) тепловыделения в результате всех экзотермических реакций технологического процесса, $\sum Q_{\text{экз}}$;

3) выделения тепла в результате энергетического процесса, осуществляемого в печи, $Q_{\text{эн}}$;

4) энтальпии продуктов, покидающих аппарат (газов, расплавов, твердых материалов), $\sum Q_{\text{физ}}^{\text{пр}}$;

5) поглощения тепла во всех эндотермических, химических и фазовых превращениях $\sum Q_{энд}$;

6) тепловых потерь аппарата в окружающее пространство, $Q_{ном}$.

Первые три слагаемых соответствуют тепловым потокам прихода тепла, последние три – тепловым потокам расхода тепла. Общее уравнение теплового баланса (УТБ) металлургического аппарата получается следующим:

$$\left(\sum_{i=1}^n Q_{физ}^{вх} + \sum Q_{экс} + Q_{ЭП} \right) - \left(\sum_{j=1}^m Q_{физ}^{нр} + \sum Q_{энд} + Q_{ном} \right) = \omega_q$$

Слагаемые, входящие в УТБ, вычисляются в соответствии с законами теплофизики ($Q_{физ}$), термохимии ($Q_{экс}$, $Q_{энд}$), теплообмена ($Q_{ном}$).

Применительно к тепловому балансу закон сохранения энергии формулируется следующим образом: приход теплоты в данном аппарате (или производственной операции) должен быть равен расходу теплоты в том же аппарате (или операции).

Приход тепла в тепловом балансе такого аппарата является суммой физического тепла вещества, поступающего в аппарат с потоком, и тепла, выделяющегося в ходе химической реакции. Расход тепла обусловлен уносом тепла веществом, покидающим аппарат с выходным потоком и потерями в окружающую среду.

Физическое тепло вещества на входе и выходе аппарата определяется его температурой, теплоемкостью и массой. Потери тепла пропорциональны разности температур в аппарате и температуры окружающей среды, а также поверхности теплообмена. Количество выделяющегося тепла зависит от теплового эффекта реакции и пропорционально скорости реакции.

Для аппаратов (процессов) непрерывного действия тепловой баланс, как правило, составляют на единицу времени, а для периодического действия – на время цикла (или отдельного перехода) обработки.

Тепловой баланс рассчитывают по данным материального баланса с учетом тепловых эффектов (экзотермических и эндотермических) химических реакций и физических превращений (испарение, конденсация и т.п.), происходящих в аппарате с учетом подвода теплоты извне и отвода ее с продуктами реакции, а также через стенки аппарата.

Решение дифференциального уравнения теплового баланса дает функцию изменения температуры от времени пребывания вещества в аппарате. Время пребывания пропорционально расстоянию от точки входа в аппарат до произвольной точки внутри аппарата, для которой мы определяем значение температуры, следовательно, можно построить профиль изменения температуры внутри аппарата.

В отличие от технологических расчетов, которые всегда представляют собой цепь последовательных вычислений, прослеживающих распределение каждого компонента (элемента) исходных материалов процесса по конечным продуктам, тепловые расчеты процесса сводятся к определению отдельных разнородных составляющих теплового баланса. В технологических расчетах каждый последующий этап расчета непосредственно вытекает из предыдущего и определяется им. В тепловых расчетах каждая статья может рассматриваться самостоятельно, независимо от других.

Эта особенность тепловых расчетов приводит к тому, что в отличие от материального баланса тепловой баланс процесса может иметь невязку, причем довольно значительную. Эта невязка фактически всегда неизбежна, если все без исключения статьи баланса рассчитываются независимо.

Относительно невысокая точность расчетных тепловых балансов объясняется приближенностью очень многих величин, которые определяют значения тех или иных статей баланса. К таким приближительным величинам в первую очередь относятся:

- 1) энтальпии расплавленных продуктов процессов – шлаков, штейнов, чернового металла и др.;
- 2) теплоемкости некоторых твердых соединений при высоких температурах;
- 3) стандартные теплоты образования соединений сложного состава;

4) теплоемкости большинства соединений в расплавленном состоянии;

5) коэффициенты теплоотдачи от рабочего пространства печей к внутренним поверхностям их стенок и от наружных поверхностей стенок – к окружающему пространству;

6) теплопроводности многих изоляционных материалов, применяемых в печах (засыпок из огнеупорного порошка, обмазок и прочих), и пропитанных расплавами огнеупоров (в справочниках приводятся данные для непропитанных огнеупоров);

7) коэффициенты теплоотдачи к охладителям в охлаждаемых элементах печей (кессонах, закладных холодильниках и прочих);

8) приведенные коэффициенты излучения через открытые отверстия печей в окружающее пространство.

Другой причиной, обуславливающей приблизительность теплового баланса, является трудность относительно точного расчета некоторых его статей, особенно потерь теплоты печью во внешнюю среду. Так, весьма сложно рассчитать потери теплоты через стены печей, в футеровку которых заложены водяные холодильники, так как картина распределения температур очень сложна.

Вследствие всего сказанного расчетные тепловые балансы металлургических процессов, будучи ориентировочными, часто имеют ограниченную ценность.

2.3. РАЗРАБОТКА СТАТИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПО ДАННЫМ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЯ

При обработке экспериментальных данных или данных оперативного контроля технологического процесса, как правило, возникает задача аппроксимации результатов эксперимента аналитической зависимостью $y = f(x)$, которую можно использовать в последующих расчетах.

Существует три возможности аппроксимации опытных данных:

1. Аппроксимирующая функция $y = f(x)$ должна проходить через все опытные точки. Такой способ аппроксимации называется интерполяцией.

2. Выбрать аппроксимирующую функцию таким образом, чтобы она сглаживала, усредняла опытные данные. Такой способ аппроксимации называется регрессией или сглаживанием.

3. Подобрать аппроксимирующую функцию, отбрасывая систематическую погрешность, так называемые шумы, наложившиеся на экспериментальные данные. Такой способ называется сглаживанием с фильтрацией данных.

Для анализа и обработки производственных данных (пассивного эксперимента) в настоящее время применяется достаточно большое число методов. К ним относятся, в первую очередь, регрессионный и корреляционный анализы, а также факторный анализ, метод главных компонент, временные ряды (дрейф параметров во времени) и др.

В результате проведения **регрессионного и корреляционного анализа** исследуемого процесса в производственных условиях, можно определить уравнение регрессии и найти с помощью коэффициента корреляции степень взаимосвязи изучаемых переменных величин. Однако сами по себе уравнения регрессии и коэффициент корреляции мало что говорят о возможной причинной связи между рассматриваемыми переменными.

Для установления этой связи можно использовать **факторный анализ**, который является довольно гибким количественным методом статистического анализа. Он в большей мере, чем другие методы, может применяться для проверки сложных гипотез и позволяет получить информацию о числе факторов в исследуемой системе, их природе и зависимости, а также степени этой зависимости.

Кратко факторный анализ можно охарактеризовать следующим образом:

- в основе анализа лежат результаты наблюдений над естественными изменениями переменных;
- он позволяет выявить основные факторы, оказывающие существенное влияние в исследуемой области;
- этот метод не требует предварительных гипотез, наоборот, он сам может служить основой их выдвижения, а также выступать

критерием гипотез, опирающихся на данные, полученные другими методами;

– при анализе этим методом не требуется априорных предположений относительно того, какие переменные зависимы, а какие не зависимы. Он позволяет количественно оценить причинные связи и решить вопрос о степени их влияния в процессе дальнейших исследований;

– с помощью факторного анализа можно рассматривать только линейные корреляционные связи.

Наиболее существенным недостатком факторного анализа является отсутствие однозначного математического решения проблемы факторных нагрузок, т.е. вклада отдельных факторов в изменения значений функции отклика.

Метод главных компонент позволяет осуществить анализ многомерных случайных величин. Если число рассматриваемых случайных величин, которые требуется обработать, слишком велико и интерес представляют только отклонения, то это число можно сократить, отбрасывая линейные комбинации, имеющие малые дисперсии. Здесь множество главных компонент представляет собой удобную систему координат, а соответствующие дисперсии компонент характеризуют их статистические свойства.

Таким образом, если факторный анализ ориентирован на корреляционную связь исследуемых параметров процесса, то метод главных компонент – на их дисперсию.

Временный ряд представляет собой совокупность измерений какой-либо характеристики в течение некоторого периода времени. Основной чертой этого метода анализа является существенность порядка, в котором производятся наблюдения. Природа ряда и структура порождающего его процесса определяют порядок образования последовательности.

С точки зрения математической статистики нужно на основании ограниченного количества информации, получаемой из временного ряда конечной длины, сделать выводы о вероятностном механизме, порождающем этот ряд, проанализировать структуру, лежащую в его основе. Если структура известна, то рассматривается вопрос о предсказании последующих значений процесса, если же

структура неизвестна, ее нужно оцепить по имеющимся данным и затем уже для предсказания использовать найденные оценки. Преимущество пассивного эксперимента состоит в том, что при его применении нет необходимости тратить время и средства на постановку опытов. Полученные результаты можно затем использовать для управления процессом.

Однако пассивный эксперимент имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение для оптимизации технологических процессов.

Во-первых, при сборе экспериментальных данных на действующем промышленном объекте во избежание появления брака возможно лишь незначительное изменение параметров технологического процесса. При этом интервалы варьирования технологическими факторами обычно столь малы, что изменения выходной величины будут в большей степени обуславливаться воздействием неконтролируемых, случайных возмущений.

Во-вторых, при пассивном эксперименте на производстве часто не рассматриваются факторы, оказывающие существенное влияние на процесс, либо из-за невозможности их регистрировать и изменять, либо из-за неполных сведений о процессе. Кроме того, в производственных условиях входные величины X зачастую измеряются с такими большими ошибками, что искажают результаты сильнее, чем ошибки в определении выходного параметра Y .

Наконец, в-третьих, при пассивном эксперименте нет возможности произвольно варьировать технологическими факторами, в результате чего экспериментальные точки часто располагаются неудачно и даже при большом числе опытов нельзя получить точное описание исследуемого процесса.

Применение метода пассивного эксперимента может быть успешным, если при его проведении соблюдаются необходимые условия, к которым относятся такие, как правильное определение времени регистрации данных, обеспечение независимости соседних измерений и входных переменных друг от друга, достаточный с точки зрения математической статистики объем экспериментальных данных. Выбор структуры модели является наиболее неформали-

зуемой процедурой, так как исследователь до начала эксперимента, как правило, не располагает необходимой априорной информацией.

Таким образом, пассивный эксперимент с учетом условий накопления статистических данных успешно может применяться для получения математического описания технологических процессов в металлургии.

2.4. ОСНОВНЫЕ РАЗДЕЛЫ ПОЯСНИТЕЛЬНОЙ ЗАПИСКИ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Пояснительная записка курсовой работы должна включать несколько взаимосвязанных разделов:

1. Введение. Кратко излагаются современное состояние и актуальность проведения моделирования химико-технологических процессов и систем. Указывается перечень задач, которые позволяет решать моделирование. Здесь же формулируются основные задачи курсовой работы и определяются пути их решения.

2. Описание технологии рассматриваемого процесса. Приводится схема конструкции объекта моделирования и описывается принцип его работы. В этом подразделе необходимо указать области, в которых возможно использование рассматриваемого объекта, а также провести сравнение его с аппаратами, в которых протекают подобные процессы, но которые являются отличными от него (например, по принципу действия, по условиям использования и т.д.).

3. Формирование исходных данных моделирования. На основе литературных данных собирается, перерабатывается необходимая информация о моделируемом процессе: формируется список уравнений математического описания, банк данных, необходимый для расчета уравнений математического описания, анализируется возможное аппаратное оформление процесса. На этом этапе формируются детерминированные математические модели.

4. Формирование математической модели процесса. На данном этапе формируются начальные и граничные условия реализации процесса и принятые допущения. Осуществляется разработка балансовой или статистической модели процесса. Записывается математическая модель – система уравнений математического описания, включая дополнительные условия, устанавливающие границы ее

применимости, и известные данные, необходимые для ее решения (начальные и граничные условия, значения различных коэффициентов, констант и т.п.).

5. Выбор алгоритма решения математической модели. Решение модели требует применения численных методов расчета, при этом одна и та же задача может быть решена различными методами, отличающимися друг от друга сложностью программирования алгоритма и быстродействием.

6. Разработка программы расчета, отладка, получение пробных решений. Один из наиболее трудоемких этапов компьютерного моделирования. Приводится описание метода, который использовался для решения системы математического описания объекта моделирования. Затем осуществляется преобразование исходной системы уравнений математической модели к виду, удобному для решения на ЭВМ.

В случае использования алгоритмического языка для решения системы уравнений математической модели объекта моделирования необходимо разработать алгоритм решения и представить его в виде блок-схемы. В этом случае обязательным также является приведение текста машинной программы на выбранном языке программирования и таблицы идентификаторов, которые помещают в приложениях пояснительной записки.

При использовании для решения системы уравнений математической модели стандартных программных продуктов в пояснительную записку включаются рабочие листы документа, где выполнено решение.

Все результаты по моделированию рассматриваемого объекта оформляются в виде таблиц, диаграмм, графиков и дополняются необходимыми пояснениями, подробно описывающими условия, в которых получены эти результаты.

7. Оценка адекватности разработанной математической модели. Выполняется сопоставление результатов расчета по модели с практическими данными, полученными в ходе экспериментов на реальном объекте, или с литературными данными.

8. Заключение. Кратко излагаются основные результаты курсовой работы и делаются выводы об оптимальных условиях и режимах работы исследованного объекта.

9. Список использованной литературы. Приводится полное библиографическое описание каждого источника, который использовался при оформлении пояснительной записки. Сведения об источниках следует располагать в порядке появления ссылок на источники в тексте пояснительной записки, нумеровать арабскими цифрами и печатать с абзацного отступа.

10. Приложения. Приводятся громоздкие математические выкладки, программные коды.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Развитие технологии в металлургии невозможно без использования информационных систем, помогающих персоналу вести технологический процесс наиболее эффективно и безопасно. Важной составляющей таких систем является модельная система поддержки принятия решений. Для большинства металлургических процессов и аппаратов математические модели еще не созданы. Учитывая разнообразие металлургических процессов и аппаратов, видов сырья и получаемых продуктов, можно утверждать, что создание моделей – дело ближайшего будущего.

Модель технологических процессов и объектов представляет собой инструмент, позволяющий прогнозировать поведение моделируемых объектов. Под прогнозированием следует понимать возможность расчета выходных характеристик технологического объекта (состав, масса полученного продукта) от известных значений фиксированных входных характеристик и выбранных величин управляющих воздействий.

В таком виде модель представляет инструмент для управления технологическим объектом, позволяя ответить на вопрос, какие величины управляющих воздействий следует выбрать (и поддерживать) для того, чтобы выходные характеристики технологического объекта приняли желаемые значения.

Наиболее эффективно использование модели для оптимизации технологических процессов и объектов, поиска наилучших способов ведения процесса.

Реализация этой задачи потребует от металлургов знаний и навыков, полученных при изучении данного курса.

РЕКОМЕНДОВАННОЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Основная литература

1. *Гумеров, А.М.* Математическое моделирование химико-технологических процессов: учебное пособие, Издательство «Лань», СПб, 2014. 176 с.

2. Химико-технологические процессы. Комиссаров Ю.А., Глебов М.Б., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Учебник и практикум / Москва, 2017 359 с.

3. *Натареев С.В.* Системный анализ и математическое моделирование процессов химической технологии, РИО Ив. хим.-техн. университет, Иваново, 2007 80 с.

4. *Шарилов Ю.В., Белоглазов И.Н.* Моделирование систем, часть 1, Санкт-Петербург, 2011 108 с.

5. *Шарилов Ю.В., Белоглазов И.Н.* Моделирование систем, часть 2, Санкт-Петербург, 2012 118 с.

Дополнительная литература

1. *Кафаров В.В.* Методы кибернетики в химической технологии. М. Химия, 1985 448 с.

2. *Кубланов М.С.* Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов // Моделирование систем и процессов: учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ ГА, 2004. Часть I. 108 с.

3. *Кубланов М.С.* Математическое моделирование. Методология и методы разработки математических моделей механических систем и процессов // Планирование экспериментов и обработка результатов измерений: учебное пособие. 3-е изд., перераб. и доп. М.: МГТУ ГА, 2004. Часть II. 124 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Порядок подготовки, оформления и защиты курсовой работы	4
1.1. Получение задания для курсовой работы.....	4
1.2. Общие требования к оформлению пояснительной записки	5
1.3. Порядок защиты курсовой работы.....	6
1.4. Примерные темы курсовой работы.....	9
2. Порядок выполнения курсовой работы.....	10
2.1. Алгоритм разработки математической модели.....	10
2.2. Разработка балансовой модели технологического процесса..	14
2.3. Разработка статистической модели технологического процесса по данным оперативного контроля	18
2.4. Основные разделы пояснительной записки курсовой работы	22
Заключение.....	25
Список рекомендованной литературы	26

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

*Методические указания к курсовой работе
для студентов бакалавриата направления 15.03.04*

Сост.: *Н.В. Васильева, Э.Р. Федорова*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
автоматизации технологических процессов и производств

Ответственный за выпуск *Н.В. Васильева*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 27.05.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отг. 1,6. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 50 экз. Заказ 327.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2