

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

Кафедра теплотехники и теплоэнергетики

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2020**

УДК 519 (073)

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ:
Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *И.С. Чуркин, В.А. Лебедев*. СПб, 2020. 28 с.

Содержат необходимые сведения и порядок выполнения типовых практических заданий, а также сами задания на практические занятия.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 13.03.01 «Теплотехника и теплоэнергетика».

Научный редактор проф. *В.А. Лебедев*

Рецензент д-р техн. наук *П.А. Кругликов*

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2020

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 13.03.01*

Сост.: *И.С. Чуркин, В.А. Лебедев*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
теплотехники и теплоэнергетики

Ответственный за выпуск *И.С. Чуркин*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 29.06.2020. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,4. Тираж 50 экз. Заказ 425.

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

Введение

Целью практических занятий является закрепление теоретических знаний, полученных студентом при изучении курса, и использовании этих знаний при решении научно-исследовательских и практических задач на производстве.

Задачей практических занятий является ознакомление студентом с частными вопросами разного характера по моделированию тепловых процессов и теплотехнологического оборудования, а также по решению задач по управлению объектами теплоэнергетики.

Методические указания к выполнению практических занятий

Практическое занятие начинается с определения цели и постановки задач на разработку и исследование математической модели теплоэнергетического процесса или оборудования. Необходимо проработать теоретический материал по теме практического занятия и определить основные математические зависимости, лежащие в основе разрабатываемой модели. Определяются области допущений и формируются ограничения. Определяются исходные данные и выходные параметры модели.

Производится разработка алгоритма решения задачи и его реализация в виде программы. Язык программирования выбирается студентом и согласуется с преподавателем. На завершающем этапе производится тестирование математической модели и ее использование при исследовании поставленной задачи.

Выбирается вариант задания с исходными числовыми данными. Переписывается условие задания полностью с выбранными числовыми данными.

При построении модели необходимо обращать внимание на четкое определение расчетных зависимостей и входящих в них обозначений, а также на использование в них единиц международной системы (СИ).

По необходимости расчеты дополняются краткими пояснениями и выводами.

Практические занятия выполняются на листах формата А4 с указанием на титульном листе: фамилии, инициалов, шифра студента, а также факультета и специальности. В качестве приложения к работе необходимо распечатать текст полученной программы с пояснительными комментариями к каждому блоку.

Практическое занятие № 1

Построение математической модели элемента тепловой схемы

Целью практического занятия является приобретение навыков по построению математической модели теплоэнергетического оборудования и исследованию вариантов исполнения этого оборудования с помощью математической модели. В качестве элемента тепловой схемы примем рекуперативный теплообменный аппарат.

Основные положения.

Теоретические основы процессов, лежащих в основе моделирования оборудования объектов теплоэнергетики, рассматриваются в теории тепломассообмена [1].

В теплообменных аппаратах (ТОА) осуществляется передача теплоты от одного теплоносителя к другому в процессе *теплопередачи*. *Теплообменный аппарат (теплообменник)* - это устройство, предназначенное для нагревания или охлаждения теплоносителя (жидкости, газа, пара и др.). Существует три типа теплообменных устройств: рекуператоры, регенераторы, смесительные аппараты.

Подробная методика расчета каждого из перечисленных ТОА изучалась на курсе «Тепломассообмен» и «Тепломассообменное оборудование предприятий». Целью данной работы является расчет выбранного студентом теплообменного аппарата в виде полностью автоматизированной программы. Тип теплообменного аппарата, основные математические соотношения и методика расчета выбираются студентом самостоятельно из [1], [2] или инженерного справочника.

Методические указания.

В практическом занятии необходимо разработать математическую модель теплообменного аппарата и на ее основе произвести исследование (подбор параметров) конструктивных элементов ТОА и параметров рабочих сред.

Независимо от выбранной методики расчета и конструкции теплообменного аппарата при составлении математической модели

возникнет необходимость написания следующих типовых блоков программы: интерполяция данных, анализ ошибок, выбор расчетных формул в зависимости от условий, оптимизация параметров.

Интерполяция данных

Все основные физические свойства теплоносителя зависят от его параметров состояния, таких как температура и давление. В справочниках данные зависимости приведены в форме таблиц. Для того чтобы использовать данные из справочных таблиц в программе необходимо произвести интерполяцию одним из известных способов. Подробно методы интерполяции описаны в ПЗ№2 данного пособия. В текущей работе допустимо использовать готовые интерполяционные функции, если они имеются в выбранной программной среде. Пример приведен в приложении 1.

Блок анализа ошибок.

Программа должна уметь отбраковывать заведомо ошибочные исходные данные, так же должна правильно реагировать (прекращать вычисления и выводить соответствующее сообщение) при возникновении ошибки в процессе расчета.

Блоки анализа ошибок добавляются в необходимом количестве по всей программе, исходя из опыта проектирования и расчета ТОА.

В качестве примера рассмотрим вариант, когда в расчетную программу заносят недопустимые значения температуры. Программа должна прекратить расчет и выдать сообщение об ошибке, например такое: «температура холодного теплоносителя не может превышать температуру горячего теплоносителя».

Блок-схема алгоритма и пример ее реализации в программе «Маткад» приведены на рис.1.

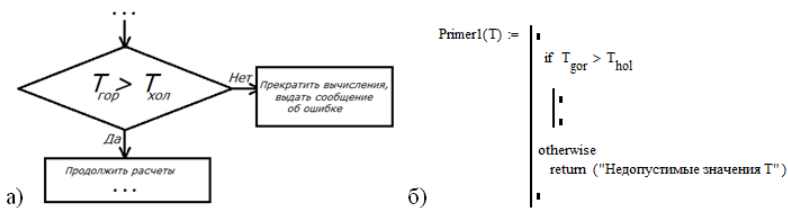


Рис. 1. Вариант написания блока анализа ошибок

а) блок-схема алгоритма

б) пример реализации в программе «Маткад»

Выбор расчетных формул в зависимости от условий

Как хорошо известно, в теории теплового подобия различают ламинарный, турбулентный и переходный режимы течения. В каждом из данных режимов существует своя методика и набор формул для расчета параметров теплообмена, в частности числа Нуссельта. На рисунке 2. приведены блок-схема алгоритма и пример ее реализации в программе «Маткад» для расчета числа Нуссельта при протекании воды в трубе при разных режимах течения.

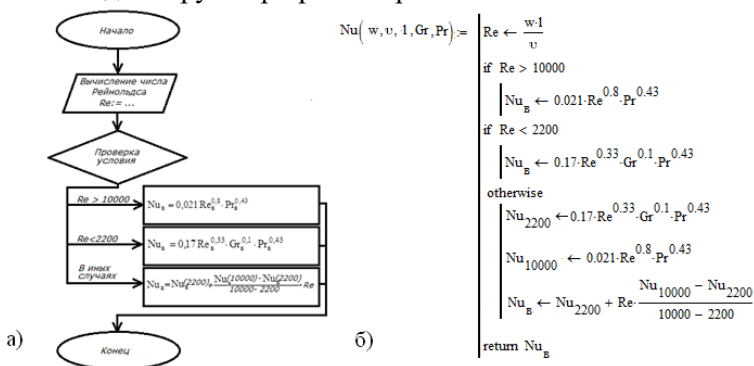


Рис.2. Вариант написания блока выбора формул

а) блок-схема алгоритма

б) пример реализации в программе «Маткад»

Оптимизация параметров итерационным методом.

Если стоит задача подобрать некий оптимальный параметр, например: минимальные масса габариты установки, максимальный КПД или максимальный коэффициент теплопередачи, то расчет необходимо провести несколько раз последовательно изменяя параметры проектируемого ТОА, до получения оптимальных значений. Подробно методы оптимизации разобраны в методических указаниях к лабораторным работам.

Содержание отчета

1. Составить систему уравнений, описывающих расчет теплообменного аппарата. Изложить в отчете с необходимыми комментариями и пояснениями.
2. Разработать алгоритм расчета теплообменного аппарата. Нарисовать предложенный алгоритм в виде структурной схемы. (Блок-схема алгоритма по *ГОСТ 19.701–90 (ИСО 5807–85)* [3].)
3. Привести программу расчета ТОА по принятому алгоритму.
4. Произвести конструкционный расчет ТОА по заданным параметрам.
5. Привести схематический чертеж полученного ТОА с обозначением всех рассчитанных геометрических параметров.
6. Произвести анализ влияния заданного эксплуатационного параметра на конструктивные характеристики ТОА.
7. Построить графики зависимости основных расчетных параметров (Re , коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой среде, коэффициент теплопередачи, площади теплопередачи) от заданного переменного параметра.

Практическая работа №2

Обработка и представление экспериментальных данных

Целью занятия является приобретение навыков обработки и представления экспериментальных данных и результатов технических измерений

Основные положения

При исследовании режимов работы теплоэнергетических систем и оборудования проводятся испытания и статистические наблюдения, которые, как правило, представляются в виде массивов данных, таблиц, номограмм и графиков. При этом возникает проблема представления этих данных в виде математических зависимостей типа $y = f(x)$, т.е. в виде математической модели. Такая аналитическая форма зависимостей позволяет не только проводить анализ происходящих процессов в теплоэнергетическом оборудовании, но и производить оптимизацию режимов работы и конструктивных особенностей оборудования, а также решать задачи автоматизации процессов и их численного исследования.

В промышленной теплоэнергетике экспериментальные исследования сводятся в основном к решению следующих типов задач:

- обработка данных прямых и косвенных измерений;
- построению интерполяционных формул (т. е. формул, определяющих эмпирические зависимости между параметрами объекта в исследуемой области значений);
- поиску оптимальных условий (экстремальный эксперимент);
- отсеиванию несущественных факторов (факторный анализ);
- уточнению констант в аналитически полученных зависимостях.

В данном практическом занятии рассматриваются обработка данных прямых измерений.

Методические указания и содержание отчета

Алгоритм обработки данных прямых измерений по выборке экспериментальных данных.

1. Устранить из выборки очевидные промахи (описки).
2. Из результатов измерений исключить известные систематические погрешности.
3. Упорядочить выборку в порядке возрастания ее элементов.
4. Определить выборочное среднее \bar{x} по формуле (2.1)

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_N}{N}, \quad (2.1),$$

где N – количество измерений, x – значения измерений.

5. Определить выборочное среднеквадратичное отклонение (СКО) результата наблюдения от среднего (2.2):

$$S_x = \sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 / (N - 1)}, \quad (2.2).$$

6. Провести проверку выборки на наличие грубых погрешностей и ее связность двумя способами:

а) по размаху выборки:

$$x_{i+1} - x_i < U_{P, N} R, \quad i = 1 \dots N - 1, \quad (2.3),$$

где $R = x_{max} - x_{min}$ – размах выборки; коэффициент $U_{P, N}$ – из приложения 2.

б) на наличие грубых погрешностей по отклонению наиболее отстоящего результата наблюдения x_i от среднего значения \bar{x} :

$$|x_i - \bar{x}| > v_{P, N} S_x, \quad (2.4).$$

Коэффициент $v_{P, N}$ определяется из приложения 2.

7. Вычислить выборочное СКО среднего:

$$S_{\bar{x}} = S_x \sqrt{N} \quad (2.5).$$

8. Задаться доверительной вероятностью P в диапазоне (0.9...0.99). Как правило, для технических приложений (в том числе в данном курсе) принято выбирать $P=0.95$.

9. Определить случайную погрешность по формуле (2.6):

$$\Delta x = t_{P, N} S \bar{x}, \quad (2.6),$$

где $t_{P, N}$ – коэффициент Стьюдента. Значения данного коэффициента приведены в приложении 5.1.

10. Определить оценочное значение случайной погрешности по размаху выборки (2.7):

$$\Delta x = \beta_{P, N} R, \quad (2.7).$$

Коэффициент $\beta_{P, N}$ определяется из приложения 2.

Значения случайных погрешностей, рассчитанные разными способами, должны примерно совпадать.

11. Определить полную погрешность результата измерения:

$$\Delta \bar{x} = \sqrt{\Delta x^2 + \theta_x^2}, \quad (2.8)$$

где θ_x – приборная погрешность, приведена в исходных данных.

12. Вычислить относительную погрешность

$$\delta x = (\Delta x / \bar{x}) \cdot 100 \%, \quad (2.9).$$

13. Округлить числовые значения полной погрешности и результата измерения.

14. Записать окончательный результат в виде:

$$x = \bar{x} \pm \Delta \bar{x}, \quad P = P_0, \quad \delta_x = \Delta \bar{x} / \bar{x} \cdot 100 \%, \quad (2.10).$$

Исходные данные для обработки прямых измерений приведены в приложении 2.

Практическая работа №3

Методы интерполяции экспериментальных данных

Целью занятия является приобретение навыков обработки и представления результатов эксперимента посредством интерполяции экспериментальных данных.

Основные положения

При исследовании режимов работы теплоэнергетических систем и оборудования одним из важнейших методов является построение интерполяционных формул, т. е. формул, определяющих эмпирические зависимости между параметрами объекта в исследуемой области значений.

1. Метод кусочно-линейной интерполяции

Простейшим видом интерполяции является линейная интерполяция, в основе которой лежит приближение функции $y(x)$ на участке между соседними точками (x_k, y_k) и (x_{k+1}, y_{k+1}) прямой линией. Уравнение прямой, проходящей через точки k и $k+1$ можно представить в виде (3.1):

$$\frac{(y - y_k)}{(x - x_k)} = \frac{(y_{k+1} - y_k)}{(x_{k+1} - x_k)}, \quad (3.1).$$

Из которого можно выразить через значение функции:

$$y = y_k + \frac{(y_{k+1} - y_k)}{(x_{k+1} - x_k)}(x - x_k), \quad (3.2).$$

2. Полиномиальный метод интерполяции

Полином степени n можно записать в виде

$$P(x) = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_nx^n, \quad (3.3).$$

Для определения коэффициентов a_i для $i=0, 1, \dots, n$, полинома проходящего через все заданные в таблице точки (x_i, y_i) , необходимо записать интерполяционные условия. В результате получим систему, содержащую $n+1$ линейных уравнений относительно коэффициентов полинома:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1x_0 + a_2x_0^2 + \dots + a_nx_0^n &= y_0 \\ a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + \dots + a_nx_1^n &= y_1 \\ \dots & \\ a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + \dots + a_nx_n^n &= y_n \end{aligned} \tag{3.4}.$$

Из решения данной системы (например, методом Гаусса) определяются численные значения a_i коэффициентов полинома.

Подставив полученные значения коэффициентов полинома в (3.3), получим интерполирующую функцию, проходящую через все заданные точки (x_i, y_i) .

3. Интерполяция многочленом Лагранжа

Интерполяционный многочлен Лагранжа имеет вид:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot l_i(x) \tag{3.5},$$

где $l_i(x)$ – базисные многочлены степени n (3.6).

$$l_i(x) = \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} = \frac{(x - x_0)(x - x_1) \dots (x - x_{i-1})(x - x_{i+1}) \dots (x - x_n)}{(x_i - x_0)(x_i - x_1) \dots (x_i - x_{i-1})(x_i - x_{i+1}) \dots (x_i - x_n)} \tag{3.6}.$$

Таким образом, полином Лагранжа можно записать в виде:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i \cdot \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \tag{3.7}.$$

Уравнение (3.7) представляет собой интерполирующую функцию, проходящую через все заданные точки (x_i, y_i) .

Методические указания и содержание отчета

1. Выбрать исходные данные для своего варианта из приложения
2. В согласованной с преподавателем программной среде (Эксель, Маткад, Матлаб и др.) написать программу интерполирующую данные тремя разными способами.
3. Записать уравнения полученных интерполирующих функций, построить графики этих функций. На каждом из графиков необходимо отметить исходные точки.
4. Сравнить полученные результаты.

Практическая работа №4

Разработка математической модели и решение практической задачи методом линейного программирования.

Целью занятия является приобретение навыков в разработке математической модели и решении практических задач методом линейного программирования.

Основные теоретические положения

Математическое программирование - это область математики, в которой изучаются методы решения задач условной оптимизации. Задача математического программирования – такая оптимизационная задача с одним критерием эффективности (целевой функцией) и детерминированной исходной информацией, имеющая конечное число неизвестных (переменных) и среди ограничений которой присутствуют алгебраические неравенства или уравнения.

Целевая функция - это функция, количественно выражающая качество объекта и поэтому называемая также функцией качества. Целевая функция представляет собой зависимость критерия оптимальности (или эффективности) от оптимизируемых параметров. Значения целевой функции тем больше, чем выше качество объекта. Оптимизация в этом случае - есть определение максимума целевой

функции. Применяются также целевые функции, убывающие с улучшением качества. Оптимизация в этом случае - есть определение минимума целевой функции. Аргументы или управляемые параметры целевой функции - это часть внутренних параметров x , которую можно изменять для оптимизации.

Математическая постановка задачи математического программирования:

Целевая функция: $f(x_1, x_2, \dots, x_n)_{\min(\max)}$

Ограничения:

$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) (<, \leq, =, \geq, >) b_1$

$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) (<, \leq, =, \geq, >) b_2$

.....

$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) (<, \leq, =, \geq, >) b_m$

Область изменения переменных: $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in D$

Задача линейного программирования - это частный случай задачи математического программирования, в которой целевая функции и функции ограничений являются линейными функциями управляемых параметров. Математическая постановка задачи линейного программирования:

Целевая функция:

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)_{\min(\max)} = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n$

Ограничения:

$g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = A_{11}x_1 + A_{12}x_2 + \dots + A_{1n}x_n (< \leq = \geq >) b_1$

$g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = A_{21}x_1 + A_{22}x_2 + \dots + A_{2n}x_n (< \leq = \geq >) b_2$

.....

$g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = A_{m1}x_1 + A_{m2}x_2 + \dots + A_{mn}x_n (< \leq = \geq >) b_m$

Область изменения переменных:

$x_{i1} \geq 0, x_{i2} \geq 0, \dots, x_{ik} \geq 0 (k \leq n)$

Методические указания

Изучить теоретический материал по теме «Линейное программирование»

Самостоятельно составить задачу, аналогичную задаче об энергоблоке приведенной в приложении 4. Решить задачу графическим способом.

При составлении задачи придерживаться следующих условий:

- условие задачи записать подробно и семантически полно;
- количество независимых переменных должно быть равно 2;
- количество ограничений должно быть не менее 4;
- линии, описывающие ограничения, должны при пересечении образовывать единый многоугольник решений. В случае, если какое-то ограничение «не работает», т.е. не участвует в формировании многоугольника решений, необходимо изменить (подобрать) коэффициенты этого ограничения.

Решение графическим способом необходимо выполнить на миллиметровой бумаге или на листе в клетку.

Записать решение задачи и сделать выводы.

При составлении задачи обратить внимание на выполнении условия целочисленности. В результате решения задачи не должно получиться 1,5 станка или 2,3 человека.

Решить свою задачу с помощью тренажера решения задач линейного программирования, для чего:

- ознакомиться с пакетом прикладных программ решения задач методом линейного программирования (папка Solution);
- ввести исходные данные своей задачи в тренажер и решить ее графическим способом;
- сравнить полученное решение с ручным решением задачи графическим способом.

Содержание отчета

1. Формулировка задачи
2. Графическое решение ручным способом.
3. Решение задачи с помощью программы «Solution».
4. Выводы. Сравнение результатов.

Практическая работа №5

Построение сетевой модели

Целью занятия является приобретение навыков в разработке, построении и оптимизации сетевой математической модели.

Основные теоретические положения

В современном производстве, где для достижения реальных целей производства согласовываются действия больших групп и коллективов людей, важнейшим инструментарием по планированию и управлению является графическое и сетевое моделирование. Оно позволяет согласовывать сроки начала и окончания работ, осуществлять контроль за каждым мероприятием в рамках комплекса работ, оптимально распределять ресурсы, выделяемые для осуществления работ.

Данные для построения модели необходимо взять из приложения 5. Основным ресурсом во всех вариантах является количество человек, необходимое для ведения работ.

Для производства расчетов сетевой модели необходимо правильно построить сетевой график:

События сетевого графика обозначаются кружечками: начальное и конечное события делятся пополам, а промежуточные - на четыре части (Рис. 3.)

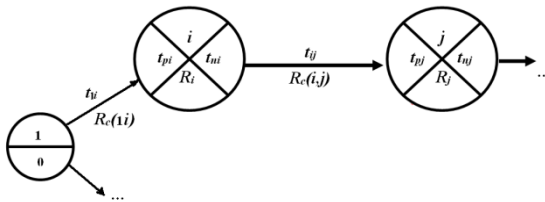


Рис. 3. Построение сетевого графика

Пронумеровать события: они нумеруются от начального события, с номером 1, до конечного события произвольно, соблюдая правило: каждая работа (процесс) должна начинаться в событии с

меньшим номером и заканчиваться в событии с большим номером. В дальнейшем, для определенности, считаем, что $i < j$.

В верхнем секторе проставляется номер события;
в левой части (для начального и конечного событий – внизу) размещается ранний срок наступления события t_{pi} ;
в правой части – поздний срок наступления события t_{pi} ;
в нижнем секторе промежуточных событий – резерв события

R_i .

Для определения, по каким работам проходит критический путь, необходимо определить полный и свободный резервы каждой работы по зависимостям:

$$R_n(i,j) = t_{nj} - t_{pi} - t_{ij};$$

$$R_c(i,j) = t_{pj} - t_{pi} - t_{ij}.$$

Справедливо правило: через работы с нулевыми полным и свободным резервами проходит критический путь.

При построении масштабного сетевого графика по принципу раннего начала каждая работа начинается в самый ранний срок. Принцип финансиста заключается в том, что на временном сетевом графике отмечаются поздние времена наступления событий, причем работа заканчивается в момент t_{nj} , а от t_{ni} до начала работы проводится штриховая линия.

Следующий этап – построение графика распределения ресурсов с учетом масштабного сетевого графика. В первую очередь строятся ресурсы, касающиеся только критических работ. Если критических путей два и более, то в первую очередь строятся более длительные по времени работы. Ресурсы, касающиеся работ критического пути, выделены жирной линией (рис. 4). Последовательно строятся ресурсы работ, не лежащих на критическом пути. При этом на каждом этапе выполнения работ их ресурсы суммируются. В конечном счете, должен быть построен профиль суммарного потребления ресурсов на каждом временном этапе выполнения работ.

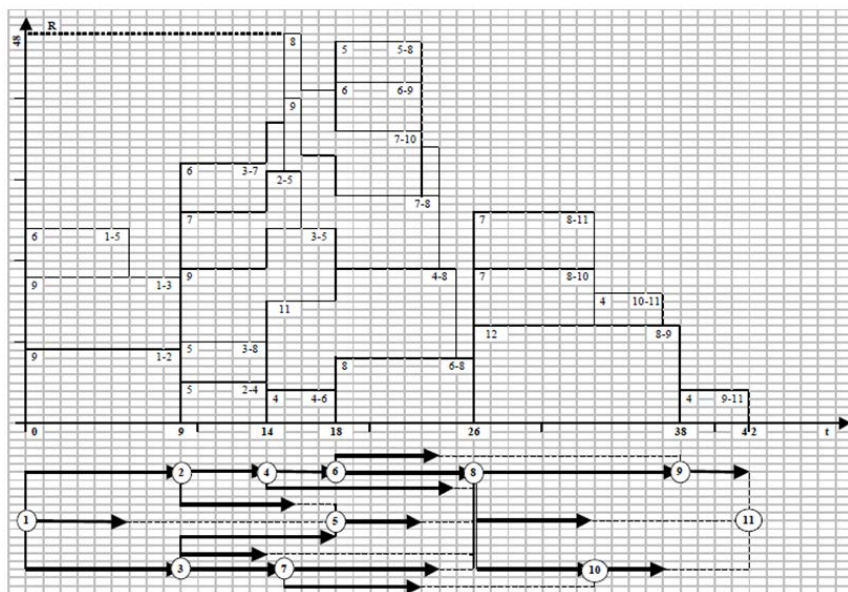


Рис. 4. Пример масштабного сетевого графика и графика распределения ресурсов.

Получив исходный график распределения ресурсов, необходимо его оптимизировать. Под оптимизацией понимается планирование использования ресурсов, удовлетворяющих следующим положениям:

а). Максимально освобождаются начало и окончание комплекса работ, что соответствует требованиям практики: наиболее сложные моменты, связанные с управлением комплексом работ, возникают в его начале (необходимость организации работ и взаимодействия различных бригад, групп исполнителей) и при завершении (возможные трудности, связанные с завершением комплекса работ в заданные сроки).

б). Как видно из графика (рис. 4), используемый ресурс находится в пределах от 4 и 8 до 48 единиц. Это крайне неравномерно, поэтому необходимо оптимизировать распределение таким образом, чтобы не допускались значительные скачки в использовании выде-

ленных ресурсов. Пример оптимизированного графика изображен на рисунке 5.

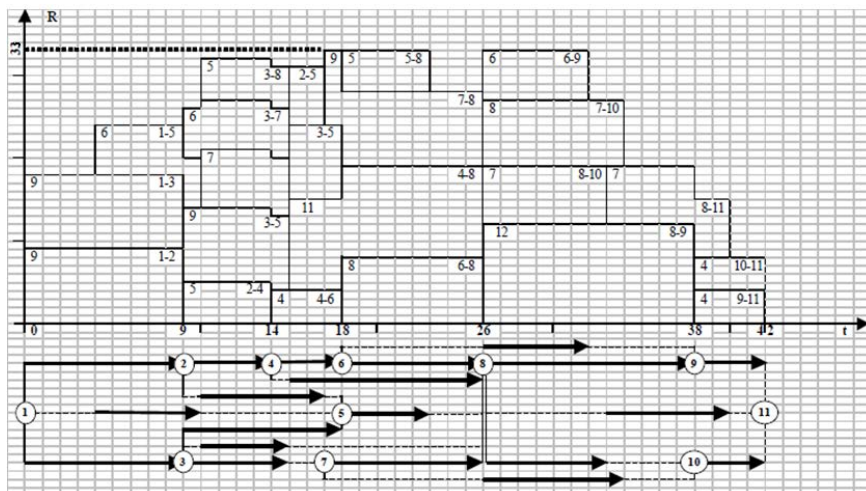


Рис. 5. Пример оптимизированных масштабного сетевого графика и графика распределения ресурсов.

Необходимо помнить, что оптимизация распределения ресурсов – это творческий процесс, зависящий, в первую очередь, от навыков, опыта и, в немалой степени, интуиции исследователя. Поэтому оптимальность достигается только при постоянной работе с масштабным сетевым графиком: сдвиги работ в допустимых временных пределах. Необходимо учесть, что возможны несколько вариантов решения данной задачи. Например, при сдвиге начала работы 5-8 с 18 до 21 (соответственно окончание вместо 23 в 26) не произойдет изменения суммарного ресурса.

Методические указания и содержание отчета

При выполнении практического занятия рекомендуется следующий порядок ее выполнения:

По технологической карте построить сетевой график проекта, на котором работы обозначены дугами, а над дугами проставлены номера работ.

Произвести расчет сетевого графика, определить критический путь на графе.

Построить масштабный сетевой график по принципу раннего начала работ.

Согласно построенному масштабному сетевому графу разработать график распределения ресурсов.

Провести оптимизацию полученного графика распределения ресурсов, используя принцип «управленца»: освободить начало и окончание работ, не допускать резких скачков в использовании ресурса.

Оформить работу в соответствии с требованиями по оформлению контрольных работ, включая следующие моменты:

а) кратко теоретически описать исследуемый процесс (цель моделирования, методика определения критического пути, принципы построения масштабного сетевого графика);

б) начертить исходную сетевую модель, указав на ней все параметры событий и работ, а также критический путь;

в) построить масштабный сетевой график и график распределения ресурсов по принципу либо раннего начала работ;

г) произвести оптимизацию масштабного графика и графика распределения ресурсов (при необходимости начертить несколько масштабных графиков и графиков распределения ресурсов).

Приложение 1

Применение стандартной интерполяционной функции

На рисунке 6 приведен пример использования стандартной для пакета «Маткад» функции линейной интерполяции. Так же показаны два варианта задания исходных: задание всех значений вручную и импорт таблицы значений из текстового файла. При небольшом количестве исходных точек, имеет смысл задавать значения напрямую, но при большом объеме данных, характерным для теплотехники примером которого является таблица параметров состояния воды и водяного пара, вбивание значений вручную не представляется возможным.

Точки для интерполяции заданы вручную:

$$i := 1..5$$
$$x_i := \quad y_i :=$$

1	1
2	4
3	9
4	16
5	25

Точки для интерполяции импортированы из текстового документа:

$$x_i := \text{READPRN}("xi.txt")^*$$
$$y_i := \text{READPRN}("yi.txt")^*$$

* Символ "■" означает что данный фрагмент программы временно отключен и не используется при расчете

$$f(X) := \text{linterp}(x, y, X)$$
$$f(1.9) = 3.7$$

Рис. 6. Применение стандартной интерполяционной функции.

Приложение 2

Обработка данных прямых измерений

Таблица 1.

Исходные данные

№	1	2	3	4	5	6	7	8	θ_x
1	10,2	10,8	11,0	12,1	10,6	10,4	10,3	10,1	0,4
2	7,0	7,2	6,8	8,4	7,3	7,6	7,2	7,5	0,2
3	16,0	16,2	18,2	16,4	16,6	15,6	15,8	15	0,2
4	26,6	25,8	26,0	25,4	26,4	26,2	27	24	0,4
5	7,138	8,342	7,144	7, 139	7,140	7, 141	7,146	7,14	0,008
6	6, 54	6, 538	6, 548	7,288	6, 548	6, 542	6,545	6,5	0,005
7	4,252	4,248	4,256	4,250	5, 856	4,260	4,2	4,3	0,004
8	3, 83	3, 722	3,777	3, 795	3,811	4,244	3, 804	3,78	0,005
9	1, 51	1, 518	1,532	1,520	2, 222	1, 528	1, 522	1,4	0,006
10	10,56	11,882	10,611	10,532	10, 56	10,572	10,6	10,8	0,08
11	2,48	2,56	2,50	2,662	2,2,44	2,54	3,12	2,52	0,05
12	5, 42	5, 462	5, 552	5,550	5,480	6, 846	5,560	5,5	0,008
13	42,64	42, 36	42, 54	42, 77	43,10	32, 84	42,48	42, 2	0,05
14	2,576	2,522	2,664	2,588	1, 862	2,342	2, 664	2,5	0,004
15	1, 54	1,532	1, 480	1, 502	1,512	1,522	1, 244	1, 46	0, 005

Значения коэффициентов Стьюдента $t_{P,N}$ в зависимости от числа наблюдений N при доверительной вероятности $P = 95\%$:

Таблица 2.

Коэффициент Стьюдента

N	2	3	4	5	6	7	8	9	10	100
$t_{P,N}$	12.7	4.3	3.2	2.8	2.6	2.5	2.4	2.3	2.3	2.0

Коэффициенты $\beta_{P,N}$ для расчета доверительной погрешности при доверительной вероятности $P = 95\%$:

Таблица 3.

Коэффициенты $\beta_{P,N}$

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\beta_{P,N}$	1.30	0.72	0.51	0.40	0.33	0.29	0.25	0.23	0.21	0.19

Коэффициенты $u_{P,N}$ для проверки результатов наблюдений на наличие грубых погрешностей в зависимости от объема выборки N для доверительной вероятности $P = 95\%$:

Таблица 4.

Коэффициенты $u_{P,N}$

N	3	4	5	7	10	15	20	30	100
$u_{P,N}$	0.94	0.76	0.64	0.51	0.41	0.34	0.30	0.26	0.20

Коэффициенты $u_{P,N}$ для проверки элементов выборки на наличие грубых погрешностей в зависимости от объема выборки N при доверительной вероятности $P = 95\%$:

Таблица 5.

Коэффициенты $v_{P,N}$

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$v_{P,N}$	1.15	1.46	1.67	1.82	1.94	2.03	2.11	2.18	2.23	2.29

Приложение 3

Интерполяция экспериментальных данных

Таблица 6.

Исходные данные

№ п/п	Значения			
	x_i			
1	x_i	0	1	2
	y_i	1	2	4
2	x_i	1	2	3
	y_i	1	4	9
3	x_i	1	3	5
	y_i	2	7	9
4	x_i	0	2	4
	y_i	1	4	8
5	x_i	1	3	6
	y_i	1	6	12
6	x_i	0	1	4
	y_i	1	2	8
7	x_i	1	2	3
	y_i	1	2	6
8	x_i	0	1	3
	y_i	2	4	6
9	x_i	1	2	3
	y_i	1	5	9
10	x_i	1	3	5
	y_i	1	6	10

Приложение 4

Пример решения практической задачи методом линейного программирования.

Теплоэлектростанция производит 2 вида продукции: электроэнергию и тепло. На производство этих видов продукции расходуется четыре вида сырья. На производство единицы электроэнергии требуется 4, 0, 2 и 2 единицы сырья соответственно. На производство единицы тепла требуется 0, 3, 2 и 4 единицы сырья. Прибыль от реализации единицы электроэнергии составляет 40 денежных единиц. Прибыль от реализации единицы тепла составляет 50 денежных единиц. Запасы сырья составляют 16, 9, 10 и 14 единиц соответственно. Требуется определить, сколько электроэнергии и тепла нужно произвести, чтобы суммарная прибыль от реализации продукции была максимальной. Математическая модель задачи:

Целевая функция:

$$40x_1 + 50x_2 \rightarrow \max$$

Ограничения:

$$4x_1 + 0x_2 \leq 16$$

$$0x_1 + 3x_2 \leq 9$$

$$2x_1 + 2x_2 \leq 10$$

$$2x_1 + 4x_2 \leq 14$$

Область изменения переменных:

$$x_1 \geq 0; x_2 \geq 0$$

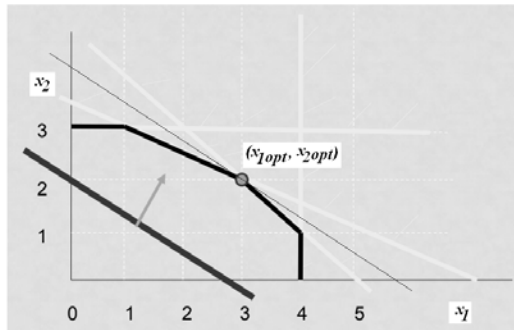


Рис. 7. Графическое решение задачи о теплоэлектростанции.

Список рекомендуемой литературы:

1. *Андреев В.В.* Теплотехника [электронное издание]: учебник / В.В. Андреев, В.А. Лебедев, Б.И. Спесивцев.- СПб.: Горный университет, № госрегистрации -0321601812, 2016.
2. Тепломассообменное оборудование предприятий: Учеб. пособие / А.Н. Иванов, В.Н. Белоусов. Национальный минерально-сырьевой университет «Горный». СПб, 2013, с.166 с.
3. *ГОСТ 19.701–90 (ИСО 5807–85)*
4. Тепломеханическое и вспомогательное оборудование электростанций: Письменные лекции/ сост. В.С. Дресвянкин, Б.Л. Паскарь. – СПб.: Изд-во СЗТУ, 2010. – 165 с.
5. *Заврин В. Г.* Тепломассообменное оборудование предприятий. Учеб. пособие/ Том. политех. ун-т. – Томск, 2004. – 163 с.
6. Сборник примеров и задач по тепломассообменным процессам, аппаратам и установкам [Текст] : учеб.пособие / Горбенко В.А., Архипов Л.И., Данилов О.Л.; редактор Ефимов А.Л. - М. : Изд-во МЭИ, 1997. - 116с.
7. Обработка результатов эксперимента Морозов В. В., Сobotковский Б. Е., Шейнман И. Л.: Учебное пособие.- Спб. Издательство СПбГЭТУ«ЛЭТИ», 2004, -64 с.

Содержание

Введение	3
Методические указания к выполнению практических	4
занятий	4
Практическое занятие № 1	
Построение математической модели элемента тепловой схемы	5
Практическая работа №2	
Обработка и представление экспериментальных данных	9
Практическая работа №3	
Методы интерполяции экспериментальных данных.....	12
Практическая работа №4	
Разработка математической модели и решение практической задачи методом линейного программирования.....	14
Практическая работа №5	
Построение сетевой модели	17
Приложение 1	22
Приложение 2	22
Приложение 2	23
Приложение 3	25
Приложение 4	26