



Негосударственное образовательное учреждение
высшего образования
Московский технологический институт

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебно-методической работе
к.ф.н. Т.В. Яблоновская

«___» _____ 20__ г.

Автор: Доктор технических наук, профессор Ефремов Г.И.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ
С МЕТОДИЧЕСКИМИ УКАЗАНИЯМИ

НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ ТЕПЛОЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

Направление подготовки

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профиль подготовки

Промышленная теплоэнергетика

Квалификация (степень) выпускника

Бакалавр

Формы обучения

очная, заочная

Москва, 2016 г.

ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Курсовая работа (КР) курсу «Надежность систем теплоэнергоснабжения» состоит из двух частей:

1. ответы на 2 контрольных вопроса по теоретической части курса и определение основных количественных показателей надежности работы оборудования;

2. решения 3-х прикладных задач на определение показателей надежности оборудования, обработку статистики отказов теплоэнергоснабжения и расчета показателей надежности сложных систем теплоэнергоснабжения.

Варианты контрольных вопросов для КР и параметра N_0 для определения основных количественных показателей надежности работы оборудования приведены в ниже в таблице 1, а варианты данных для 3-х прикладных задач приведены непосредственно в самих задачах. Номер варианта КР соответствует последней цифре шифра студента. Задачи снабжены методическими указаниями к их решению.

Ответы на 2 контрольных вопроса КР должны быть краткими, но полностью отражать существо вопроса, решения прикладных задач должны сопровождаться детальным их объяснением, графики и структурные схемы для расчета надежности теплоэнергоснабжения следует приводить в КР с пояснениями.

Таблица 1. Варианты контрольных вопросов КР и параметра N_0

	Последняя цифра шифра студента									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Номера контрольных вопросов	11	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	18	15	18	13	17	10	12	16	2	14
Число образцов оборудования	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150

СПИСОК КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ ПО КР

1. Понятие надежности, аварийности и отказов оборудования в энергетике. Дефекты и повреждения. Типы отказов по ГОСТ 27.002–89 «Надежность в технике. Термины и определения». Аварии и потребительское отключение.

2. Два пути для создания надежных систем в энергетике. Вероятностный характер показателей надежности. Связь теории надежности с теорией вероятности.

3. Законы распределения случайных величин. Нормальное распределение. Экспоненциальное распределение, как статистическая модель для времени безотказной работы оборудования.

4. Дайте определение следующих показателей надежности : вероятности безотказной работы, вероятности отказа, среднего времени наработки на отказ, интенсивности отказов оборудования.

5. Напишите формулы, по которым рассчитываются на практике по статистическим данным об отказах перечисленные в предыдущем вопросе характеристики.

6. Дайте определение следующих показателей надежности ремонтируемого оборудования: среднего времени восстановления, интенсивности восстановления, коэффициента готовности оборудования.

7. Напишите формулы, по которым определяются на практике по статистическим данным об отказах перечисленные в предыдущем вопросе характеристики.

8. Какие вы знаете данные о статистике отказов элементов реальных теплоэнергетических систем: насосов, теплообменников, тепловых сетей, запорных устройств, турбин и др.

9. Надежность системы элементов. Чем отличается принципиальная и структурная схемы системы элементов при расчете ее надежности?

10. Нерезервируемые системы. Расчет их показателей надежности.

11. Резервирование системы. Параллельное включение элементов в системе. Кратность резервирования. Приведите примеры.

12. Виды резервирования: постоянно включенный резерв и резерв замещением. Горячий, теплый и холодный резервы.

13. Приведите формулы для расчета показателей надежности систем при резервировании с постоянно включенным резервом и целой кратностью резервирования.

14. Приведите формулы для расчета показателей надежности систем при резервировании с постоянно включенным резервом и дробной кратностью резервирования.

15. Сложные системы. Смешанное соединение резервируемых элементов. Приведите примеры.

16. Способ расчета показателей надежности энергоблока, его структурная схема.

17. Методы повышения надежности систем теплоэнергоснабжения.

18. Оптимизация уровня надежности энергоустановок с учетом произведенных затрат.

I. Основные количественные показатели надежности работы оборудования

1) *Вероятностью безотказной работы* называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени t не произойдет ни одного отказа [1-3]:

$$P(t) = P(T \geq t) \quad (1)$$

Здесь t - заданный интервал времени,

T - момент отказа.

На практике вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$P(t) = \frac{N_0 - n(t)}{N_0} \quad (2)$$

где N_0 - число образцов оборудования в начале испытаний,
 $n(t)$ - число изделий, отказавших к моменту t .

При большом числе N_0 статистическая оценка $P(t)$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$ по уравнению (1). На практике часто более удобной характеристикой является вероятность отказа $Q(t)$. Вероятностью отказа оборудования называется вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации в заданном интервале времени от 0 до t возникнет хотя бы один отказ. Отказ и безотказная работа являются событиями противоположными, поэтому

$$Q(t) = 1 - P(t) \quad (3)$$

По статистической оценке, с учетом (2), получим:

$$Q(t) = \frac{n(t)}{N_0} \quad (4)$$

2) *Частота отказов $a(t)$* есть плотность вероятности времени работы устройства до первого отказа. Согласно (3) имеем

$$a(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = - \frac{dP(t)}{dt} \quad (5)$$

Частота отказов оборудования характеризует отношение числа отказавших образцов оборудования в единицу времени к первоначальному количеству образцов, при условии, что отказавшие образцы не восстанавливаются и не заменяются новыми :

$$a(t) = \frac{n(\Delta t)}{\Delta t \cdot N_0}, \quad (6)$$

где $n(\Delta t)$ - число отказавших образцов в интервале времени $(t, t + \Delta t)$.

3) *Интенсивность отказов оборудования $\lambda(t)$* есть условная вероятность его отказа в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ при условии, что до момента t оборудование работало безотказно. Величина $\lambda(t)$ характеризует степень надежности оборудования в каждый момент его эксплуатации.

Согласно статистической оценке, интенсивность отказов - это отношение числа отказавших изделий в единицу времени к среднему числу исправных изделий на данном интервале времени:

$$\lambda(t) = \frac{n(t)}{\Delta t N_{cp}(\Delta t)}; \quad (7)$$

где $N_{cp}(\Delta t) = (N_i + N_{i+1}) / 2$, N_i - число образцов, исправно работающих в начале интервала Δt , N_{i+1} - число образцов, исправно работающих в конце интервала Δt .

При большом числе N_0 интенсивность отказов $\lambda(t)$ есть условная вероятность отказа оборудования в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ при условии, что до момента t оборудование работало исправно.

$$\lambda(t) = a(t) / P(t) \quad (8)$$

Величину $\lambda(t)$ принято считать основным показателем надежности оборудования. По величине $\lambda(t)$ обычно определяют остальные показатели надежности оборудования.

4) *Средним временем безотказной работы оборудования* T_{cp} (или средней наработкой на отказ) называется математическое ожидание времени работы оборудования до отказа:

$$T_{cp} = M [t] = \int P(t) \cdot dt \quad (9)$$

По статистическим данным об отказах средняя наработка на отказ вычисляется по формуле:

$$T_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n t_{cp_i} \cdot n(t_i)}{N_0}; \quad (10)$$

где $t_{cp_i} = t_i + \frac{\Delta t}{2}$ - среднее время работы до отказа i -го образца оборудования, N_0 - число испытываемых образцов.

Таким образом, необходимо вычислить описанные количественные показатели надежности:

- $P(t)$ - вероятность безотказной работы за время t ;

- $a(t)$ - частоту отказов за время t ;
- $\lambda(t)$ - интенсивность отказов за время t ;
- T_{cp} - среднюю наработку до первого отказа, час, по приведенным в

таблице 2 опытными данными (табл. 2).

Число отказов оборудования $n(t)$ фиксировалось через каждые 200 часов его работы. В эксплуатации находилось N_0 образцов неремонтируемого оборудования. Число образцов неремонтируемого оборудования N_0 для каждого варианта задания приведено в таблице 1 (определяется по последней цифре ИНС студента).

Таблица 2. Число отказов оборудования $n(t)$ в процессе его работы

Δt_i , час	0-200	200-400	400-600	600-800	800-1000
$n(t_i)$	9	7	4	3	2
Δt_i , час	1000-1200	1200-1400	1400-1600	1600-1800	1800-2000
$n(t_i)$	3	3	2	3	3
Δt_i , час	2000-2200	2200-2400	2400-2600	2600-2800	2800-3000
$n(t_i)$	3	2	3	5	8

Необходимо также построить графики зависимостей рассчитанных показателей от времени через каждые 200 часов работы (15 значений). Выделить на графиках 3 периода: приработка, нормальная работа и старение. Пример построения графика приведен на рис. 1.

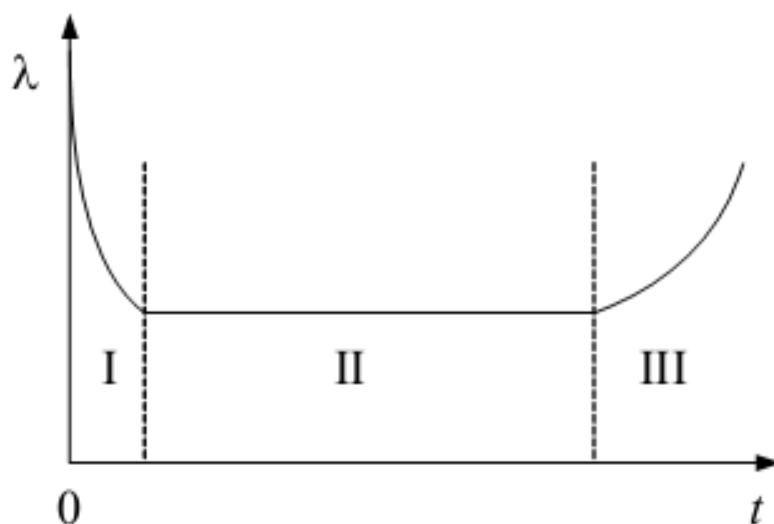


Рис. 1. Интенсивность отказов за период эксплуатации оборудования

Расчеты, включая последующие задачи, и построение графиков удобнее выполнять в программе MathCAD.

II. Решение прикладных задач на определение показателей надежности оборудования

Задача № 1

Один насос из группы питательных насосов котлоагрегата имеет среднюю наработку на отказ T_{cp} и среднее время восстановления T_v (табл. 3). Определить коэффициент готовности насоса, а также интенсивность отказов λ и интенсивность восстановления μ при экспоненциальном законе надежности. Найти вероятность исправного состояния насоса в течение времени t .

Таблица 3. Варианты заданий исходных данных к задаче 1

	Последняя цифра шифра студента									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
T_{cp} , час	30	230	560	550	430	43	360	250	400	180
T_v , час	4	12	15	8	8	2	6	10	10	3

t, час	50	100	200	400	300	50	100	80	200	70
--------	----	-----	-----	-----	-----	----	-----	----	-----	----

Методические указания к задаче № 1

Экспоненциальный закон распределения случайного времени работы рассматриваемого оборудования имеет вид:

$$P(t) = e^{-\lambda t} \quad \text{при } t \geq 0; \quad \lambda = \text{const} \quad (11)$$

В этом случае получаем следующую связь между средней наработкой на отказ T_{cp} и интенсивностью отказов λ :

$$T_{cp} = \int P(t) \cdot dt = 1/\lambda \quad (12)$$

После отказа работоспособность оборудования может быть восстановлена путем ремонта. При оценке ремонтнопригодности оборудования используются следующие основные показатели.

Интенсивность восстановления оборудования μ - есть предполагаемая вероятность его восстановления в интервале времени $(t, t + \Delta t)$ при условии, что до момента t оборудование ремонтировалось.

Вероятность восстановления оборудования $P_v(t)$ - это вероятность того, что при определенных условиях эксплуатации восстановление будет закончено к моменту времени t . При экспоненциальном законе распределения

$$P_v(t) = 1 - e^{-\mu t} \quad (13)$$

$\mu = \text{const}$ для каждого вида оборудования.

Среднее время восстановления T_v оборудования - математическое ожидание случайной величины t_v - продолжительности ремонта.

$$T_v = M [t_v] = \int P_v(t) \cdot dt \quad (14)$$

В этом случае между средним временем восстановления T_v и интенсивностью восстановления μ получим связь :

$$T_v = 1 / \mu \quad (15)$$

Комплексным показателем надежности ремонтируемого

оборудования является *коэффициент готовности* $K_r(t)$ - это вероятность того, что оборудование будет находиться в работоспособном состоянии в любой произвольный момент с начала эксплуатации ($t \rightarrow \infty$):

$$K_r = \frac{T_{cp}}{T_{cp} + T_s} = \frac{\mu}{\lambda + \mu}, \quad (16)$$

Вероятность исправного состояния в течении времени t (вероятность безотказной работы ремонтируемого оборудования) определяется по формуле:

$$P_r(t) = \exp\left(-\frac{\lambda}{\lambda + \mu} t\right). \quad (17)$$

Задача № 2

Система оборудования состоит из N различных невосстанавливаемых элементов, при этом она имеет основное их соединение, т.е. отказ любого из элементов приводит к отказу всей системы. Для всех элементов справедлив экспоненциальный закон надежности. Средняя наработка до первого отказа для разных блоков различна и равна T_i часов (табл. 4).

Требуется найти вероятность безотказной работы системы в течение t часов. Найти также интенсивность отказов для системы и среднюю наработку до первого отказа системы.

Таблица 4. Варианты заданий исходных данных к задаче 2

Последняя цифра шифра	N	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T ₅	T ₆	T ₇	T ₈	t
0	6	3200	4000	2000	4500	5000	3000	-	-	2000
1	5	2000	1850	1600	1750	1650	-	-	-	1000
2	7	7500	8000	4000	5000	6000	8700	10000	-	2000

3	6	1000	1800	1200	1400	1600	1500	-	-	800
4	3	1500	7500	5000	-	-	-	-	-	1500
5	4	3500	4200	5200	4500	-	-	-	-	2500
6	8	4000	2500	3000	5000	4000	3500	4500	3 000	1500
7	5	2000	3000	4000	5000	3000	-	-	-	1000
8	3	5000	6000	7000	-	-	-	-	-	3000
9	4	1800	2500	1500	2200	-	-	-	-	1500

Методические указания к задаче № 2

Так как отказ данной технической системы наступает при отказе любого из ее элементов, то такая система имеет основное (последовательное) соединение элементов (рис.2).



Рис. 2. Последовательное соединение элементов системы

При расчете надежности таких устройств предполагается, что отказы элементов есть события случайные и независимые. Очевидно, что если $P_i(t)$ - надежность i -го элемента, то по теореме о произведении вероятностей событий, вероятность того, что все элементы будут одновременно работать безотказно в течение заданного интервала времени t , будет равна произведению вероятностей безотказной работы ее элементов в течение того же времени:

$$P_c(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_N(t) \tag{18}$$

В случае экспоненциального закона распределения имеем:

$$P_c(t) = e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t} \cdot \dots \cdot e^{-\lambda_N t} = e^{-(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N)t} \quad (19)$$

Очевидно, что при этом интенсивность отказов системы равна сумме интенсивностей отказов ее элементов :

$$\lambda_c = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_N, \quad (20)$$

а средняя наработка на отказ системы $T_{ср}$ связана известным образом с λ_c :

$$T_{ср} = 1 / \lambda_c \quad (21)$$

Задача № 3

Насосная станция состоит из n однотипных насосов, включенных параллельно, из которых m являются рабочими (табл. 5).

Интенсивность отказов каждого из насосов $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-3}$ 1/час .

Необходимо определить вероятность безотказной работы насосной станции в течение $t = 2000$ час, а также среднюю наработку до первого отказа. Сделать то же самое для случая, когда резервирования насосов нет, сравнить полученные результаты и сделать вывод об эффективности резервирования. Нарисовать структурные схемы.

Таблица 5. Варианты заданий исходных данных к задаче 3

Параметры задания	Последняя цифра шифра студента									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n	4	5	5	2	3	4	4	5	3	5
m	3	4	3	1	2	3	2	3	1	2

Методические указания к задаче № 3

Для повышения надежности системы применяют резервирование. Обычно это - параллельное соединение элементов в системе, из которых часть являются резервными.

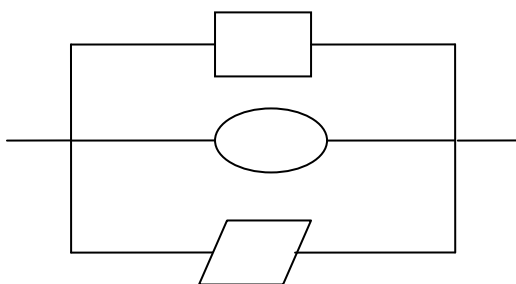


Рис. 3. Параллельное соединение элементов системы

Например, по первому варианту задания это насосная станция, состоящая из 4 параллельно работающих насосов, из которых три насоса - рабочие, а один - резервный.

Основным параметром резервирования является его кратность. Пусть n - общее число элементов в системе, а m - число элементов, необходимых для нормальной работы системы (рабочих). Под кратностью резервирования r понимается отношение числа резервных элементов к числу основных:

$$r = (n - m) / m \quad (22)$$

Бывает резервирование с целой кратностью, когда величина r есть целое число (в этом случае всегда $m = 1$), и резервирование с дробной кратностью, когда r есть дробное несокращаемое число.

1). При резервировании с постоянно включенным резервом и с целой кратностью резервирования r вероятность безотказной работы системы определяется по формуле:

$$P_{\text{сист}}(t) = 1 - [1 - P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot \dots \cdot P_m]^{r+1}, \quad (23)$$

где $P_i(t)$ - вероятность безотказной работы отдельного i -го элемента системы в течение времени t .

Если все элементы системы одинаковы, то при экспоненциальном законе надежности получаем

$$P_{\text{сист}}(t) = 1 - [1 - e^{-\lambda \cdot m}]^{r+1}, \quad (24)$$

а для среднего времени наработки системы на отказ

$$T_{\text{ср сист}} = (1/\lambda) \cdot \sum 1/(1+i) \quad (25)$$

Здесь λ - интенсивность отказа отдельного элемента. Например, при $n=3$ и $m=1$ получаем ($r = n-m/m=3-1=2$):

$$P_{\text{сист}} = 1 - [1-P]^{r+1} = 1 - [1-P]^3 = 1 - (1-3P+3P^2-P^3) = 3P-3P^2+P^3 = 3 \cdot e^{-\lambda t} - 3 \cdot e^{-2\lambda t} + e^{-3\lambda t} \quad (\text{см. табл. 6}), \text{ а } T_{\text{ср сист}} = 1/\lambda (1+1/2+1/3) = 11/6 \cdot \lambda$$

2). При резервировании с постоянно включенным резервом и дробной кратностью получаем следующие формулы :

$$P_{\text{сист}}(t) = \sum C \cdot P_0^{n-i}(t) \cdot \sum (-1)^j \cdot C_i^j \cdot P_0^j(t) \quad (26)$$

$$T_{\text{ср сист}} = 1/\lambda \cdot \sum 1/(m+i) \quad (27)$$

где $P_0(t)$ - вероятность безотказной работы отдельного элемента системы, C_i^j - число сочетаний из i элементов по j . Например, при $n=4$ и $m=2$, $r=(n-m)/m=2/2$ получим :

$$P_{\text{сист}}(t) = C_4^0 \cdot P_0^4 + C_4^1 \cdot P_0^3 \cdot (1 - C_1^1 \cdot P_0) + C_4^2 \cdot P_0^2 \cdot (1 - C_2^1 \cdot P_0 + C_2^2 \cdot P_0^2) = \\ = \sum C_4^i \cdot P_0^{4-i} \cdot \sum (-1)^j \cdot C_i^j \cdot P_0^j = P_0^4 + 4P_0^3 \cdot (1 - P_0) + 6P_0^2 \cdot (1 - 2P_0 + P_0^2) = 6P_0^2 - 8P_0^3 + 3P_0^4$$

(см. табл. 6)

$$T_{\text{ср сист}} = 1/\lambda \cdot \sum 1/(2+i) = 1/\lambda \cdot (1/2 + 1/3 + 1/4) = 13/12 \lambda$$

3). В случае отсутствия резервирования ($r = 0$), когда к отказу системы приводит отказ любого из ее элементов, получаем :

$$P_{\text{сист}}(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t) \cdot \dots \cdot P_n(t) \quad (28)$$

Для одинаковых элементов и при экспоненциальном законе надежности:

$$P_{\text{сист}}(t) = P_0^n(t) = e^{-n \cdot \lambda \cdot t} \quad (29)$$

$$P_{\text{ср сист}} = 1/n \cdot \lambda \quad (30)$$

В целом можно показать, что для всех указанных случаев можно путем аналогичных рассуждений составить таблицу [4]. Такая таблица 6 для системы, состоящей не более чем из $n = 5$ однотипных элементов, составлена при любых требованиях, накладываемых на возможные состояния их работы

(работа m элементов из n). Каждая клетка таблицы дает формулу для вычисления вероятности безотказной работы соответствующей системы.

Таблица 6. Определение вероятности безотказной работы системы ($n=5$)

m - число элементов для нормальной работы	Значения $P_{\text{сист}}$ при общем числе n элементов в системе				
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=4$	$n=5$
1	P_0	$2P_0 - P_0^2$	$3P_0 - 3P_0^2 + P_0^3$	$4P_0 - 6P_0^2 + 4P_0^3 - P_0^4$	$5P_0 - 10P_0^2 + 10P_0^3 - 5P_0^4 + P_0^5$
2	-	P_0^2	$3P_0^2 - 2P_0^3$	$6P_0^2 - 8P_0^3 + 3P_0^4$	$10P_0^2 - 20P_0^3 + 15P_0^4 - 4P_0^5$
3	-	-	P_0^3	$4P_0^3 - 3P_0^4$	$10P_0^3 - 15P_0^4 + 6P_0^5$
4	-	-	-	P_0^4	$5P_0^4 - 4P_0^5$
5	-	-	-	-	P_0^5

При решении данной задачи использовать приведенные выше формулы и таблицу 6.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем [Электронный ресурс]/ Рябинин И.А.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Политехника, Издательство Санкт-Петербургского университета, 2012.— 276 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/16298>.

2. Бирюзова Е.А. Теплоснабжение. Часть 1. Горячее водоснабжение [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Бирюзова Е.А.— Электрон. текстовые данные.— СПб.: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ЭБС АСВ, 2012.— 192 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/19046>.

3. Ноздренко Г.В. Надежность ТЭС [Электронный ресурс]: учебное пособие/ Ноздренко Г.В., Томилов В.Г., Григорьева О.К.— Электрон. текстовые данные.— Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2009.— 74 с.— Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45117>.

4. Голдаев С.В. Надежность и оптимизация систем теплоэнергоснабжения

промпредприятий. - Издательство ТПУ, Томск 2007. - 168 с.

5. Мальцев А.И. Надежность систем теплоэнергоснабжения промышленных предприятий. Конспект лекций. - Издательство МГУПС (МИИТ), 2011. - 39 с.

6. Ефремов Г.И. Моделирование химико-технологических процессов. – Издательство ИНФРА-М, - 2016. – 254 с.