


П. А. Трубаев

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ
И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ**

 «Инфра-Инженерия»

П. А. Трубаев

**ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ
И ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
В ТЕПЛОТЕХНОЛОГИИ**

Монография

Инфра-Инженерия
Москва – Вологда
2019

УДК 536.7
ББК 31.31
Т 77

ФЗ № 436-ФЗ	Издание не подлежит маркировке в соответствии с п. 1 ч. 2 ст. 1
----------------	--

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Воронежского государственного
технического университета **Н. В. Мозговой**;
доктор технических наук, профессор Белгородского государственного
технологического университета им. В.Г. Шухова **П. В. Беседин**;
кандидат технических наук, доцент Московского энергетического
института (технического университета) **Е. Г. Гашо**

Трубаев, П. А.

Т 77 Термодинамический и эксергетический анализ в теплотехнологии:
монография. – М.: Инфра-Инженерия, 2019. – 228 с.

ISBN 978-5-9729-0279-8

В монографии предложены обобщенные методы термодинамических расчетов сложных теплотехнологических процессов, включающие: методы тепловых расчетов процессов и аппаратов, в которых происходит большое количество взаимосвязанных параллельно протекающих химических преобразований, что характерно для производства строительных материалов; методы эксергетического анализа теплотехнологических процессов и метод дифференциации (разделения) эксергетических потерь в топливных теплотехнологических установках, осуществляющих теплопередачу от потока горячего газа к технологическому материалу или теплоносителю.

В приложениях к изданию приведены согласованные термодинамические данные соединений, характерных для технологии силикатных строительных материалов.

Монография предназначена для научных и инженерных работников в области промышленной теплоэнергетики и теплотехники, химических технологий, процессов и аппаратов химических технологий, а также магистрантов и аспирантов, обучающихся по данным направлениям.

Публикуется в авторской редакции.

ISBN 978-5-9729-0279-8

© Трубаев П. А., автор, 2019
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
1. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	11
1.1. Методы термодинамического анализа	11
1.1.1. Применение первого закона термодинамики к химическим процессам	11
1.1.2. Теплота химических реакций.....	13
1.1.3. Закон Гесса	15
1.1.4. Закон Кирхгофа	18
1.1.5. Расчет тепловых эффектов химических преобразований на основе различных базовых уровней.....	22
1.1.6. Теплота образования химических соединений из оксидов при произвольной температуре.....	30
1.1.7. Применение второго закона термодинамики к химическим процессам.....	35
1.1.8. Понятие о термодинамике неравновесных процессов	43
1.1.9. Термодинамическая база данных.....	43
1.2. Тепловые расчеты теплотехнологических процессов и установок	54
1.2.1. Тепловые балансы теплотехнологических установок.....	54
1.2.2. Уравнение теплового баланса на основе характеристик входных и выходных потоков.....	60
1.2.3. Расчет затрат теплоты на декарбонизацию различными способами	67
1.2.4. Баланс процесса обжига извести.....	70
1.2.5. Расчет затрат теплоты при последовательном преобразовании материала в печи	71
1.3. Критерии термодинамической эффективности процесса преобразования исходного сырья в клинкер	77
1.3.1. Термодинамические характеристики процесса получения клинкера	77
1.3.2. Зависимость свойств клинкера от термодинамических характеристик	79
1.3.3. Обобщенный баланс термодинамических свойств.....	82
1.3.4. Критерии термодинамической эффективности процесса получения клинкера.....	86

1.4. Тепловой эффект клинкерообразования (ТЭК)	88
1.4.1. Обзор методов расчета ТЭК.....	88
1.4.2. Упрощенные методики для расчета ТЭК.....	94
1.4.3. Сравнение расчета ТЭК по разным методикам.....	96
1.4.4. Метод расчета ТЭК на основе баланса термодинамических свойств	100
1.4.5. Методика расчета ТЭК для различных видов сырья и клинкера	102
2. ЭКСЕРГЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И УСТАНОВОК.....	107
2.1. Основные понятия эксергетического анализа	107
2.1.1. Понятие об эксергии.....	107
2.1.2. Эксергетический баланс и эксергетический КПД.....	109
2.1.3. Методы эксергетического анализа	112
2.2. Виды эксергии и её расчет	117
2.2.1. Обзор методов расчета эксергии.....	117
2.2.2. Классификация составляющих эксергии	121
2.2.3. Эксергия вещества в замкнутом объеме.....	122
2.2.4. Термомеханическая эксергия вещества в потоке	125
2.2.5. Эксергия теплового потока	127
2.2.6. Эксергия излучения	130
2.2.7. Химическая эксергия.....	131
2.2.8. Расчет химической эксергии для разных веществ отсчета и температуры окружающей среды	135
2.3. Расчет эксергии технологических материалов и веществ	140
2.3.1. Эксергия топлива	140
2.3.2. Эксергия продуктов горения и печных газов	143
2.3.3. Эксергия водяного пара и воды	145
2.3.4. Эксергия влажного воздуха.....	147
2.4. Эксергетический анализ типовых процессов и установок	153
2.4.1. Анализ теплообменных процессов и оптимизация теплообменных аппаратов	153
2.4.2. Дифференциация эксергетических потерь при теплообмене.....	157
2.4.3. Эксергетический анализ процесса сушки	164
2.4.4. Эксергетический анализ химических реакций.....	168
2.4.5. Эксергетический анализ тепловых циклов	170
2.4.6. Особенности расчета технологических установок.....	171

2.5. Методы дифференциации эксергетических потерь в теплотехнологических и теплоэнергетических установках.....	175
2.5.1. Типовые эксергетические потери в теплотехнологических процессах.....	175
2.5.2. Эксергетические потери при постоянной теплоемкости потоков (балансовый метод).....	179
2.5.3. Расчет термомеханической эксергии с учетом зависимости теплоемкости от температуры и переменной массы материального потока.....	180
2.5.4. Эксергетические потери при изменении свойств потоков (интегральный метод).....	181
2.6. Анализ теплотехнологических и теплоэнергетических установок	183
2.6.1. Эксергетические потери процесса обжига извести	183
2.6.2. Эксергетические потери процесса производства керамзита.....	187
2.6.3. Эксергетический баланс колосникового клинкерного холодильника	191
2.6.4. Эксергетический анализ процесса обжига цементного клинкера.....	195
2.6.5. Анализ конденсатного котла.....	200
Заключение	204
Приложение 1. Стандартная энтальпия образования, энергия Гиббса, энтропия и уравнения теплоемкости для некоторых соединений.....	208
Приложение 2. Энтальпия образования из оксидов при 0°С и уравнения теплосодержания $H(t)$ для химических соединений силикатных технологий	213
Приложение 3. Химическая эксергия элементов	218
Приложение 4. Химическая эксергия соединений.....	219
Библиографический список	224