

**А. И. Бенин**  
**А. А. Коссой**

**ТЕРМИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ**  
**И ТЕРМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**  
**ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ВЕЩЕСТВ,**  
**ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**  
**И ОБЪЕКТОВ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НА БАЗЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА  
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**A. Benin, A. Kossoy**

**THERMAL HAZARDS  
AND THERMAL SAFETY  
OF ENERGETIC MATERIALS,  
CHEMICAL PROCESSES  
AND OBJECTS**

**THE METHODOLOGY OF INVESTIGATION  
BASED ON THE SYSTEMIC APPROACH  
AND MATHEMATICAL MODELLING**

**Monograph**

Moscow Vologda  
Infra-Ingeneria  
2021

**А. И. Бенин, А. А. Коссой**

**ТЕРМИЧЕСКИЕ ОПАСНОСТИ  
И ТЕРМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ  
ЭНЕРГОНАСЫЩЕННЫХ ВЕЩЕСТВ,  
ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ОБЪЕКТОВ  
ИХ ПРИМЕНЕНИЯ**

**МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
НА БАЗЕ СИСТЕМНОГО ПОДХОДА  
И МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

**Монография**

Москва Вологда  
«Инфра-Инженерия»  
2021

УДК 614.83:004.942  
ББК 30н:22.19  
Б46

Рецензенты:

*Лисанов Михаил Вячеславович*, д-р техн. наук, директор Центра анализа риска  
ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной  
безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ);

*Зарко Владимир Егорович*, д-р физ.-мат. наук, проф., главный научный сотрудник Института  
химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения РАН,  
заместитель главного редактора журнала «Физика горения и взрыва»;

*Мазур Андрей Семенович*, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой химической энергетики  
декан инженерного химико-технологического факультета  
Санкт-Петербургского государственного технологического института  
(технического университета)

**Бенин, А. И.**

**Б46** Термические опасности и термическая безопасность энергонасыщенных веществ, химических процессов и объектов их применения. Методология исследования на базе системного подхода и математического моделирования : монография / А. И. Бенин; А. А. Коссой. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 728 с. : ил., табл.  
ISBN 978-5-9729-0574-4

Рассмотрены научные основы, терминология, методология, инструментарий и технология исследования термических опасностей и обеспечения термической безопасности энергонасыщенных веществ, процессов и объектов их применения на базе системного подхода и математического моделирования. Предложены основные сведения, необходимые для практического решения задачи предупреждения катастроф и аварий тепловых взрывов в химической промышленности, при транспортировке опасных грузов, в ракетно-космической и оборонной технике.

Для специалистов, чья деятельность связана с исследованиями и практическим использованием взрывчатых веществ, ракетного топлива и других энергонасыщенных веществ, материалов, процессов и объектов, представляющих опасность теплового взрыва. Монография может быть полезна преподавателям, студентам, аспирантам и докторантам соответствующих специальностей.

**Ключевые слова:** термическая безопасность, тепловой взрыв, химические реакции, опасные опасности, термические опасности, энергетические материалы, энергонасыщенные вещества, самореагирующие вещества, термический анализ, дифференциальная сканирующая калориметрия, адиабатическая калориметрия, реакционная калориметрия, кинетическое исследование, кинетическая модель, системный подход, математическое моделирование.

УДК 614.83:004.942  
ББК 30н:22.19

ISBN 978-5-9729-0574-4

© Бенин А. И., Коссой А. А., 2021  
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2021  
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2021

# КРАТКОЕ ОГЛАВЛЕНИЕ

---

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	9
ГЛАВА 1. БАЗИСНЫЕ ПОНЯТИЯ .....	15
ГЛАВА 2. АППАРАТ БЕЗОПАСНОСТИ .....	31
ГЛАВА 3. ТЕРМИНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ .....	51
ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ .....	73
ГЛАВА 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ .....	117
ГЛАВА 6. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ .....	139
ГЛАВА 7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ .....	177
ГЛАВА 8. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ .....	211
ГЛАВА 9. ПСЕВДОАДИАБАТИЧЕСКАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ .....	259
ГЛАВА 10. РЕАКЦИОННАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ .....	295
ГЛАВА 11. МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ ПОСТРОЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ .....	317
ГЛАВА 12. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ПОДСИСТЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЦЕЛЕВОГО ОБЪЕКТА .....	385
ГЛАВА 13. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА ПРИ КОНДУКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ .....	405
ГЛАВА 14. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В ЖИДКОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ .....	433
ГЛАВА 15. ИНДИКАТОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ .....	475
ГЛАВА 16. ТЕМПЕРАТУРА САМОУСКОРЯЮЩЕГОСЯ РАЗЛОЖЕНИЯ .....	495
ГЛАВА 17. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВНУТРЕННЕ БЕЗОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ .....	527

<b>ГЛАВА 18. АВАРИЙНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ ТЕРМИЧЕСКИМИ ОПАСНОСТЯМИ .....</b>	<b>553</b>
<b>ГЛАВА 19. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА .....</b>	<b>579</b>
<b>ГЛАВА 20. ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА .....</b>	<b>609</b>
<b>ГЛАВА 21. ТЕРМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА .....</b>	<b>665</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НАСТОЯЩЕЙ МОНОГРАФИИ .....</b>	<b>703</b>
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>713</b>
<b>ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>717</b>

# ОГЛАВЛЕНИЕ

---

<b>КРАТКОЕ ОГЛАВЛЕНИЕ .....</b>	<b>7</b>
<b>ПРЕДИСЛОВИЕ.....</b>	<b>9</b>
<i>Зачем нужна эта книга .....</i>	<i>9</i>
<i>Немного истории.....</i>	<i>10</i>
<i>Содержание монографии .....</i>	<i>11</i>
<i>Для кого эта книга.....</i>	<i>13</i>
<i>Благодарности .....</i>	<i>14</i>
<b>ГЛАВА 1. БАЗИСНЫЕ ПОНЯТИЯ.....</b>	<b>15</b>
1.1. Объекты, понятия, термины .....	17
1.2. Классификация .....	20
1.3. Система и системный подход .....	21
1.4. Моделирование .....	23
Литература к главе 1.....	29
<b>ГЛАВА 2. АППАРАТ БЕЗОПАСНОСТИ .....</b>	<b>31</b>
2.1. О терминологии безопасности .....	33
2.2. О понятии «опасность» .....	35
2.3. О понятии «безопасность» .....	39
2.4. О понятии «риск» .....	42
Литература к главе 2.....	46
<b>ГЛАВА 3. ТЕРМИНОЛОГИЯ ХИМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ .....</b>	<b>51</b>
3.1. Химическая опасность .....	53
3.2. Химические вещества и химические реакции .....	53
3.3. Классификация химических опасностей .....	58
3.4. Классификация опасных химических веществ.....	60
3.5. Физические виды опасностей в СГС.....	63
3.6. Нормативно-правовая база химической безопасности.....	67
Литература к главе 3.....	70
<b>ГЛАВА 4. ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ .....</b>	<b>73</b>
4.1. Терминология термической безопасности.....	75
4.2. Концептуальные основы термической безопасности.....	85
4.3. Термическая безопасность как системный объект.....	89

4.4. Математическое моделирование в термической безопасности.....	93
4.5. АСНИ как инструмент математического моделирования.....	97
4.6. Тепловой взрыв: печальный опыт и его последствия.....	101
Литература к главе 4.....	112
<b>ГЛАВА 5. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕРМИЧЕСКИХ ОПАСНОСТЕЙ.....</b>	<b>117</b>
5.1. Системный подход к идентификации опасностей.....	119
5.2. Информационные источники о термической опасности.....	124
5.3. Процедуры идентификации термической опасности.....	126
5.4. Термические опасности в СГС.....	131
Литература к главе 5.....	135
<b>ГЛАВА 6. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ХИМИЧЕСКИХ РЕАКЦИЙ.....</b>	<b>139</b>
6.1. Понятия кинетического моделирования.....	141
6.2. Химическая реакция как динамическая система.....	148
6.3. Дескриптивные кинетические модели.....	152
6.4. Формальные кинетические модели.....	155
6.5. Изоконверсионная кинетика.....	159
6.6. Структура и основные этапы экспериментального кинетического исследования.....	162
6.7. Кинетическая система.....	165
6.8. Корректность экспериментального кинетического исследования.....	169
Литература к главе 6.....	173
<b>ГЛАВА 7. АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>177</b>
7.1. Информационно-измерительные системы.....	179
7.2. Ввод исходной экспериментальной информации.....	184
7.3. Процедуры первичной обработки исходного экспериментального сигнала.....	186
7.3.1. <i>Общая характеристика процедур первичной обработки.....</i>	<i>186</i>
7.3.2. <i>Процедуры фильтрации и сглаживания.....</i>	<i>187</i>
7.3.3. <i>Процедуры определения базовой линии прибора.....</i>	<i>189</i>
7.3.4. <i>Определение виртуальной базовой линии.....</i>	<i>190</i>
7.3.5. <i>Редактирование данных.....</i>	<i>193</i>
7.3.6. <i>Прореживание данных.....</i>	<i>193</i>
7.3.7. <i>Статистический анализ данных.....</i>	<i>193</i>
7.4. Обзор программного комплекса TSS.....	195
7.4.1. <i>Общая характеристика TSS.....</i>	<i>195</i>
7.4.2. <i>Функциональная и информационная структура.....</i>	<i>198</i>
7.4.3. <i>Краткая характеристика компонентов.....</i>	<i>199</i>
Литература к главе 7.....	208



<b>ГЛАВА 8. ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНАЯ СКАНИРУЮЩАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ.....</b>	<b>211</b>
8.1. Основные сведения о методе ДСК .....	213
8.2. Виды термоаналитических приборов .....	217
8.2.1. Приборы ДТА.....	217
8.2.2. Калориметры теплового потока .....	219
8.2.3. ДСК компенсационного типа .....	220
8.3. Математическая модель ДСК.....	221
8.3.1. Однотельная модель.....	221
8.3.2. Анализ модели ДСК.....	224
8.4. Калибровка приборов дифференциальной сканирующей калориметрии.....	226
8.4.1. Температурная калибровка .....	227
8.4.2. Статическая калибровка калориметров.....	231
8.4.3. Динамическая калибровка калориметров .....	234
8.5. Восстановление (деконволюция) данных ДСК.....	237
8.6. Применение сложных законов нагрева при кинетических исследованиях .....	240
8.7. Измерение теплопроводности веществ методом ДСК.....	245
8.8. Практические рекомендации по проведению кинетических экспериментов .....	250
8.8.1. Корректность кинетического калориметрического эксперимента.....	250
8.8.2. Температурные режимы кинетического эксперимента .....	251
8.8.3. Типовая стратегия кинетического исследования.....	251
8.9. Программа TDPго.....	253
Литература к главе 8.....	254
<b>ГЛАВА 9. ПСЕВДОАДИАБАТИЧЕСКАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ.....</b>	<b>259</b>
9.1. Введение .....	261
9.2. Устройство адиабатических калориметров .....	264
9.2.1. Калориметры типа ARC.....	264
9.2.2. Дифференциальный адиабатический калориметр DARC.....	266
9.2.3. Калориметры с компенсацией давления.....	266
9.2.4. Адиабатический калориметр «дюар» .....	268
9.3. Математическая модель адиабатического калориметра .....	269
9.4. Методы анализа данных адиабатической калориметрии .....	270
9.4.1. Анализ данных по давлению .....	271
9.4.2. Термическая инерция адиабатической калориметрии.....	274
9.5. Начальная температура реакции и неопределенность состояния образца .....	285
9.5.1. Газообразование при иницировании .....	286
9.5.2. Замедление скорости саморазогрева после обнаружения реакции.....	287
9.5.3. Влияние ненулевой конверсии при температуре начала реакции .....	287

9.6. Заключительные комментарии .....	290
9.7. Программа ADaExpert .....	291
Литература к главе 9 .....	292
<b>ГЛАВА 10. РЕАКЦИОННАЯ КАЛОРИМЕТРИЯ.....</b>	<b>295</b>
10.1. Введение .....	297
10.2. Теоретические основы реакционной калориметрии .....	299
10.2.1. Реакционный калориметр теплового потока .....	300
10.2.2. Реакционный калориметр с датчиком теплового потока .....	306
10.2.3. Реакционные калориметры теплового баланса .....	307
10.2.4. Реакционные калориметры компенсационного типа .....	308
10.3. Первичная обработка данных реакционной калориметрии (программа RCPго) .....	310
10.4. Рекомендации по организации эксперимента в реакционной калориметрии .....	311
Литература к главе 10 .....	314
<b>ГЛАВА 11. МЕТОДОЛОГИЯ И ИНСТРУМЕНТЫ ПОСТРОЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ.....</b>	<b>317</b>
11.1. Введение .....	319
11.2. Методология идентификации кинетических моделей .....	321
11.3. Методология решения обратной коэффициентной задачи .....	323
11.4. Обзор методов минимизации целевой функции в TSS .....	327
11.4.1. Упрощенные методы кинетического анализа .....	327
11.4.2. Метод Ньютона — Гаусса .....	328
11.4.3. Тензор-метод .....	331
11.5. Практические аспекты решения обратной коэффициентной задачи .....	333
11.5.1. Выбор начальных значений параметров .....	333
11.5.2. Выбор оптимальной формы параметров поиска .....	337
11.5.3. О показателях точности экспериментальных данных .....	337
11.5.4. Поиск глобального минимума целевой функции .....	338
11.6. Оценка погрешности определения кинетических параметров .....	341
11.7. Множественность решений обратной задачи .....	344
11.8. Прямая задача кинетического анализа .....	347
11.8.1. Общие сведения .....	347
11.8.2. Методы численного интегрирования моделей химических реакций .....	349
11.9. Типы кинетических моделей в TSS .....	350
11.9.1. Дескриптивные кинетические модели .....	352
11.9.2. Многостадийные формально-кинетические модели .....	355
11.9.3. Модель реакции с плавлением .....	358
11.10. Изоконверсионная кинетика .....	364

11.11. Как выбрать формальную модель: несколько советов .....	366
11.11.1. Идентификация самоускорения .....	366
11.11.2. Идентификация типа сложной реакции .....	369
11.12. Влияние экспериментальных факторов на результаты кинетиического анализа .....	372
11.12.1. Влияние термической инерции на кинетический анализ данных динамических экспериментов .....	372
11.12.2. Влияние термической инерции на кинетический анализ данных изопериболических экспериментов .....	375
11.13. Программы для кинетического анализа комплекса TSS .....	377
Литература к главе 11 .....	378
<b>ГЛАВА 12. МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА ПОДСИСТЕМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ЦЕЛЕВОГО ОБЪЕКТА .....</b>	<b>385</b>
12.1. Введение .....	387
12.2. Основы теории теплового взрыва .....	389
12.3. Классические теории теплового взрыва .....	392
12.3.1. <i>Нестационарная теория теплового взрыва Н. Н. Семенова</i> .....	393
12.3.2. <i>Квазистационарная теория Мерджанова</i> .....	397
12.3.3. <i>Стационарная теория теплового взрыва Франк-Каменецкого</i> .....	399
12.3.4. <i>Сопоставление классических теорий теплового взрыва</i> .....	400
12.4. Моделирование теплового взрыва в комплексе TSS .....	402
Литература к главе 12 .....	403
<b>ГЛАВА 13. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ВЗРЫВА ПРИ КОНДУКТИВНОМ ТЕПЛООБМЕНЕ .....</b>	<b>405</b>
13.1. Введение .....	407
13.2. Постановка задачи .....	407
13.2.1. <i>Физическая модель</i> .....	407
13.2.2. <i>Математическая модель</i> .....	408
13.2.3. <i>Геометрия объектов</i> .....	409
13.2.4. <i>Начальные условия</i> .....	411
13.2.5. <i>Граничные условия</i> .....	411
13.2.6. <i>Кинетическая модель</i> .....	414
13.2.7. <i>Режимы моделирования и организация решения</i> .....	414
13.3. Численные методы и алгоритмы решения .....	415
13.4. Примеры моделирования .....	422
13.4.1. <i>Тепловой взрыв объекта, заполненного взрывчатым веществом</i> .....	422
13.4.2. <i>Тепловой взрыв объекта в контейнере</i> .....	424
13.4.3. <i>Тепловой взрыв в системе с двумя независимыми         экзотермическими реакциями</i> .....	425

13.4.4. Тепловой взрыв литиевых батарей.....	426
13.4.5. Тепловой взрыв в сосуде Дьюара.....	428
Литература к главе 13.....	430
<b>ГЛАВА 14. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВЗРЫВА В ЖИДКОФАЗНЫХ СИСТЕМАХ.....</b>	<b>433</b>
14.1. Введение.....	435
14.2. Модель теплового взрыва реакционноспособной жидкости при естественной конвекции.....	438
14.2.1. Физические основы модели.....	438
14.2.2. Основные уравнения модели.....	441
14.2.3. Тепломассообмен в газовой подушке и расчет давления.....	445
14.2.4. Теплообмен в стенках бака. Граничные и начальные условия.....	449
14.2.5. Теплофизические свойства.....	450
14.3. Алгоритмы и вычислительные методы.....	451
14.4. Верификация алгоритма моделирования.....	454
14.4.1. Нестационарная тепловая конвекция в прямоугольной полости.....	454
14.4.2. Тепловая конвекция в вертикальной прямоугольной щели.....	455
14.4.3. Тепловая конвекция в заполненном жидкостью вертикальном цилиндре.....	456
14.4.5. Расчет критических условий теплового взрыва в жидкостях в условиях развитой естественной конвекции.....	460
14.5. Программное обеспечение для моделирования конвективного теплового взрыва.....	461
14.6. Моделирование теплового взрыва при свободноконвективном теплопереносе.....	462
14.6.1. Постановка задачи.....	462
14.6.2. Развитие теплового взрыва при превышении безопасного уровня температуры внешней среды.....	464
14.6.3. Тепловой взрыв бака в зоне пожара.....	467
14.6.4. Прямая верификация результатов моделирования.....	470
Литература к главе 14.....	471
<b>ГЛАВА 15. ИНДИКАТОРЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ.....</b>	<b>475</b>
15.1. Введение.....	477
15.2. Теоретические основы индикаторов термической опасности.....	479
15.2.1. Общая характеристика.....	479
15.2.2. Индикатор термической стабильности TCL.....	480
15.2.3. Индикатор теплового старения TAL.....	482
15.2.4. Индекс реакционной опасности NFPA.....	483
15.2.5. Адиабатическое время достижения максимальной скорости TMR.....	486
15.2.6. Индикатор TER.....	487

15.3. Программное обеспечение ReRank.....	488
15.4. Примеры применения.....	489
Литература к главе 15.....	492
<b>ГЛАВА 16. ТЕМПЕРАТУРА САМОУСКОРЯЮЩЕГОСЯ РАЗЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>495</b>
16.1. Введение.....	497
16.2. Анализ тест-методов ООН определения ТСУР.....	499
16.2.1. Тест $H1$ .....	499
16.2.2. Тесты $H2$ и $H3$ .....	504
16.2.3. Тест $H4$ .....	506
16.3. Анализ методов масштабирования, применяемых при определении ТСУР.....	506
16.3.1. Метод масштабирования ПОГ.....	506
16.3.2. Масштабирование, основанное на подоби теорий Франк-Каменецкого и Семенова.....	507
16.3.3. Масштабирование, основанное на равенстве периодов полуохлаждения.....	508
16.3.4. Масштабирование, основанное на теории регулярного режима.....	508
16.3.5. Сравнительный анализ методов масштабирования для теста $H4$ .....	511
16.4. Применение математического моделирования для определения ТСУР.....	513
16.4.1. Преимущества математического моделирования.....	513
16.4.2. Примеры применения моделирования.....	514
16.5. Об использовании ТСУР в системе СГС.....	516
16.6. Экспериментальная верификация результатов моделирования.....	517
16.6.1. Введение.....	517
16.6.2. Верификация определения ТСУР методом моделирования для твердого продукта.....	518
16.6.3. Верификация расчета ТСУР для жидкого продукта.....	523
Литература к главе 16.....	524
<b>ГЛАВА 17. ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ВНУТРЕННЕ БЕЗОПАСНЫХ ПРОЦЕССОВ.....</b>	<b>527</b>
17.1. Введение.....	529
17.1.1. Оценка термического риска.....	529
17.1.2. Методы обеспечения термической безопасности.....	532
17.2. Концепция внутренне безопасного процесса.....	533
17.3. Создание внутренне безопасного процесса.....	536
17.3.1. Постановка задачи.....	536
17.3.2. Пример разработки внутренне безопасного процесса.....	540
17.4. Анализ устойчивости теплового режима процесса.....	544
17.4.1. Введение.....	544
17.4.2. Применение нелинейной оптимизации.....	545

<b>ГЛАВА 18. АВАРИЙНАЯ ЗАЩИТА ОБЪЕКТОВ, ОБЛАДАЮЩИХ ТЕРМИЧЕСКИМИ ОПАСНОСТЯМИ .....</b>	<b>553</b>
18.1. Введение в системы аварийного сброса давления .....	555
18.2. Моделирование систем аварийного сброса давления .....	560
18.3. Двухфазность потока в системе аварийного сброса давления .....	563
18.4. Химические реакции в пакете BST.....	567
18.5. Двухфазный поток в системе аварийного сброса давления .....	569
18.6. Пакет BST .....	573
18.7. Моделирование течений через тракты САСД.....	574
18.8. Пример применения .....	575
Литература к главе 18.....	577
<b>ГЛАВА 19. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННОГО ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА .....</b>	<b>579</b>
19.1. Введение. О перексиде водорода.....	581
19.2. Современные представления о термическом разложении пероксида водорода .....	584
19.2.1. Введение .....	584
19.2.2. Гомогенное парофазное разложение .....	587
19.2.3. Гетерогенное парофазное разложение.....	587
19.2.4. Гомогенное жидкофазное разложение.....	591
19.2.5. Гетерогенное жидкофазное разложение .....	592
19.2.6. Макрокинетика процесса .....	593
19.2.7. Краткое заключение.....	595
19.3. Структура кинетической модели термического разложения пероксида водорода .....	596
19.4. Физико-химические свойства водных растворов пероксида водорода .....	601
Литература к главе 19.....	606
<b>ГЛАВА 20. ИССЛЕДОВАНИЯ КИНЕТИКИ ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА .....</b>	<b>609</b>
20.1. Постановка задачи.....	611
20.2. Установка динамической манометрии и методика исследования .....	612
20.2.1. Общее описание.....	612
20.2.2. Система термостатирования.....	615
20.2.3. Измерительно-информационная система .....	617
20.2.4. Метрологическое обеспечение.....	623
20.2.5. Методика эксперимента.....	629
20.3. Исследование кинетики термического разложения пероксида водорода.....	633
20.3.1. Изотермические исследования.....	633

20.3.2. <i>Неизотермический эксперимент</i> .....	637
20.4. Пероксид водорода в контакте с алюминием.....	642
20.5. Пероксид водорода в контакте с полимерными материалами.....	648
20.6. Некоторые вопросы оценки стабильности пероксида водорода .....	658
Литература к главе 20.....	663
<b>ГЛАВА 21. ТЕРМИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ОБЪЕКТОВ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРОКСИДА ВОДОРОДА.....</b>	<b>665</b>
21.1. Задача обеспечения термической безопасности объектов применения пероксида водорода .....	667
21.1.1. <i>Постановка задачи</i> .....	667
21.1.2. <i>Модель бака с пероксидом водорода в приближении идеального         перемешивания</i> .....	671
21.1.3. <i>Модель объекта с пероксидом водорода при наличии         в баке свободной конвекции</i> .....	673
21.2. Адиабатический период индукции теплового взрыва.....	673
21.3. Влияние внешнего теплообмена на параметры теплового взрыва .....	676
21.4. Влияние внутреннего конвективного теплообмена на параметры теплового взрыва .....	679
21.5. Определение температуры самоускоряющегося разложения для ёмкости с пероксидом водорода .....	682
21.6. Влияние неоднородности температурного поля (гидродинамическая модель).....	683
21.7. Методика оценки опасности развития теплового взрыва для объектов с пероксидом водорода.....	685
21.8. Моделирование объектов, содержащих пероксид водорода, при наличии системы аварийного сброса давления .....	687
21.8.1. <i>Введение</i> .....	687
21.8.2. <i>Сценарии аварийных ситуаций и условия моделирования</i> .....	688
21.8.3. <i>Моделирование бака со стандартным пероксидом водорода</i> .....	689
21.8.4. <i>Моделирование бака с «загрязненным» пероксидом водорода</i> .....	694
Литература к главе 21.....	701
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ. ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ НАСТОЯЩЕЙ МОНОГРАФИИ .....</b>	<b>703</b>
1. Международные проекты.....	705
2. Монография .....	705
3. Публикации в российской печати .....	705
4. Публикации в зарубежных журналах .....	707
5. Доклады на зарубежных конференциях и симпозиумах.....	709
<b>ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ .....</b>	<b>713</b>