

УНИВЕРСИТЕТЫ РОССИИ

В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

## МЕТОДЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Ответственный редактор – *Н. М. Жаворонков*

МОНОГРАФИЯ

2-е издание



СООТВЕТСТВУЕТ  
ПРОГРАММАМ  
ВЕДУЩИХ НАУЧНО-  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ШКОЛ

**Юрайт**  
издательство  
biblio-online.ru

**В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова**

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ  
ПРОЦЕССОВ  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ:  
МЕТОДЫ НЕРАВНОВЕСНОЙ  
ТЕРМОДИНАМИКИ**

**МОНОГРАФИЯ**

**Ответственный редактор — Н. М. Жаворонков**

**2-е издание, переработанное и дополненное**

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)**

**Москва ■ Юрайт ■ 2018**

УДК 543  
ББК 24.4  
К30

**Авторы:**

**Кафаров Виктор Вячеславович** — доктор технических наук, профессор, академик РАН;

**Дорохов Игорь Николаевич** — профессор, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры кибернетики химико-технологических процессов факультета информационных технологий и управления Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева, президент, учредитель и академик Международной академии системных исследований, председатель Бюро Президиума Международной академии системных исследований;

**Кольцова Элеонора Моисеевна** — доктор технических наук, заведующая кафедрой информационных компьютерных технологий факультета информационных технологий и управления Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева.

**Ответственный редактор:**

**Жаворонков Николай Михайлович** — доктор технических наук, профессор, академик АН СССР, герой Социалистического труда (1907—1990), лауреат Государственной премии СССР. С 1948 по 1962 г. — ректор Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева. С 1962 по 1988 г. директор Института общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова АН СССР.

**Кафаров, В. В.**

К30

Системный анализ процессов химической технологии: методы неравновесной термодинамики : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, Э. М. Кольцова ; отв. ред. Н. М. Жаворонков — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 367 с. — (Серия : Университеты России).

ISBN 978-5-534-06997-6

Серия «Университеты России» позволит высшим учебным заведениям нашей страны использовать в образовательном процессе издания (в том числе учебники и учебные пособия по различным дисциплинам), подготовленные преподавателями лучших университетов России и впервые опубликованные в издательствах университетов. Все представленные в этой серии работы прошли экспертную оценку учебно-методического отдела издательства и публикуются в оригинальной редакции.

В монографии рассматриваются особенности энтропийных и вариационных методов неравновесной термодинамики как одного из главных приемов системного анализа. Описан термодинамический анализ многофазных полидисперсных сред, представлены математические модели химико-технологических процессов, вариационные принципы неравновесной термодинамики для линейных систем и методы локального потенциала и производства избыточной энтропии для решения задач химической технологии. Последняя глава посвящена теме самоорганизации в процессах химической технологии.

*Для студентов, обучающихся по естественнонаучным направлениям, аспирантов, преподавателей и всех интересующихся.*

УДК 543  
ББК 24.4

Разыскиваем правообладателей: <https://www.biblio-online.ru/inform>

Пожалуйста, обратитесь в Отдел договорной работы: +7 (495) 744-00-12; e-mail: expert@urait.ru



Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Коллектив авторов, 1988

© Коллектив авторов, 2018, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2018

ISBN 978-5-534-06997-6

## Оглавление

<b>Предисловие .....</b>	<b>3</b>
<b>Введение.....</b>	<b>7</b>
<b>Глава первая. Термодинамический анализ многофазных полидисперсных сред.....</b>	<b>20</b>
§ 1.1. Законы сохранения.....	21
§ 1.2. Баланс энтропии .....	32
1.2.1. Диссипативная функция многофазной дисперсной среды .....	32
1.2.2. Потoki переноса массы и тепла в сплошной фазе .....	35
1.2.3. Движущая сила и кинетика агрегации .....	39
1.2.4. Движущая сила дробления.....	45
1.2.5. Движущие силы и потоки массоотдачи в химико- технологических системах.....	48
1.2.6. Движущие силы и потоки массоотдачи с учетом градиентов поверхностного натяжения .....	60
§ 1.3. Термодинамика линейных необратимых систем .....	79
1.3.1. Стационарные неравновесные состояния.....	79
1.3.2. Теорема о минимальном производстве энтропии .....	81
§ 1.4. Термодинамика неравновесных нелинейных гетерогенных систем.....	93
§ 1.5. Локальный потенциал и критерий эволюции для гетерогенных систем.....	107
<b>Глава вторая. Математические модели химико- технологических процессов.....</b>	<b>119</b>
§ 2.1. Массовая кристаллизация из растворов и газовой фазы .....	120
2.1.1. Кристаллизатор со взвешенным слоем.....	125
2.1.2. Кристаллизатор периодического действия с перемешиванием .....	132
2.1.3. Дисковый кристаллизатор.....	141
2.1.4. Циркуляционные вакуум-кристаллизаторы.....	147
§ 2.2. Сушка дисперсных материалов.....	153
2.2.1. Сушка в аппарате с фонтанирующим слоем .....	154
2.2.2. Сушка распылением .....	172

§ 2.3. Экстракция .....	179
2.3.1. Математическая модель экстрактора смесителя (система жидкость— жидкость) .....	182
2.3.2. Математическая модель периодического экстрактора смесителя (система твердое — жидкость).....	187
§ 2.4. Ректификация.....	191
§ 2.5. Процессы культивирования микроорганизмов с учетом фаговой инфекции .....	197

### **Глава третья. Применение вариационных принципов неравновесной термодинамики для линейных систем ..... 208**

§ 3.1. Определение диаметра включений, устойчивых по отношению к дроблению в турбулентном потоке в химико- технологических процессах .....	209
§ 3.2. Определение максимального размера кристалла в процессе агрегации .....	213
§ 3.3. Предельное пересыщение, поверхностная энергия и критический размер зародыша при кристаллизации.....	216
§ 3.4. Определение средней толщины пленки в дисперсно- кольцевых режимах течения .....	222
§ 3.5. Стационарные формы роста кристаллов .....	228
§ 3.6. Агрегативная устойчивость дисперсных систем.....	230
§ 3.7. Определение сил сопротивления [52, 53].....	235
§ 3.8. Устойчивость поверхностных слоев.....	241
§ 3.9. Определение диаметра ядра фонтана для аппарата фонтанирующего слоя .....	245
§ 3.10. Оптимальное проектирование кристаллизаторов со взвешенным слоем .....	246
§ 3.11. Устойчивость микробиологической культуры к фаговой инфекции.....	253

### **Глава четвертая. Применение методов локального потенциала и производства избыточной энтропии для решения задач химической технологии ..... 257**

§4.1. Применение метода локального потенциала для решения стационарных задач .....	257
4.1.1. Построение локального потенциала для конкретных задач химической технологии .....	258
4.1.2. Расчет профиля концентрации в химическом реакторе ....	271
4.1.3. Расчет течения Пуазейля с вязкостью, зависящей от температуры .....	275
4.1.4. Моделирование промышленных аппаратов с учетом структуры потоков .....	280
4.1.5. Моделирование процесса кристаллизации в вакуум- циркуляционном кристаллизаторе .....	284

§ 4.2. Применение метода локального потенциала для решения нестационарных задач.....	292
§ 4.3. Применение производства избыточной энтропии для качественного исследования устойчивости процессов химической технологии .....	293
4.3.1. Тепловая устойчивость.....	294
4.3.2. Устойчивость движения гетерогенной смеси.....	296
4.3.3. Устойчивость химических реакций .....	298
4.3.4. Устойчивость в электрохимическом катализе .....	299
4.3.5. Устойчивость межфазной конвекции .....	302
4.3.6. Устойчивость конвективного движения в электрохимической системе с концентрационной поляризацией .....	305

<b>Глава пятая. Самоорганизация в процессах химической технологии .....</b>	<b>313</b>
§ 5.1. Классификация особых точек.....	314
§ 5.2. Модель Лотки — Вольтерра.....	320
§ 5.3. Модели, приводящие к предельным циклам.....	323
5.3.1. Колебания в системах ферментативных реакций с обратной связью.....	325
5.3.2. Автоколебания в ферментативных реакциях с субстратным и продуктивным угнетениями.....	330
5.3.3. Колебания в реакторах непрерывного действия .....	333
§ 5.4. Модель брюсселятора.....	336
5.4.1. Модель «орегонатор» .....	340
5.4.2. Пространственная самоорганизация в процессах радикальной полимеризации.....	345
§ 5.5. Модели автоколебаний в гетерогенных каталитических реакциях.....	350
<b>Литература .....</b>	<b>355</b>