

УНИВЕРСИТЕТЫ РОССИИ

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

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

## МАССОВАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

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: МАССОВАЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ**

**МОНОГРАФИЯ**

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

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

**Книга доступна в электронной библиотечной системе  
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 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 Российского химико-технологического университета имени Д. И. Менделеева;

**Жаворонков Николай Михайлович** — доктор технических наук, профессор, академик АН СССР, герой Социалистического труда, 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: массовая кристаллизация : 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. — 368 с. — (Серия : Университеты России).

ISBN 978-5-534-06994-5

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 данной монографии, посвященной теме системного анализа химической технологии, авторы решают широкий круг проблем в области моделирования, проектирования и оптимизации процессов массовой кристаллизации из растворов и газовой фазы.

Книга состоит из четырех глав, в которых рассматриваются качественный анализ структуры процесса массовой кристаллизации, построение математических моделей процессов кристаллизации из растворов и газовой фазы, проблемы определения параметров кристаллизации, а также вопросы практического применения разработанного математического аппарата.

*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](mailto: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, 1983  
© Коллектив авторов, 2018, с изменениями  
© ООО «Издательство Юрайт», 2018

ISBN 978-5-534-06994-5

## Оглавление

Предисловие .....	5
Введение.....	9
<b>Глава первая. Качественный анализ структуры процесса массовой кристаллизации .....</b>	<b>16</b>
§ 1.1. Феноменологический подход к описанию процессов массовой кристаллизации .....	16
1.1.1. Уравнения термодинамики процессов кристаллизации (с учетом роста, агрегации, дробления, образования кристаллов) .....	16
1.1.2. Диссипативная функция многофазной гетерогенной среды .....	61
1.1.3. Структуры движущих сил процессов, происходящих при массовой кристаллизации .....	69
§ 1.2. Статистический подход к описанию процессов массовой кристаллизации .....	116
1.2.1. Методы пространственного осреднения гетерогенных сред для описания стохастических свойств процессов массовой кристаллизации.....	116
1.2.2. Методы фазового пространства и статистических ансамблей для описания стохастических свойств процессов массовой кристаллизации.....	133
1.2.3. Стохастическая модель процесса массовой кристаллизации в виде неоднородной цепи Маркова.....	136
§ 1.3. Методы математического описания гранулометрического состава кристаллов в аппаратах различных конструкций.....	137
<i>Литература</i> .....	147
<b>Глава вторая. Построение математических моделей процессов кристаллизации из растворов и газовой фазы .....</b>	<b>152</b>
§ 2.1. Построение обобщенной математической модели процесса кристаллизации из растворов и газовой фазы.....	152
§ 2.2. Математические модели процессов кристаллизации из растворов для кристаллизаторов различных типов.....	157
2.2.1. Кристаллизатор непрерывного действия с перемешиванием.....	159
2.2.2. Кристаллизатор периодического действия с перемешиванием ...	165
2.2.3. Кристаллизатор непрерывного действия с перемешиванием и отбором монодисперсных фракций.....	178
2.2.4. Кристаллизатор с классификацией суспензии и отбором монодисперсных фракций.....	213
§ 2.3. Математические модели процессов кристаллизации из газовой фазы для кристаллизаторов различных типов .....	236
2.3.1. Поверхностные кристаллизаторы.....	236
2.3.2. Кристаллизаторы с псевдоожиженным слоем .....	240
2.3.3. Аппараты с кристаллизацией в объеме.....	242
<i>Литература</i> .....	245

<b>Глава третья. Определение параметров моделей кристаллизации....</b>	<b>249</b>
§ 3.1. Внешняя задача.....	249
3.1.1. Обтекание твердой частицы.....	249
3.1.2. Массообмен частицы с потоком .....	253
§ 3.2. Внутренняя задача.....	264
3.2.1. Рост кристаллов .....	264
3.2.2. Образование зародыщей .....	279
§ 3.3. Сопряженная задача .....	289
§ 3.4. Экспериментальные методы определения параметров моделей .....	291
<i>Литература</i> .....	327
<b>Глава четвертая. Оптимизация процессов кристаллизации .....</b>	<b>331</b>
§ 4.1. Устойчивость процессов кристаллизации .....	331
§ 4.2. Кристаллизаторы непрерывного действия с перемешиванием.....	342
§ 4.3. Кристаллизаторы периодического действия с перемешиванием .....	356
§ 4.4. Кристаллизаторы с отбором монодисперсных фракций .....	361
<i>Литература</i> .....	368