

УНИВЕРСИТЕТЫ РОССИИ

В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов

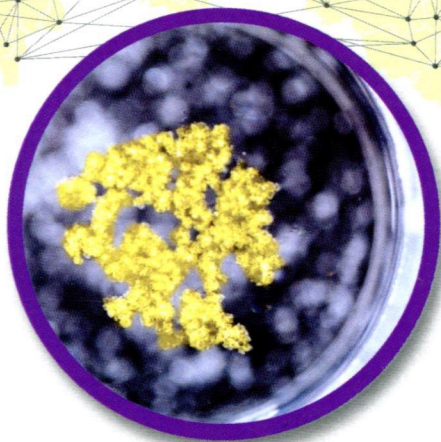
# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ

## ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И СМЕШЕНИЕ

Ответственный редактор – *Н. М. Жаворонков*

МОНОГРАФИЯ

2-е издание



СООТВЕТСТВУЕТ  
ПРОГРАММАМ  
ВЕДУЩИХ НАУЧНО-  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ  
ШКОЛ

 **Юрайт**  
издательство

[biblio-online.ru](http://biblio-online.ru)

**В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов**

**СИСТЕМНЫЙ  
АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ  
ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ:  
ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ И СМЕШЕНИЕ**

**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;

**Арутюнов Сергей Юрьевич** — доктор технических наук.

**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.

**Рецензенты:**

**Сажин Б. С.** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Процессы и аппараты и БЖД» Московского государственного текстильного университета, академик ряда Российских и Международных академий (РИА, МИА, МАНЭБ и др.), заслуженный деятель науки и техники РФ, лауреат премий правительств СССР и РФ, лауреат премии Международной инженерной академии;

**Блиничев В. Н.** — доктор технических наук, профессор.

**Кафаров, В. В.**

К30

Системный анализ процессов химической технологии: измельчение и смешение : монография / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов ; отв. ред. Н. М. Жаворонков — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2018. — 440 с. — (Серия : Университеты России).

ISBN 978-5-534-07043-9

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 рассматривается системный подход к анализу и количественному описанию процессов измельчения и смешения сыпучих материалов. Авторами проведен их качественный анализ, построены математические модели и рассмотрены вопросы оптимизации процессов измельчения и смешения. Также описаны особенности управления и синтеза систем управления процессами измельчения и смешения в устройствах различных типов.

*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)

© Коллектив авторов, 1985

© Коллектив авторов, 2018, с изменениями

© ООО «Издательство Юрайт», 2018

ISBN 978-5-534-07043-9

## Оглавление

|   |            |
|---|------------|
| Предисловие .....   | 3          |
| <b>Глава первая. Процесс измельчения — смешения как сложная физико-механическая система .....</b>   | <b>9</b>   |
| § 1.1. Качественный анализ структуры процесса измельчения — смешения как физико-механической системы .....  | 9          |
| 1.1.1. Структура физико-механических аффектов.....  | 9          |
| 1.1.2. Система гидромеханических уравнений полидисперсной многофазной смеси с учетом дробления (измельчения) и смешения частиц дисперсных фаз .....           | 23         |
| 1.1.3. Структура движущих сил дробления (измельчения).....  | 54         |
| 1.1.4. Механизм разрушения частиц дисперсных фаз многофазной смеси.....   | 57         |
| § 1.2. Математическое описание процессов измельчения и смешения на основе случайных марковских процессов.....   | 77         |
| 1.2.1. Математическое описание процесса смешения бинарных композиций, содержащих твердую фазу .....   | 78         |
| 1.2.2. Математическое описание процесса смешения в непрерывнодействующих смесителях .....   | 85         |
| 1.2.3. Математическое описание процесса смешения при сопутствующем измельчении.....   | 95         |
| 1.2.4. Математическое описание процесса измельчения и агломерации .....   | 98         |
| <i>Литература</i> .....   | 101        |
| <b>Глава вторая. Построение математических моделей процессов измельчения и смешения .....</b>   | <b>106</b> |
| § 2.1. Ударно-центробежные устройства.....  | 110        |
| 2.1.1. Экспериментально-статистическое исследование процесса измельчения в ударно-центробежном устройстве периодического действия .....                       | 110        |
| 2.1.2. Экспериментально-статистическое исследование процесса измельчения в ударно-центробежном устройстве непрерывного действия .....                         | 116        |
| 2.1.3. Математические модели процесса измельчения сыпучих материалов на основе обобщенной системы гидромеханических уравнений и модельных представлений ..... | 122        |
| § 2.2. Ударно-отражательные устройства .....  | 133        |
| § 2.3. Молотковые измельчители .....  | 137        |
| § 2.4. Лопастные и инерционные смесители.....   | 140        |
| § 2.5. Спирально-винтовые смесители непрерывного действия.....  | 150        |

|   |     |
|---|-----|
| § 2.6. Вибрационные смесители и измельчители .....  | 154 |
| § 2.7. Центробежные и пневматические смесители.....   | 166 |
| § 2.8. Струйные дезитпсграторы .....  | 169 |
| 2.8.1. Осадительная зона.....   | 171 |
| 2.8.2. Измельчительная зона .....   | 172 |
| 2.8.3. Классифицирующая зона.....   | 180 |
| § 2.9. Барабанные мельницы.....   | 184 |
| 2.9.1. Уравнение изменения гранулометрического распределения<br>при измельчении.....  | 189 |
| 2.9.2. Определение выражений для массы измельчаемых частиц,<br>плотности пульпы и среднего времени пребывания их в аппарате ..... | 195 |
| 2.9.3. Построение функционального оператора процесса<br>идеальной классификации .....   | 197 |
| 2.9.4. Построение математической модели непрерывного процесса<br>измельчения с рециклом .....                                     | 198 |
| <i>Литература</i> .....   | 201 |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Глава третья. Идентификация параметров и проверка<br/>адекватности математических моделей процессов измельчения<br/>и смешения .....</b> | <b>206</b> |
| § 3.1. Приборы и системы для определения гранулометрического<br>состава сыпучих материалов .....  | 207        |
| § 3.2. Экспериментальные методы оценки качества смеси сыпучих<br>материалов .....   | 224        |
| 3.2.1. Анализ распределения компонентов в смеси.....  | 224        |
| 3.2.2. Методика анализа качества смеси .....  | 234        |
| § 3.3. Ударно-центробежные устройства.....  | 245        |
| 3.3.1. Характер распределения времени пребывания<br>измельчаемых частиц в ударно-центробежном устройстве.....                               | 246        |
| 3.3.2. Определение параметров вероятности разрушения<br>и распределительной функции .....   | 251        |
| 3.3.3. Проверка адекватности математической модели процесса<br>измельчения.....   | 262        |
| § 3.4. Молотковые измельчители.....   | 268        |
| § 3.5. Лопастные и инерционные смесители .....  | 273        |
| 3.5.1. Математическая модель процесса смешения бинарной<br>композиции.....  | 273        |
| 3.5.2. Математическая модель процесса смешения<br>многокомпонентных композиций.....   | 294        |
| 3.5.3. Математическая модель каскада смесителей.....  | 300        |
| § 3.6. Спирально-винтовые смесители.....  | 303        |
| 3.6.1. Спирально-винтовые смесители периодического действия .....   | 303        |
| 3.6.2. Спирально-винтовые смесители непрерывного действия .....   | 306        |

|   |     |
|---|-----|
| § 2.6. Вибрационные смесители и измельчители .....  | 154 |
| § 2.7. Центробежные и пневматические смесители.....   | 166 |
| § 2.8. Струйные дезитсграторы .....   | 169 |
| 2.8.1. Осадительная зона.....   | 171 |
| 2.8.2. Измельчительная зона .....   | 172 |
| 2.8.3. Классифицирующая зона.....   | 180 |
| § 2.9. Барабанные мельницы.....   | 184 |
| 2.9.1. Уравнение изменения гранулометрического распределения<br>при измельчении.....  | 189 |
| 2.9.2. Определение выражений для массы измельчаемых частиц,<br>плотности пульпы и среднего времени пребывания их в аппарате ..... | 195 |
| 2.9.3. Построение функционального оператора процесса<br>идеальной классификации .....   | 197 |
| 2.9.4. Построение математической модели непрерывного процесса<br>измельчения с рециклом .....                                     | 198 |
| <i>Литература</i> .....   | 201 |

**Глава третья. Идентификация параметров и проверка  
адекватности математических моделей процессов измельчения  
и смешения ..... 206**

|   |     |
|---|-----|
| § 3.1. Приборы и системы для определения гранулометрического<br>состава сыпучих материалов .....              | 207 |
| § 3.2. Экспериментальные методы оценки качества смеси сыпучих<br>материалов .....                             | 224 |
| 3.2.1. Анализ распределения компонентов в смеси.....  | 224 |
| 3.2.2. Методика анализа качества смеси .....  | 234 |
| § 3.3. Ударно-центробежные устройства.....  | 245 |
| 3.3.1. Характер распределения времени пребывания<br>измельчаемых частиц в ударно-центробежном устройстве..... | 246 |
| 3.3.2. Определение параметров вероятности разрушения<br>и распределительной функции .....                     | 251 |
| 3.3.3. Проверка адекватности математической модели процесса<br>измельчения.....                               | 262 |
| § 3.4. Молотковые измельчители.....   | 268 |
| § 3.5. Лопастные и инерционные смесители.....   | 273 |
| 3.5.1. Математическая модель процесса смешения бинарной<br>композиции.....                                    | 273 |
| 3.5.2. Математическая модель процесса смешения<br>многокомпонентных композиций.....                           | 294 |
| 3.5.3. Математическая модель каскада смесителей.....  | 300 |
| § 3.6. Спирально-винтовые смесители.....  | 303 |
| 3.6.1. Спирально-винтовые смесители периодического действия.....  | 303 |
| 3.6.2. Спирально-винтовые смесители непрерывного действия.....  | 306 |

|   |     |
|---|-----|
| § 3.7. Вибрационные смесители и измельчители.....   | 308 |
| § 3.8. Центробежные и пневматические смесители..... | 331 |
| § 3.9. Струйные дезинтеграторы .....                | 334 |
| § 3.10. Барабанные мельницы .....                   | 347 |
| <i>Литература</i> .....                             | 356 |

#### **Глава четвертая. Оптимизация процессов измельчения**

|   |            |
|---|------------|
| <b>и смешения .....</b>   | <b>361</b> |
| § 4.1. Ударно-центробежные устройства.....  | 361        |
| 4.1.1. Моделирование и оптимизация процесса измельчения<br>полимерного материала.....                                   | 361        |
| 4.1.2. Экспериментальная проверка результатов оптимизации<br>на опытно-промышленном ударно-центробежном устройстве..... | 366        |
| § 4.2. Вибрационные смесители.....  | 374        |
| <i>Литература</i> .....   | 377        |

#### **Глава пятая. Подходы к управлению процессами измельчения**

|   |            |
|---|------------|
| <b>и смешения .....</b>   | <b>379</b> |
| § 5.1. Автоматическое управление процессом измельчения<br>в устройствах ударно-центробежного типа.....  | 380        |
| § 5.2. Управление процессом измельчения в барабанных мельницах.....   | 387        |
| 5.2.1. Анализ управляемости технологической системы<br>измельчения с барабанной мельницей.....  | 387        |
| 5.2.2. Управление процессом измельчения с применением<br>пилотной мельницы.....   | 400        |
| 5.2.3. Управление эффективностью процесса измельчения<br>по энерготехнологическому показателю .....   | 409        |
| 5.2.4. Секционирование газоматериальных потоков в мельнице .....  | 412        |
| § 5.3. Синтез системы управления процессом измельчения<br>в молотковом измельчителе и системы управления процессом<br>смешения в пневмосмесителе..... | 415        |
| § 5.4. Алгоритм оптимального управления струйным дезинтегратором.....   | 421        |
| § 5.5. Оптимальное управление непрерывными процессами<br>измельчения с рециклом в барабанных мельницах.....   | 424        |
| <i>Литература</i> .....   | 434        |