

Б.Н. Федоренко

# ПРОМЫШЛЕННАЯ БИОИНЖЕНЕРИЯ

Технологическое оборудование  
биотехнологических  
производств

- ОСНОВЫ БИОТЕХНИКИ
- БИОМЕМБРАННАЯ ИНЖЕНЕРИЯ
- МЕМБРАННЫЕ БИОРЕАКТОРЫ
- ПЕРСПЕКТИВЫ НАНОБИОТЕХНОЛОГИИ
- ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
- КОНСТРУКТИВНОЕ УСТРОЙСТВО
- ПРИНЦИПЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ
- ИНЖЕНЕРНЫЕ РАСЧЕТЫ

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ПРОФЕССИЯ**

**Б.Н. Федоренко**

**ПРОМЫШЛЕННАЯ  
БИОИНЖЕНЕРИЯ:  
технологическое оборудование  
биотехнологических производств**

ИНЖЕНЕРНОЕ СОПРОВОЖДЕНИЕ  
БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

ИЗДАТЕЛЬСТВО  
**ПРОФЕССИЯ**

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2016

УДК 66.31  
ББК 36.81-5  
Ф 33

*Рецензенты:* заведующий кафедрой «Машины и аппараты пищевых производств» Воронежского государственного университета инженерных технологий, д-р техн. наук, профессор **С. Т. Антипов**; заведующий кафедрой «Пищевые машины» Московского государственного университета технологий и управления, д-р техн. наук, профессор **Ю. А. Калошин**.

**Ф33 Федоренко Б.Н.** Промышленная биоинженерия: технологическое оборудование биотехнологических производств / Б.Н. Федоренко. — СПб.: ИД Профессия, 2016. — 518 с.

ISBN 978-5-904757-96-0

В книге на современном уровне, с учетом теоретических, технологических и технических аспектов рассмотрены как основы биологических и мембранных процессов, так и оборудование, применяемое для инженерного обеспечения биотехнологических производств.

Изложены основы нового прогрессивного научно-технического направления, созданного на основе совмещения биологических и мембранных процессов и сочетания биологических и мембранных структур — биомембранной инженерии и рассмотрены перспективы ее применения в промышленной биотехнологии.

Книга предназначена для студентов, специализирующихся в области биотехнологических производств, она также будет полезна в качестве справочного пособия широкому кругу специалистов промышленных предприятий, научно-исследовательских и проектных организаций, конструкторских бюро биотехнологической и смежных с ней отраслей промышленности.

УДК 66.31  
ББК 36.81-5

Настоящее издание охраняется законом об авторском праве. Перепечатка или воспроизведение в любой другой форме, в том числе тиражирование на электронных носителях информации, отдельных фрагментов книги, включая рисунки, и всего издания в целом запрещены без разрешения обладателя авторских прав. Всякое коммерческое использование данного издания или любой из его частей возможно исключительно с письменного разрешения автора.

ISBN 978-5-904757-96-0

© Б.Н. Федоренко, 2016  
© Издательский дом «Профессия», 2016



# ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	10
Введение .....	14
<b>Часть I. Основы биотехники .....</b>	<b>17</b>
<b>Глава 1. Современные инженерные аспекты биотехнологических производств .....</b>	<b>18</b>
1.1. Основные понятия системологии .....	19
1.2. Системность биотехнологических производств .....	21
1.3. Стрoение технологической системы .....	22
1.4. Технологический поток как система процессов .....	24
1.4.1. Морфология и классификация технологических операций .....	24
1.4.2. Морфология и классификация технологических потоков .....	29
1.4.3. Функционирование технологического потока как один из факторов управления качеством выпускаемой продукции .....	33
1.4.4. Диалектика технологического потока .....	36
1.5. Техника — материальная основа технологического потока .....	39
1.5.1. Классификация технологического оборудования .....	39
1.5.2. Основные технико-экономические показатели функционирования технологического оборудования .....	45
1.5.3. Основные требования к биотехнике .....	47
1.5.4. Общие вопросы эксплуатации биотехники .....	48
1.5.5. Основные конструкционные материалы и покрытия, применяемые в биотехнике .....	49
1.5.6. Общие принципы инженерных расчетов биотехники .....	52
1.6. О современной терминологии в промышленной биоинженерии .....	54
Резюме .....	55
Контрольные вопросы для самопроверки .....	56
<b>Глава 2. Общая характеристика промышленной биотехнологии .....</b>	<b>58</b>
2.1. Систематизация биотехнологических производств .....	28
2.2. Микробиологические производства .....	61
2.2.1. Многотоннажные микробиологические производства .....	61
2.2.2. Малотоннажные производства тонкого микробиологического синтеза .....	62
2.3. Инженерная энзимология .....	63
2.3.1. Промышленное применение инженерной энзимологии .....	63
2.3.2. Перспективные направления инженерной энзимологии .....	65

2.4. Биотехнологические производства как специфические биотехнические системы. . . . .	65
2.4.1. Организация и строение биотехнических систем . . . . .	66
2.4.2. Моделирование и анализ биотехнических систем . . . . .	68
Резюме. . . . .	72
Контрольные вопросы для самопроверки. . . . .	72
<b>Глава 3. Биологические процессы и их инженерное сопровождение . . . . .</b>	<b>73</b>
3.1. Технологические аспекты биологических процессов. . . . .	74
3.1.1. Обмен веществ микробной клетки . . . . .	75
3.1.2. Основы кинетики культивирования микроорганизмов . . . . .	76
3.1.2.1. Общая и удельная скорости роста микроорганизмов . . . . .	77
3.1.2.2. Экспоненциальная закономерность роста микроорганизмов. . . . .	78
3.1.2.3. Основные факторы, влияющие на рост и развитие микроорганизмов. . . . .	80
3.1.2.4. Основное уравнение микрокинетики роста микроорганизмов. . . . .	86
Резюме. . . . .	87
Контрольные вопросы для самопроверки. . . . .	87
3.2. Инженерное обеспечение биологических процессов. . . . .	88
3.2.1. Ретроспективный очерк о возникновении и развитии производств на основе биологических процессов . . . . .	88
3.2.1.1. Развитие солодоращения как направленного биосинтеза ферментов. . . . .	90
3.2.1.2. Развитие ферментационных производств . . . . .	93
3.2.1.3. Получение чистых культур микроорганизмов . . . . .	95
3.2.2. Современная организация систем культивирования биологических объектов . . . . .	98
3.2.2.1. Требования к современным системам получения чистых культур микроорганизмов. . . . .	98
3.2.2.2. Классификация процессов культивирования биологических объектов . . . . .	101
3.2.3. Строение и функционирование современных систем культивирования биологических объектов . . . . .	104
3.2.3.1. Системы периодического культивирования . . . . .	104
3.2.3.2. Системы непрерывного культивирования . . . . .	120
3.2.3.3. Инженерные особенности непрерывного и периодического культивирования микроорганизмов. . . . .	135
3.2.4. Специальные инженерные задачи при культивировании биообъектов. . . . .	135
3.2.4.1. Перемешивание рабочих сред в системах культивирования . . . . .	136
3.2.4.2. Аэрация в системах культивирования . . . . .	254
3.2.4.3. Теплообмен в системах культивирования . . . . .	168
3.2.4.4. Пенообразование и пеногашение в биореакторах. . . . .	180
3.2.4.5. Обеспечение асептики в биореакторах. . . . .	185
Резюме. . . . .	193
Контрольные вопросы для самопроверки. . . . .	193

3.3. Оборудование биотехнических систем .....	194
3.3.1. Классификация биореакторов .....	194
3.3.2. Биотехника для глубинного культивирования микроорганизмов ....	197
3.3.2.1. Ферментеры — биореакторы для аэробного культивирования микроорганизмов.....	197
3.3.2.2. Бродильные аппараты — биореакторы для анаэробного культивирования микроорганизмов.....	205
3.3.3. Биотехника для твердофазного культивирования биологических объектов.....	222
3.3.3.1. Растильное оборудование для твердофазного культивирования микроорганизмов.....	222
3.3.3.2. Растильные аппараты для культивирования высших растений ..	228
3.4. Инженерные расчеты биореакторов.....	239
3.4.1. Инженерные расчеты биореакторов для глубинного культивирования микроорганизмов.....	239
3.4.1.1. Технологические расчеты биореакторов .....	239
3.4.1.2. Конструктивные расчеты биореакторов .....	242
3.4.1.3. Гидравлические расчеты биореакторов .....	244
3.4.1.4. Массообменные расчеты биореакторов .....	246
3.4.1.5. Энергетические расчеты биореакторов .....	249
3.4.1.6. Теплотехнические расчеты биореакторов.....	255
3.4.2. Инженерные расчеты биореакторов для твердофазного культивирования биологических объектов .....	260
3.4.2.1. Технологические расчеты растильных аппаратов .....	261
3.4.2.2. Конструктивные расчеты растильных аппаратов .....	263
3.4.2.3. Энергетические расчеты растильных аппаратов .....	265
3.4.2.4. Теплотехнические расчеты солодорастильных аппаратов ...	268
Резюме.....	270
Контрольные вопросы для самопроверки.....	271
<b>Глава 4. Биотехнологические среды как специфические объекты промышленной переработки .....</b>	<b>272</b>
4.1. Биотехнологические среды микробиологических производств .....	273
4.1.1. Микроорганизмы как основные специфические элементы биотехнологических сред микробиологических производств.....	274
4.1.1.1. Бактерии .....	276
4.1.1.2. Дрожжи.....	278
4.1.1.3. Плесени.....	279
4.1.1.4. Актиномицеты .....	230
4.1.2. Микробная клетка как биологическая система .....	281
4.1.3. Основные физико-химические и теплофизические свойства ферментационных сред, содержащих микроорганизмы .....	283
4.2. Биотехнологические среды в инженерной энзимологии.....	287
4.2.1. Ферменты как основные специфические элементы биотехнологических сред в инженерной энзимологии .....	288
4.2.1.1. Классификация ферментов .....	281
4.2.1.2. Свойства ферментов .....	289
4.3. Адаптация биотехнологических сред к реальным возможностям биотехники .....	290

4.3.1. Масштабная адаптация некоторых компонентов гетерогенных биотехнологических сред . . . . .	291
4.3.2. Структурная адаптация биологических объектов гомогенных биотехнологических сред . . . . .	292
4.3.3. Тепловая адаптация микроорганизмов . . . . .	295
4.4. Биотехнологические среды — особая группа технологических сред . . . . .	295
4.4.1. Специфические свойства биотехнологических сред требует специальных подходов к технологической переработке . . . . .	296
4.4.2. Биотехнологические среды как объекты мембранного разделения . . . . .	298
Резюме . . . . .	299
Контрольные вопросы для самопроверки . . . . .	300
<b>Часть II. Биомембранная инженерия . . . . .</b>	<b>301</b>
<b>Глава 5. Мембранные процессы и их инженерное сопровождение . . . . .</b>	<b>302</b>
5.1. Теоретические аспекты мембранных процессов . . . . .	303
5.1.1. Классификация основных мембранных процессов . . . . .	303
5.1.2. О механизмах трансмембранного массопереноса . . . . .	306
5.1.3. Кинетика трансмембранного массопереноса . . . . .	308
5.2. Инженерное обеспечение мембранных процессов . . . . .	310
5.2.1. Ретроспективный очерк об открытии и развитии мембранных процессов . . . . .	310
5.2.2. Организация мембранных процессов . . . . .	312
5.2.2.1. Движущая сила мембранных процессов . . . . .	312
5.2.2.2. Ориентация потока разделяемой смеси относительно поверхности мембраны . . . . .	316
5.2.2.3. Обеспечение гидродинамических условий у поверхности мембраны . . . . .	316
5.2.3. Строение системы мембранных процессов . . . . .	316
5.2.3.1. Структура системы мембранного процесса . . . . .	317
5.2.3.2. Полупроницаемые мембраны как основные функциональные элементы системы мембранных процессов . . . . .	317
5.2.4. Функционирование мембранных процессов . . . . .	324
5.2.4.1. Основные показатели функционирования мембранных процессов . . . . .	324
5.2.4.2. Концентрационная поляризация и уменьшение ее влияния . . . . .	325
5.2.4.3. Особенности и преимущества мембранных процессов . . . . .	327
5.2.4.4. Основные области применения мембранных процессов в промышленной биотехнологии . . . . .	328
5.3. Оборудование мембранных систем . . . . .	329
5.3.1. Организация мембранных систем . . . . .	329
5.3.1.1. Мембранные системы периодического действия . . . . .	330
5.3.1.2. Мембранные системы непрерывного действия . . . . .	333
5.3.1.3. Диафильтрация как один из способов организации мембранных систем . . . . .	334
5.3.2. Строение мембранных систем . . . . .	335
5.3.2.1. Мембранные аппараты как основные структурные и функциональные элементы мембранных систем . . . . .	336
5.3.2.2. Изменение структуры мембранных систем с целью улучшения показателей разделения . . . . .	347

5.3.3. Функционирование мембранных систем . . . . .	349
5.3.3.1. Предотвращение загрязнения полупроницаемых мембран . . . . .	349
5.3.3.2. Регенерация полупроницаемых мембран . . . . .	352
5.3.3.3. Снижение интенсивности механических и гидродинамических воздействий на биологические объекты. . . . .	355
5.4. Инженерные расчеты мембранного оборудования . . . . .	360
Резюме . . . . .	361
Контрольные вопросы для самопроверки . . . . .	362
<b>Глава 6. Биомембранные системы, функционирование которых основано на совмещении биологических и мембранных процессов . . . . .</b>	<b>363</b>
6.1. Мембранные реакторы — новое поколение биотехники . . . . .	363
6.1.1. Принцип функционирования мембранного биореактора . . . . .	364
6.1.2. Основные типы мембранных биореакторов . . . . .	364
6.2. Развитие биореакторов для биосинтетических процессов . . . . .	365
6.2.1. Биореакторы как результат адаптации биотехники к особенностям биологических процессов (предшественники мембранных биореакторов) . . . . .	365
6.2.2. Мембранные биореакторы для биосинтетических процессов . . . . .	367
6.2.2.1. Мембранные биореакторы для культивирования микроорганизмов . . . . .	367
6.2.2.2. Мембранные биореакторы для бесклеточного биосинтеза . . . . .	374
6.3. Развитие биореакторов для биокаталитических процессов . . . . .	376
6.3.1. Теоретические аспекты биокатализа . . . . .	376
6.3.1.1. Перспективы биоконверсии возобновляемого растительного сырья . . . . .	376
6.3.1.2. Кинетические основы биокатализа . . . . .	378
6.3.1.3. Основные технические проблемы промышленного биокатализа . . . . .	379
6.3.2. Биокаталитические реакторы как результат адаптации биотехники к особенностям биологических процессов (предшественники мембранных биокаталитических реакторов) . . . . .	380
6.3.2.1. Биокаталитические реакторы с применением свободных биокатализаторов . . . . .	381
6.3.2.2. Биокаталитические реакторы с применением биокатализаторов, адсорбирующихся на сырье . . . . .	382
6.3.2.3. Биокаталитические реакторы с применением иммобилизованных ферментов или клеток . . . . .	385
6.3.3. Мембранные биореакторы для биокаталитических процессов . . . . .	390
6.3.3.1. Мембранные биореакторы на основе иммобилизованных биокатализаторов . . . . .	390
6.3.3.2. Мембранные биореакторы на основе свободных биокатализаторов . . . . .	391
6.4. Развитие биомембранных систем ферментационного мониторинга . . . . .	396
6.4.1. Биомембранные контрольно-измерительные системы . . . . .	396
6.4.2. Биомембранные системы для асептического отбора проб из биореакторов . . . . .	397



Резюме. . . . .	398
Контрольные вопросы для самопроверки. . . . .	398
<b>Глава 7. Биомембранные системы, функционирование которых основано на сочетании биологических и мембранных структур . . . . .</b>	<b>400</b>
7.1. Основные направления развития биомембранных систем . . . . .	400
7.2. Развитие биомембранных систем за счет совершенствования их структуры. . . . .	401
7.2.1. Изменение структуры системы за счет введения в нее дополнительной подсистемы . . . . .	401
7.2.1.1. Введение дополнительной подсистемы в основной технологический поток. . . . .	401
7.2.1.2. Введение дополнительной подсистемы в побочную ветвь технологического потока . . . . .	403
7.2.2. Изменение структуры системы за счет замены одной подсистемы другой . . . . .	405
7.3. Развитие биомембранных систем за счет совершенствования их организации. . . . .	408
7.4. Развитие биомембранных систем за счет совершенствования системообразующих элементов . . . . .	410
7.4.1. Развитие мембранных систем за счет совершенствования применяемых мембран . . . . .	410
7.4.2. Развитие мембранных систем за счет совершенствования применяемой аппаратуры . . . . .	412
7.4.2.1. Создание специализированных мембранных систем для биологических объектов. . . . .	412
7.4.2.2. Конструктивное совершенствование мембранных модулей для биологических объектов. . . . .	413
7.4.2.3. Конструктивное совершенствование мембранных аппаратов для биологических объектов. . . . .	416
7.4.2.4. Совершенствование аппаратурного оформления системы очистки и концентрирования биологически активных веществ . . . . .	418
7.5. Развитие биомембранных систем за счет совершенствования управления. . . . .	420
Резюме. . . . .	422
Контрольные вопросы для самопроверки. . . . .	422
<b>Глава 8. Подготовка биотехнологических сред перед мембранным выделением продуктов биосинтеза . . . . .</b>	<b>423</b>
8.1. Отстаивание биотехнологических сред . . . . .	423
8.2. Центробежное разделение биотехнологических сред . . . . .	424
8.2.1. Технологические аспекты центробежного разделения жидких неоднородных сред . . . . .	424
8.2.1.1. Процессы и явления, протекающие при центробежном разделии жидких неоднородных сред. . . . .	425
8.2.1.2. Основные факторы, влияющие на центробежное разделение жидких неоднородных сред. . . . .	425
8.2.2. Инженерное обеспечение центробежного разделения биотехнологических сред. . . . .	426

---

8.2.2.1. Ретроспективный взгляд на центробежное осветление биотехнологических сред . . . . .	426
8.2.2.2. Оборудование систем для центробежного разделения жидких неоднородных сред . . . . .	428
8.2.3. Инженерные расчеты сепараторов . . . . .	445
8.3. Фильтрование биотехнологических сред . . . . .	447
8.3.1. Технологические аспекты фильтрования биологических суспензий . . . . .	448
8.3.1.1. Процессы и явления, осуществляемые при фильтровании биотехнологических сред . . . . .	448
8.3.1.2. Основные факторы, влияющие на фильтрование биологических суспензий . . . . .	451
8.3.2. Инженерное обеспечение фильтрования биологических суспензий . . . . .	452
8.3.2.1. Ретроспективный взгляд на фильтрование биологических суспензий . . . . .	452
8.3.2.2. Организация фильтрования биологических суспензий . . . . .	452
8.3.2.3. Строение систем фильтрования биологических суспензий . . . . .	454
8.3.2.4. Инженерные задачи при фильтровании биологических суспензий . . . . .	454
8.3.3. Оборудование систем фильтрования биологических суспензий . . . . .	456
8.3.3.1. Основные требования, предъявляемые к системам фильтрования биологических суспензий . . . . .	456
8.3.3.2. Классификация фильтров для биологических суспензий . . . . .	457
8.3.3.3. Фильтры для биотехнологических сред . . . . .	459
8.3.4. Инженерные расчеты фильтров . . . . .	489
8.4. Основные технические проблемы и перспективы развития предварительной подготовки биологических жидкостей к мембранным процессам разделения . . . . .	490
Резюме . . . . .	490
Контрольные вопросы для самопроверки . . . . .	492
<b>Приложения . . . . .</b>	<b>493</b>
<b>Список литературы . . . . .</b>	<b>496</b>
<b>Краткий толковый словарь специальных терминов . . . . .</b>	<b>498</b>