Лекция 9.
Комбинированные технологии биообработки растительного сырья

Кафедра биотехнологии, КазНУ имени аль-Фараби
проф. д.б.н. Кенжебаева С.С.

Цель и результаты обучения

Цель. **Сформировать у магистрантов системное представление о научных основах, принципах и современных подходах к комбинированной биообработке растительного сырья, основанной на интеграции физических, химических, ферментативных и микробиологических методов, направленных на повышение эффективности биоконверсии растительных биополимеров, улучшение пищевой ценности и функционально-технологических свойств получаемой продукции, комплексное использование биологических ресурсов и развитие экологически безопасных, ресурсосберегающих технологий.**

Результаты обучения:

- **объяснять принципы комбинированных и интегрированных технологий биообработки растительных материалов;**
- **различать последовательные, параллельные и каскадные технологические схемы переработки растительного сырья;**
- **характеризовать основные комбинации физических, химических, ферментативных и микробиологических методов обработки;**
- **анализировать преимущества интеграции нескольких биотехнологических процессов в единой технологической цепочке;**
- **выбирать оптимальные комбинации методов переработки в зависимости от состава растительного сырья;**
- **объяснять роль предварительной обработки в повышении эффективности последующих биотехнологических процессов;**
- **оценивать влияние комбинированных технологий на выход целевых продуктов и снижение ресурсных затрат;**
- **разрабатывать технологические схемы комплексной переработки зернового, овощного и плодового растительного сырья;**

Содержание лекции

- Актуальность комбинированных технологий биообработки растительного сырья
- Понятие комбинированной биообработки.
- Интегрированные технологические процессы.
- Синергия физических, химических и биологических методов.
- Современные платформы SHF, SSF, SSCF и CBP.
- Интегрированная переработка зернового сырья.
- Комплексная переработка плодоовощного сырья.
- Комбинированная ферментативная обработка.
- Биореакторы интегрированных технологий.
- Мембранные технологии.
- Контрольные вопросы
- Литература

Актуальность комбинированных технологий биообработки растительного сырья

Комбинированные технологии биообработки основаны на последовательном или совместном применении физических, химических, ферментативных и микробиологических методов для повышения эффективности переработки растительного сырья.

1. Сложность структуры растительного сырья

Целлюлоза, гемицеллюлозы и лигнин формируют устойчивые структурные комплексы.

Сочетание предварительной обработки и биокатализа повышает доступность растительных биополимеров.

2. Повышение эффективности биоконверсии

Комбинирование физических, ферментативных и микробных процессов способствует более полному преобразованию компонентов сырья.

Оптимизация последовательности обработки позволяет повышать выход целевых продуктов.

3. Улучшение пищевой ценности и качества продукции

Ферментация и ферментативный гидролиз могут снижать содержание отдельных антипитательных соединений.

Повышается потенциальная биодоступность питательных веществ и изменяются функционально-технологические свойства продуктов.

4. Рациональное использование растительных ресурсов

Комплексная переработка зерна, отрубей, соломы, жома и других побочных продуктов АПК.

Получение функциональных ингредиентов, ферментов, органических кислот и биотоплива.

5. Экологическая и экономическая устойчивость

Сокращение образования отходов и повышение эффективности использования сырья.

Развитие ресурсосберегающих технологий и циркулярной биоэкономики.

Основной вывод: Комбинированные технологии биообработки обеспечивают более эффективное использование растительного сырья за счёт взаимодополняющего действия различных методов, создавая условия для получения качественной продукции с высокой добавленной стоимостью.

Понятие комбинированных технологий

- современные тенденции развития технологий биообработки;
- необходимость интеграции технологических процессов;
- преимущества комплексной переработки растительного сырья.

Комбинированные технологии биообработки — это технологии, в которых два или несколько методов воздействия на растительное сырьё применяются последовательно или одновременно для повышения эффективности переработки, улучшения качества продукта и более полного использования компонентов биомассы.

Комбинированные технологий биообработки растительного сырья

Комбинированные технологии биообработки растительного сырья могут объединять:

- механическое измельчение;
- тепловую обработку;
- ультразвук;
- микроволновое воздействие;
- химическую обработку;
- ферментативный гидролиз;
- микробную ферментацию;
- мембранное разделение.

Классификация комбинированных процессов биообработки растительного сырья

Комбинированные процессы классифицируются по следующим признакам.

- По последовательности проведения. **Последовательные процессы** — методы применяются один за другим.
- *Пример:*
- **Измельчение → тепловая обработка → ферментативный гидролиз**
- Одновременные процессы — несколько воздействий протекают в одной системе или в одном аппарате.

Пример:

- **Ферментативный гидролиз + микробная ферментация**
- **Параллельные процессы** — отдельные фракции сырья перерабатываются одновременно по разным технологическим направлениям.

Пример:

Растительное сырьё

Экстракция фенольных веществ Гидролиз полисахаридов

Основные принципы :

Подготовка структуры сырья.

На первом этапе обычно проводят измельчение, увлажнение, нагревание, ультразвуковую или химическую обработку, чтобы разрушить клеточные стенки и повысить доступность субстрата.

Повышение доступности компонентов.

Предварительная обработка должна облегчать действие ферментов или микроорганизмов.

Совместимость этапов.

Температура, pH, остаточные реагенты и влажность после одного этапа не должны подавлять последующий процесс.

Минимизация потерь целевых веществ.

Сначала желательно выделять наиболее чувствительные и ценные соединения, например антиоксиданты, витамины и масла.

Каскадное использование сырья.

Остаток после одного процесса используется как сырьё для следующего.

Снижение расхода энергии и реагентов.

Каждый предыдущий этап должен уменьшать интенсивность последующей обработки.

Классификация комбинированных процессов по природе объединяемых методов

- физико-физические;
- физико-химические;
- физико-ферментативные;
- химико-ферментативные;
- ферментативно-микробиологические;
- биотехнологические и мембранные;
- многостадийные интегрированные процессы.

Принципы последовательного сочетания методов обработки

Основные принципы:

Подготовка структуры сырья.

На первом этапе обычно проводят измельчение, увлажнение, нагревание, ультразвуковую или химическую обработку, чтобы разрушить клеточные стенки и повысить доступность субстрата.

Повышение доступности компонентов.

Предварительная обработка должна облегчать действие ферментов или микроорганизмов.

Совместимость этапов.

Температура, pH, остаточные реагенты и влажность после одного этапа не должны подавлять последующий процесс.

Минимизация потерь целевых веществ.

Сначала желательно выделять наиболее чувствительные и ценные соединения, например антиоксиданты, витамины и масла.

Каскадное использование сырья.

Остаток после одного процесса используется как сырьё для следующего.

Снижение расхода энергии и реагентов.

Каждый предыдущий этап должен уменьшать интенсивность последующей обработки.

Пример рациональной последовательности

Измельчение

↓

Мягкая физическая обработка

↓

Ферментативный гидролиз

↓

Микробная ферментация

↓

Мембранное разделение

↓

Использование остаточной биомассы

Синергетический эффект комбинированных технологий

Синергетический эффект возникает тогда, когда совместное применение нескольких методов обеспечивает результат, превышающий сумму эффектов каждого метода по отдельности.

Например:

- ультразвук увеличивает проницаемость клеточных стенок, благодаря чему ферменты действуют быстрее;
- тепловая обработка вызывает желатинизацию крахмала и повышает его доступность для амилаз;
- ферментативный гидролиз образует растворимые сахара, которые затем используются микроорганизмами;
- мембранная фильтрация одновременно очищает продукт и позволяет повторно использовать ферменты или воду.

Возможные проявления синергии

- увеличение выхода продукта;
- сокращение продолжительности процесса;
- уменьшение дозы ферментов;
- снижение температуры обработки;
- повышение извлечения биоактивных веществ;
- улучшение переваримости сырья;
- снижение содержания антипитательных соединений;
- уменьшение объёма отходов.

Синергия является главным технологическим преимуществом комбинированной обработки: один этап усиливает эффективность следующего, - интегрированных технологии биообработки.

Интегрированные технологии биообработки — это комплексные производственные системы, в которых несколько технологических процессов объединены в единую управляемую цепочку, обеспечивающую глубокую переработку растительного сырья и получение нескольких видов продукции.
Если комбинированная технология обычно рассматривает сочетание отдельных методов, то интегрированная технология охватывает всю производственную систему — от подготовки сырья до выделения целевых продуктов и утилизации остатков.

Основные принципы

Интегрированные технологии строятся на следующих принципах:
•комплексное использование всех компонентов сырья;
•каскадное извлечение продуктов;
•объединение материальных и энергетических потоков;
•минимизация образования отходов;
•повторное использование воды, тепла и промежуточных продуктов;
•получение нескольких продуктов из одного вида сырья;
•автоматизированный контроль процесса;
•экологическая и экономическая сбалансированность.
Основная идея заключается в том, что побочный продукт одного этапа становится ресурсом для другого.

Объединение физических, химических, ферментативных и микробиологических процессов

Интегрированная технология может включать несколько взаимодополняющих стадий.

Физические процессы

- измельчение;
- сортировка;
- нагревание;
- охлаждение;
- ультразвук;
- микроволновая обработка;
- импульсные электрические поля.

Задача использования **физических процессов** — изменить структуру сырья и облегчить последующую переработку.

Химические процессы

- кислотный или щелочной гидролиз;
- экстракция;
- регулирование pH;
- удаление лигнина;
- нейтрализация ингибиторов.

Химические процессы применяются для разрушения сложных компонентов и выделения целевых фракций.

Объединение физических, химических, ферментативных и микробиологических процессов

Микробиологические процессы

- молочнокислая ферментация;
- спиртовое брожение;
- твёрдофазная ферментация;
- получение органических кислот;
- синтез ферментов;
- обогащение белком и витаминами.

Интегрированная схема объединения физических, химических, ферментативных и микробиологических процессов

Растительное сырьё

↓

Физическая подготовка

↓

Химическое или физико-химическое фракционирование

↓

Ферментативный гидролиз

↓

Микробная ферментация

↓

Разделение и очистка продуктов

↓

Переработка остаточной биомассы

Модульный принцип построения технологических линий

Модульный принцип означает, что технологическая линия состоит из отдельных функциональных блоков, или модулей, которые можно комбинировать в зависимости от вида сырья и требуемого продукта.
Основные модули:
подготовка сырья;
предварительная обработка;
экстракция;
ферментативный гидролиз;
ферментация;
биотрансформация;
мембранное разделение;
концентрирование и сушка;
переработка остатков;
очистка и повторное использование воды.

Преимущества модульного подхода

- гибкость технологической линии;
- возможность переработки разных видов сырья;
- простота модернизации;
- поэтапное масштабирование;
- снижение капитальных затрат;
- возможность замены отдельного процесса без полной перестройки производства.

Например, линия по переработке пшеничных отрубей может быть дополнена модулем экстракции фенольных соединений, модулем ферментативного гидролиза или модулем твёрдофазной ферментации.

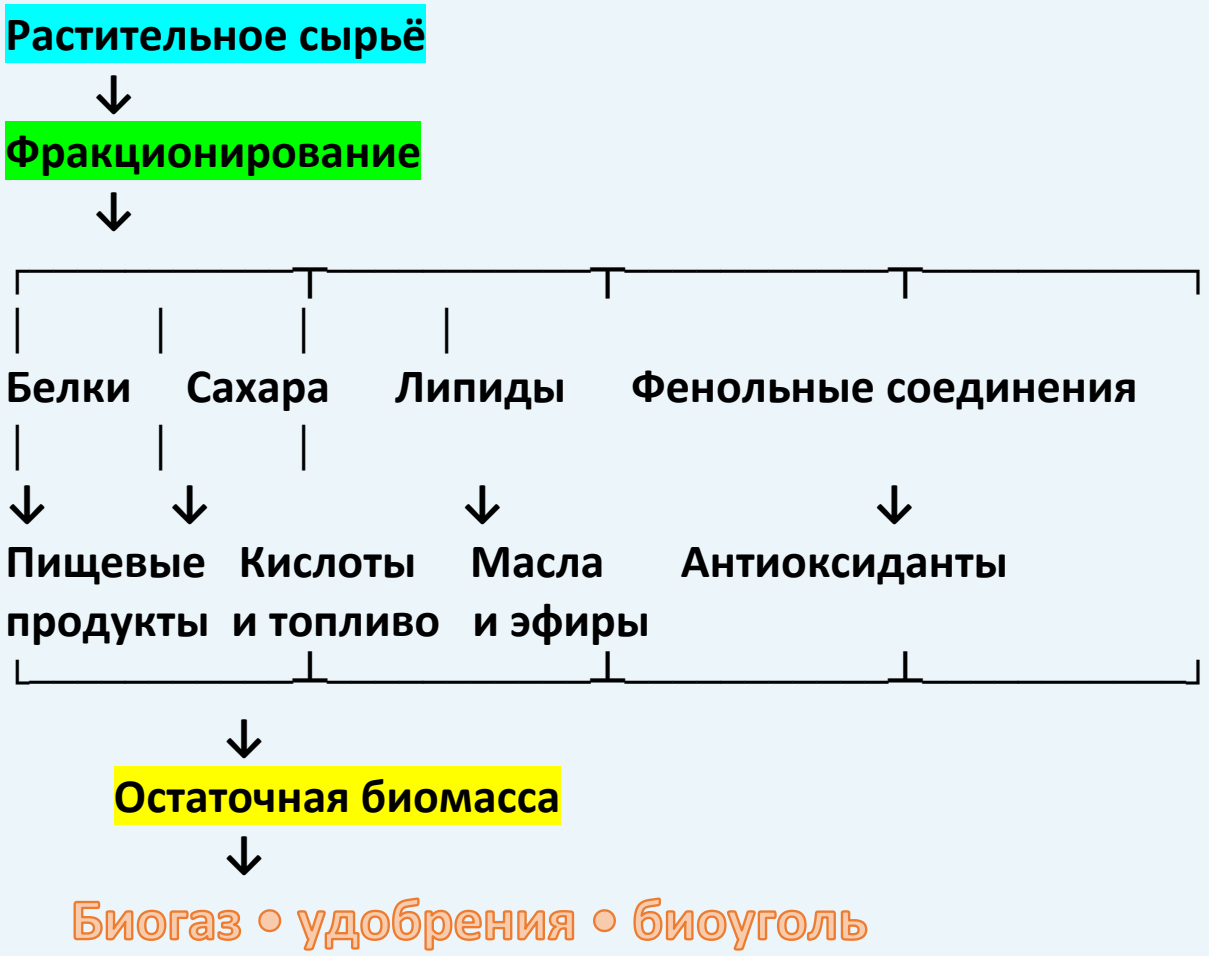
Интеграция с биорефинерией

Интегрированные технологии являются технологической основой биорефинерии.

- В биорефинерии растительное сырьё разделяется на основные компоненты, каждый из которых направляется на получение определённой продукции:
- **углеводы** — на сахара, органические кислоты и биоэтанол;
- **белки** — на концентраты, гидролизаты и кормовые добавки;
- **липиды** — на пищевые масла и биотопливо;
- **фенольные соединения** — на антиоксиданты;
- **целлюлоза** — на биополимеры и глюкозу;
- **лигнин** — на сорбенты, материалы и энергию;
- **остаточная биомасса — на биогаз, биоуголь или удобрения.**

Общая схема интеграции

а



Интеграция с биорефинерией позволяет перейти от производства одного продукта к многопродуктовой системе, в которой максимально используется весь потенциал растительного сырья.

Комбинированные технологии объединяют несколько методов обработки для достижения синергетического эффекта.

Интегрированные технологии связывают эти методы в единую производственную систему, обеспечивающую каскадную переработку сырья, многопродуктовость, ресурсосбережение и минимизацию отходов.

7. Современные платформы SHF, SSF, SSCF и CBP

Эти платформы различаются степенью объединения ферментативного гидролиза и микробной ферментации.

SHF — раздельный гидролиз и ферментация

Separate Hydrolysis and Fermentation предполагает проведение ферментативного расщепления полисахаридов и последующей ферментации сахаров в разных аппаратах.

Биомасса → ферментативный гидролиз → сахара → ферментация → продукт

Преимущества: возможность независимо оптимизировать температуру и pH каждой стадии, удобный контроль процессов.

Недостатки: большое количество оборудования, длительный цикл и риск ингибирования ферментов накопившимися сахарами.

SSF — одновременное осахаривание и ферментация

В системе **Simultaneous Saccharification and Fermentation** гидролиз полисахаридов и потребление образующихся сахаров микроорганизмами происходят в одном реакторе.

Биомасса + ферменты + микроорганизмы → целевой продукт

Потребление сахаров микроорганизмами снижает их накопление и уменьшает ингибирование ферментов.

Основное ограничение — необходимость согласования температурного оптимума ферментов и микроорганизмов.

7. Современные платформы SHF, SSF, SSCF и CBP

SSCF — одновременное осахаривание и совместная ферментация

Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation объединяет гидролиз и одновременную ферментацию нескольких сахаров, например глюкозы и ксилозы.

Платформа особенно перспективна для переработки лигноцеллюлозного сырья, содержащего как шестиуглеродные, так и пятиуглеродные сахара.

CBP — консолидированный биопроцессинг

При **Consolidated Bioprocessing** получение ферментов, гидролиз биомассы и ферментация сахаров осуществляются в одной системе с использованием одного микроорганизма или микробного консорциума.

Биомасса → продуцирование ферментов + гидролиз + ферментация → продукт

CBP позволяет уменьшить число технологических стадий и стоимость ферментов, однако требует создания высокоэффективных микроорганизмов или устойчивых микробных консорциумов.

7. Современные платформы SHF, SSF, SSCF и CBP

Платформа	Организация процесса	Основное преимущество	Основное ограничение
SHF. **Separate Hydrolysis and Fermentation**	Гидролиз и ферментация раздельно	Оптимизация каждой стадии	Больше аппаратов и времени
SSF. **SSF — одновременное осахаривание и ферментация**	Гидролиз и ферментация одновременно	Снижение ингибирования сахарами	Различные температурные оптимумы
SSCF. **SSCF — одновременное осахаривание и совместная ферментация**	Гидролиз и совместная ферментация сахаров	Использование глюкозы и ксилозы	Сложность подбора штаммов
CBP. **CBP — консолидированный биопроцессинг**	Ферменты, гидролиз и ферментация в одной системе	Минимальное число стадий	Высокие требования к биокатализатору

8. Интегрированная переработка зернового сырья

Зерно содержит крахмал, белки, липиды, пищевые волокна, минеральные вещества и биоактивные соединения.
Поэтому современная технология должна быть ориентирована не только на получение муки или крахмала, но и на комплексное использование всех зерновых фракций.
Основные стадии интегрированной переработки:

1. очистка, сортировка и измельчение зерна;
2. разделение эндосперма, оболочек и зародыша;
3. выделение крахмала и белковых фракций;
4. ферментативный гидролиз крахмала и некрахмальных полисахаридов;
5. микробная ферментация полученных сахаров;
6. извлечение фенольных соединений, масел и пищевых волокон;
7. переработка остаточной биомассы.

Пример переработки пшеницы

Пшеница

↓

Фракционирование

↓

Мука → пищевые продукты

Отруби → пищевые волокна, феруловая кислота, пребиотики

Зародыш → масло, токоферолы

Крахмал → глюкоза, кислоты, биоэтанол

Белок → концентраты, гидролизаты, пептиды

Остатки → корма, биогаз, биоуголь

Такой подход повышает пищевую и экономическую ценность зерна и сокращает образование отходов.

9. Комплексная переработка плодоовощного сырья

При переработке плодов и овощей образуются кожура, семена, выжимки, жом и некондиционное сырьё. Эти материалы богаты пектинами, пищевыми волокнами, сахарами, органическими кислотами, пигментами и фенольными соединениями.

Основные направления переработки:

- экстракция антиоксидантов, каротиноидов и полифенолов;
- получение пектина;
- ферментативное осветление соков;
- производство пищевых волокон;
- ферментация сахаров в органические кислоты или биоэтанол;
- получение кормовых добавок;
- анаэробное сбраживание остатков.

9. Комплексная переработка плодоовощного сырья

Сырьё	Получаемые продукты
Яблочные выжимки	Пектин, полифенолы, волокна, органические кислоты
Виноградные выжимки	Антоцианы, ресвератрол, масло семян
Цитрусовая кожура	Пектин, эфирные масла, флавоноиды
Томатные отходы	Ликопин, каротиноиды, пищевые волокна
Свекловичный жом	Пектин, сахара, корма, биогаз

При каскадной переработке сначала извлекают наиболее ценные термочувствительные соединения, затем проводят гидролиз и ферментацию оставшейся биомассы.

10. Комбинированная ферментативная обработка

Комбинированная ферментативная обработка основана на использовании комплекса ферментов, воздействующих на разные компоненты клеточной стенки и запасные вещества растений.

Основные ферменты:

- амилазы — расщепляют крахмал;
- целлюлазы — гидролизуют целлюлозу;
- ксиланазы — расщепляют гемицеллюлозу;
- пектиназы — разрушают пектин;
- протеазы — гидролизуют белки;
- фитазы — снижают содержание фитиновой кислоты;
- β-глюкозидазы — высвобождают связанные биоактивные соединения.

Применение ферментных комплексов обеспечивает:

- более глубокое разрушение клеточных стенок;
- повышение выхода сахаров и экстрактивных веществ;
- улучшение переваримости белков;
- снижение содержания антипитательных соединений;
- повышение биодоступности Fe и Zn;
- сокращение времени переработки.

Например, сочетание **ксиланазы, целлюлазы и фитазы** при обработке пшеничных отрубей одновременно улучшает высвобождение питательных веществ и снижает содержание фитатов.

11. Биореакторы интегрированных технологий

Биореактор обеспечивает контролируемые условия для ферментативного гидролиза, культивирования микроорганизмов или растительных клеток.

Контролируемые параметры:

- температура;
- pH;
- содержание кислорода;
- скорость перемешивания;
- аэрация;
- влажность;
- концентрация субстрата;
- образование целевого продукта.

Основные типы биореакторов:

- реакторы с механическим перемешиванием;
- колонные и барботажные реакторы;
- реакторы с псевдоожиженным слоем;
- packed-bed-реакторы;
- мембранные биореакторы;
- реакторы для твёрдофазной ферментации.

В интегрированных технологиях биореакторы могут объединять несколько функций: гидролиз, ферментацию, удержание биокатализатора и частичное отделение продукта.

12. Мембранные технологии

Мембранные процессы используют селективные барьеры для разделения, очистки и концентрирования компонентов растительного сырья.

Основные виды:

- микрофильтрация — удаление клеток и взвешенных частиц;
- ультрафильтрация — разделение белков, ферментов и полисахаридов;
- нанофильтрация — концентрирование сахаров и органических кислот;
- обратный осмос — удаление воды и концентрирование растворов;
- мембранная дистилляция — концентрирование термочувствительных веществ.

Преимущества:

- мягкие температурные условия;
- низкий расход химических реагентов;
- сохранение витаминов и биоактивных веществ;
- возможность возврата ферментов и воды в процесс;
- непрерывное удаление продукта из биореактора.

Основные ограничения — загрязнение мембран, снижение потока и необходимость периодической очистки.

Заключение

1. Комбинированные технологии биообработки основаны на интеграции физических, химических, ферментативных и микробиологических методов, обеспечивающих комплексное преобразование растительного сырья.

2. Предварительная обработка растительных материалов способствует разрушению структурных барьеров, повышению доступности целлюлозы, гемицеллюлоз и других биополимеров для последующего ферментативного гидролиза.

3. Сочетание ферментативных и микробиологических процессов позволяет повысить эффективность биоконверсии, расширить спектр целевых продуктов и оптимизировать использование растительных субстратов.

4. Комбинированная биообработка зернового сырья способствует снижению содержания отдельных антипитательных соединений, повышению потенциальной биодоступности питательных веществ и улучшению функционально-технологических свойств продукции.

5. Оптимизация технологических параметров — температуры, pH, продолжительности и последовательности обработки — является необходимым условием повышения эффективности, воспроизводимости и безопасности биотехнологических процессов.

6. Интеграция комбинированных технологий с принципами биорефинерии обеспечивает рациональное использование растительной биомассы, сокращение отходов и развитие экологически устойчивых производств.

Основной вывод: Комбинированные технологии биообработки растительного сырья открывают широкие возможности для повышения эффективности биоконверсии, получения продукции с высокой добавленной стоимостью и внедрения ресурсосберегающих биотехнологических процессов.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под комбинированными технологиями биообработки растительных материалов?
2. В чем заключается отличие комбинированных технологий от интегрированных?
3. Какие преимущества обеспечивает последовательное сочетание различных методов обработки растительного сырья?
4. Что представляет собой синергетический эффект комбинированных технологий?
5. Какие основные принципы лежат в основе интегрированных технологий биообработки?
6. Какие процессы могут объединяться в единой интегрированной технологической линии?
7. Что означает модульный принцип построения биотехнологических производств?
8. Какова роль биорефинерии в современной переработке растительного сырья?
9. Чем отличаются платформы SHF, SSF, SSCF и CBP?
10. В каких случаях наиболее эффективно применение каждой из этих технологических платформ?
11. Какие направления включает интегрированная переработка зернового сырья?
12. Какие ценные продукты могут быть получены при комплексной переработке пшеницы?
13. Какие компоненты содержатся в отходах переработки плодов и овощей?
14. Какие продукты получают при комплексной переработке плодоовощного сырья?
15. Какие ферменты наиболее широко используются при комбинированной ферментативной обработке?
16. Какие преимущества обеспечивает применение мультиферментных препаратов?
17. Какие типы биореакторов используются в интегрированных технологиях биообработки?
18. Какие параметры контролируются при работе биореакторов?
19. Какие мембранные технологии применяются в биотехнологической промышленности?
20. Каковы основные преимущества мембранного разделения при переработке растительного сырья?

Практические задания

Разработайте схему интегрированной переработки зерна пшеницы с получением не менее пяти видов продукции.
Предложите технологическую схему комплексной переработки яблочных выжимок.
Сравните технологические платформы SHF и SSF по преимуществам и недостаткам.
Подберите оптимальный ферментный комплекс для переработки пшеничных отрубей и объясните его выбор.
Предложите мембранную схему очистки ферментационного продукта.

Рекомендуемая литература

Pandey A., Höfer R., Taherzadeh M., Nampoothiri K., Larroche C. (Eds.). *Industrial Biorefineries and White Biotechnology*. Elsevier; 2024.

Yang S.-T., El-Enshasy H.A., Thongchul N. *Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production*. Wiley; 2023.

Koutinas A., et al. *Biorefinery: Integrated Sustainable Processes for Biomass Conversion to Biomaterials, Biofuels and Fertilizers*. Elsevier; 2023.

George E.F., Hall M.A., De Klerk G.-J. *Plant Propagation by Tissue Culture*. 4th ed. Springer; 2024.

Eibl R., Eibl D. (Eds.). *Plant Cell and Tissue Culture for the Production of Food Ingredients and Nutraceuticals*. Springer; 2023.

Mujtaba M., et al. Integrated biorefinery technologies for lignocellulosic biomass valorization. *Journal of Cleaner Production*. 2023.

Soccol C.R., et al. Current developments in solid-state fermentation technologies. *Biotechnology Advances*. 2024.

Cassano A., Drioli E. Membrane technologies in food and bioprocess engineering. *Current Opinion in Food Science*. 2024.

Galanakis C.M. (Ed.). *Sustainable Food Processing and Engineering Challenges*. Academic Press; 2023.

Trends in Biotechnology. Special Issue: *Integrated Bioprocessing and Circular Bioeconomy*. 2024.