Лекция 10.
Инновационные технологии и устойчивое развитие биообработки растительных материалов

Технологии биообработки растительных материалов
Магистратура

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

Цель и результаты обучения

Цель лекции

Сформировать у магистрантов системное представление о современных методах интенсификации биообработки растительного сырья, цифровизации и автоматизации биотехнологических процессов, а также об экономических и экологических принципах устойчивого производства в условиях циркулярной биоэкономики.

Результаты обучения

1. **Объяснять основные направления инновационного развития технологий биообработки растительных материалов.**
2. **Характеризовать современные физические и физико-химические методы интенсификации процессов, включая ультразвук, микроволновую обработку, импульсные электрические поля, холодную плазму и сверхкритическую экстракцию.**
3. **Анализировать влияние инновационных методов на разрушение клеточных структур, массоперенос, ферментативный гидролиз и извлечение биоактивных соединений.**
4. **Объяснять роль автоматизации, сенсорных систем и онлайн-мониторинга в управлении биотехнологическими процессами.**
5. **Характеризовать возможности искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников для оптимизации технологических режимов.**
6. **Оценивать экономическую эффективность интегрированных технологий биообработки с учётом выхода продукции, производительности, энергоёмкости и себестоимости.**
7. **Анализировать экологические преимущества ресурсосберегающих и малоотходных технологий.**
8. **Объяснять принципы циркулярной биоэкономики и каскадного использования растительной биомассы.**
9. **Сравнивать традиционные и инновационные технологии по технологическим, экономическим и экологическим показателям.**
10. **Выбирать методы интенсификации и цифрового управления в зависимости от вида сырья и целевого продукта.**
11. **Разрабатывать концептуальную схему устойчивой технологической линии биообработки растительного сырья.**
12. **Оценивать перспективы внедрения инновационных биотехнологий в пищевой, сельскохозяйственной и перерабатывающей промышленности Казахстана.**

Содержание лекции

1. Инновационные методы интенсификации процессов биообработки растительных материалов.
2. Кавитация
3. Искусственный интеллект и цифровизация биотехнологических производств.
4. Автоматизация и цифровые двойники.
5. Экономическая эффективность интегрированных технологий.
6. Экологические преимущества и принципы циркулярной биоэкономики.
7. Современные тенденции развития биотехнологии растений.
8. Перспективы исследований до 2035–2050 гг.

Инновационные методы интенсификации процессов биообработки растительных материалов

Интенсификация **процессов биообработки растительных материалов н**аправлена на увеличение скорости и выхода продукта при снижении расхода энергии, воды и реагентов.

- **Ультразвук**
- *Кавитация* повреждает клеточные стенки, улучшает перенос массы и ускоряет экстракцию и ферментативный гидролиз.
- **Микроволновая обработка**
- Обеспечивает быстрый объёмный нагрев, способствует разрушению растительной ткани и высвобождению внутриклеточных веществ.
- **Импульсные электрические поля**
- Повышают проницаемость клеточных мембран за счёт электропорации и облегчают извлечение соков, пигментов и фенольных соединений.
- **Холодная плазма**
- Используется для обеззараживания сырья, модификации поверхности и активации некоторых биохимических процессов.

1. Инновационные методы интенсификации процессов

Микроволновая обработка

- Сверхкритическая экстракция
- Сверхкритический CO_2 позволяет извлекать масла, пигменты и ароматические соединения без значительного остатка органических растворителей.

Нанотехнологии

- Наноносители и наноструктурированные материалы применяются для иммобилизации ферментов, повышения их стабильности и контролируемого высвобождения биоактивных веществ.

Цифровизация

- Сенсоры, искусственный интеллект и цифровые двойники позволяют прогнозировать ход процесса, оптимизировать параметры и предупреждать технологические отклонения.

Кавитация

Кавитация — это процесс образования, роста и последующего быстрого схлопывания (разрушения) микроскопических пузырьков газа или пара в жидкости под действием ультразвуковых волн или резких изменений давления.

Кавитация — физический процесс образования, роста и имплозивного схлопывания газовых или паровых микропузырьков в жидкости под действием ультразвуковых волн или локального снижения давления, сопровождающийся возникновением микроструй и ударных волн, которые интенсифицируют разрушение клеточных структур и массоперенос.

При схлопывании пузырьков возникают:

- локальное давление до сотен мегапаскалей;
- температура в несколько тысяч градусов (внутри пузырька, на очень короткое время);
- ударные волны;
- микроструи жидкости.

Именно эти явления и разрушают клетки растений.

Кавитация

Ультразвук

↓

Образование микропузырьков

↓

Рост пузырьков

↓

Схлопывание пузырьков

↓

Ударные волны и микроструи

↓

Разрушение клеточных стенок

↓

Ускорение массопереноса

↓

Повышение выхода биоактивных веществ

Применение.

В современной биотехнологии кавитацию используют при переработке:

- зерна;
- пшеничных отрубей;
- фруктов и ягод;
- овощей;
- лекарственных растений;
- водорослей;
- лигноцеллюлозной биомассы.

Преимущества

✓ быстрее разрушать растительные ткани;
✓ облегчать проникновение ферментов внутрь клеток;
✓ ускорять экстракцию веществ;
✓ уменьшать расход растворителей;
✓ сокращать продолжительность обработки;
✓ увеличивать выход полифенолов, антиоксидантов, пектинов, сахаров и белков.

2. Искусственный интеллект и цифровые двойники в биотехнологии

Искусственный интеллект (ИИ) применяется для анализа больших массивов технологических данных, прогнозирования результатов биообработки и выбора оптимальных параметров процесса.

Основные возможности ИИ:

- **прогноз выхода целевого продукта;**
- **оптимизация температуры, pH, аэрации и времени обработки;**
- **распознавание отклонений и раннее выявление неисправностей;**
- **контроль качества сырья и готовой продукции;**
- **снижение расхода энергии, воды и реагентов.**

Цифровой двойник — это виртуальная динамическая модель реального биореактора, технологической линии или производственного процесса. Она постоянно обновляется на основе данных датчиков и позволяет моделировать работу оборудования без остановки производства.

3. Автоматизация биотехнологических производств

Автоматизация — применение датчиков, контроллеров, программного обеспечения и исполнительных устройств для мониторинга и управления технологическими процессами.

Основные контролируемые параметры:

- температура;
- pH;
- концентрация растворённого кислорода;
- влажность;
- давление;
- расход среды и газов;
- скорость перемешивания;
- концентрация субстрата и продукта.

Преимущества:

снижение производственных рисков, прогнозирование отказов оборудования, ускорение масштабирования процессов и повышение стабильности продукции.

Цифровой двойник

Датчики

↓

Сбор и обработка данных

↓

Контроллер

↓

Принятие решения

↓

Исполнительные устройства

↓

Коррекция технологического режима

Автоматизация повышает точность управления, воспроизводимость процессов, безопасность производства и качество продукции. Современные предприятия используют системы **SCADA**, интернет вещей, роботизированные линии и онлайн-аналитические платформы..

Цифровой двойник биотехнологического процесса

Цифровой двойник (Digital Twin) — динамическая виртуальная модель реального биотехнологического процесса, которая обновляется на основе экспериментальных данных и показаний датчиков для мониторинга, прогнозирования и оптимизации производства.

1. Основные компоненты цифрового двойника

Физическая система — биореактор, ферментёр или установка ферментативной обработки растительного сырья.

- Система датчиков — регистрация температуры, pH, концентрации растворённого кислорода и других технологических параметров.
- Цифровая модель — математическое описание кинетики ферментативных реакций, роста микроорганизмов и образования продуктов.
- Аналитическая система — обработка данных, прогнозирование и оптимизация технологических режимов.

2. Применение в биообработке растительных материалов

- Прогнозирование эффективности ферментативного гидролиза крахмала и целлюлозы.
- Мониторинг роста микроорганизмов и накопления метаболитов при ферментации.
- Оптимизация температуры, pH, аэрации и продолжительности биопроцессов.
- Раннее выявление отклонений технологических параметров и снижение производственных потерь.

3. Преимущества технологии

- Повышение точности управления и воспроизводимости биопроцессов.
- Снижение расхода сырья, энергии и технологических ресурсов.
- Возможность виртуального тестирования режимов без проведения большого количества производственных экспериментов.

Схема работы цифрового двойника

Реальный биопроцесс

Биореактор, ферменты, микроорганизмы, субстрат

Цифровой двойник

Модель, анализ данных, прогнозирование

Обмен данными и управляющими рекомендациями

Оптимизация биотехнологического процесса

Выход продукта • Качество • Ресурсоэффективность

Основной вывод: Цифровые двойники объединяют математическое моделирование. данные датчиков и интеллектуальный анализ для прогнозирования и оптимизации процессов биообработки растительного сырья.

Цифровой двойник отличается от обычной компьютерной модели регулярным обновлением на основе данных реального процесса. Автоматическое управление при этом не является обязательным: система может использоваться только для мониторинга и выработки рекомендаций.

Экономическая эффективность интегрированных технологии

Экономическая эффективность показывает, насколько рационально технология преобразует затраченные ресурсы в продукцию и прибыль.

Основные показатели:

- выход целевого продукта;
- производительность;
- себестоимость;
- расход энергии и воды;
- стоимость сырья и ферментов;
- капитальные и эксплуатационные затраты;
- срок окупаемости;
- рентабельность производства.

Интегрированные технологии позволяют снизить себестоимость за счёт:

- комплексного использования растительного сырья;
- получения нескольких продуктов на одной линии;
- переработки побочных продуктов;
- повторного использования воды и энергии;
- сокращения количества отходов.

.

Экономическая эффективность

Растительное сырьё

↓

Основной продукт + функциональные ингредиенты

+ кормовые компоненты

+ биоматериалы

+ биоэнергия

↓

Повышение общей экономической эффективности

Наиболее эффективной считается многопродуктовая модель, при которой каждая фракция биомассы используется для получения продукта с максимально возможной добавленной стоимостью.

5. Экологические преимущества и принципы циркулярной биоэкономики

Циркулярная биоэкономика основана на многократном и каскадном использовании биологических ресурсов с минимальным образованием отходов.

Основные принципы:

- **комплексное использование растительной биомассы;**
- **повторное применение воды и технологических потоков;**
- **получение ценных веществ из побочных продуктов;**
- **использование возобновляемых источников сырья;**
- **сокращение выбросов парниковых газов;**
- **возврат органических остатков в сельское хозяйство.**

Экологическую эффективность оценивают с помощью анализа жизненного цикла (LCA), углеродного и водного следа, объёма отходов и степени использования возобновляемых ресурсов.

Растительное сырьё

↓

Пищевые продукты

↓

Извлечение биоактивных веществ

↓

Получение кормов и биоматериалов

↓

Производство биоэнергии

↓

Компост и биоудобрения

↓

Возврат питательных веществ в агроэкосистему

6. Перспективы развития биообработки растительных материалов

Основные перспективные направления:

Разработка высокоспецифичных ферментных комплексов.
Использование новых микробных продуцентов и синтетических консорциумов.
Применение ультразвука, кавитации, импульсных электрических полей и холодной плазмы.
Внедрение искусственного интеллекта и цифровых двойников.
Создание автоматизированных и роботизированных производств.
Развитие малоотходных биорефинерий.
Получение функциональных пищевых ингредиентов, биополимеров и биоактивных соединений.
Персонализация продуктов питания.
Масштабирование ресурсосберегающих технологий.
Переработка регионального растительного сырья и агропромышленных отходов.

Перспективы развития биообработки растительных материалов

1. Развитие высокоэффективных биокатализаторов
Инженерия ферментов для повышения активности, специфичности и стабильности.
Создание многокомпонентных ферментных комплексов и иммобилизованных биокаталитических систем.
2. Совершенствование микробных биотехнологий
Использование метаболической инженерии и синтетической биологии для создания специализированных микроорганизмов.
Разработка микробных консорциумов для комплексной биоконверсии растительных субстратов.
3. Цифровизация и интеллектуальное управление
Применение искусственного интеллекта, машинного обучения и цифровых двойников.
Автоматизация мониторинга и прогнозирование эффективности биотехнологических процессов.
4. Интегрированные технологии и биорефинерия
Сочетание предварительной обработки, ферментативного гидролиза и микробной ферментации.
Каскадное использование растительной биомассы для получения функциональных ингредиентов, биохимикатов и биотоплива.
5. Повышение пищевой ценности и безопасности
Разработка технологий биообогащения и повышения биодоступности питательных веществ.
Получение функциональных продуктов с заданными свойствами и совершенствование методов контроля безопасности.
6. Устойчивое биопроизводство и циркулярная биоэкономика
Минимизация отходов, снижение потребления воды и энергии.
Применение оценки жизненного цикла (LCA) и технико-экономического анализа для выбора устойчивых технологий.

Основной вывод: Перспективы биообработки растительных материалов связаны с интеграцией биокатализа, синтетической биологии, цифровых технологий и принципов циркулярной биоэкономики, обеспечивающих создание эффективных и экологически устойчивых биопроизводств

Итоговая схема инноационные мнтоды обработки растительного сырья

Инновационные методы обработки

+

Автоматизация и цифровой мониторинг

+

Искусственный интеллект

+

Интегрированное использование сырья

↓

Повышение выхода и качества продукции

↓

Снижение затрат и экологической нагрузки

↓

Устойчивое биотехнологическое производство

↓

Циркулярная биоэкономика

Технологическая и экономическая эффективность интегрированных биопроизводств

1. Повышение эффективности биотехнологических процессов

Интеграция ферментативных, микробиологических и физико-химических методов обеспечивает комплексную переработку растительного сырья.

Оптимизация технологических параметров способствует повышению выхода целевых продуктов и сокращению производственных потерь.

2. Цифровой мониторинг и управление

Автоматизированные системы обеспечивают контроль температуры, pH, аэрации и других параметров биопроцессов.

Математическое моделирование, искусственный интеллект и цифровые двойники позволяют прогнозировать результаты и оптимизировать технологические режимы.

3. Экономические преимущества интегрированных технологий

Комплексное использование компонентов растительного сырья повышает потенциальную добавленную стоимость продукции.

Совместное получение нескольких целевых продуктов способствует диверсификации производства.

Переработка побочных потоков позволяет снижать потери сырья и затраты на обращение с отходами.

4. Многопродуктовая биорефинерия

Последовательное извлечение ценных соединений, ферментативный гидролиз и микробная ферментация обеспечивают каскадное использование биомассы.

Из одного вида сырья возможно получение пищевых ингредиентов, органических кислот, ферментов и биоэнергетических продуктов.

Экономическая целесообразность определяется выходом продукции, стоимостью оборудования, энергозатратами и рыночным спросом.

Основной вывод: Интеграция биотехнологических процессов, цифрового управления и многопродуктовой биорефинерии создаёт условия для повышения технологической эффективности, рационального использования растительной биомассы и экономической устойчивости биопроизводств.

Таким образом, перспективное производство должно объединять:

Инновационная предварительная обработка

↓

Ферментативная и микробная биообработка

↓

Автоматизированный мониторинг

↓

Искусственный интеллект и цифровой двойник

↓

Комплексное получение продуктов

↓

Повторное использование ресурсов

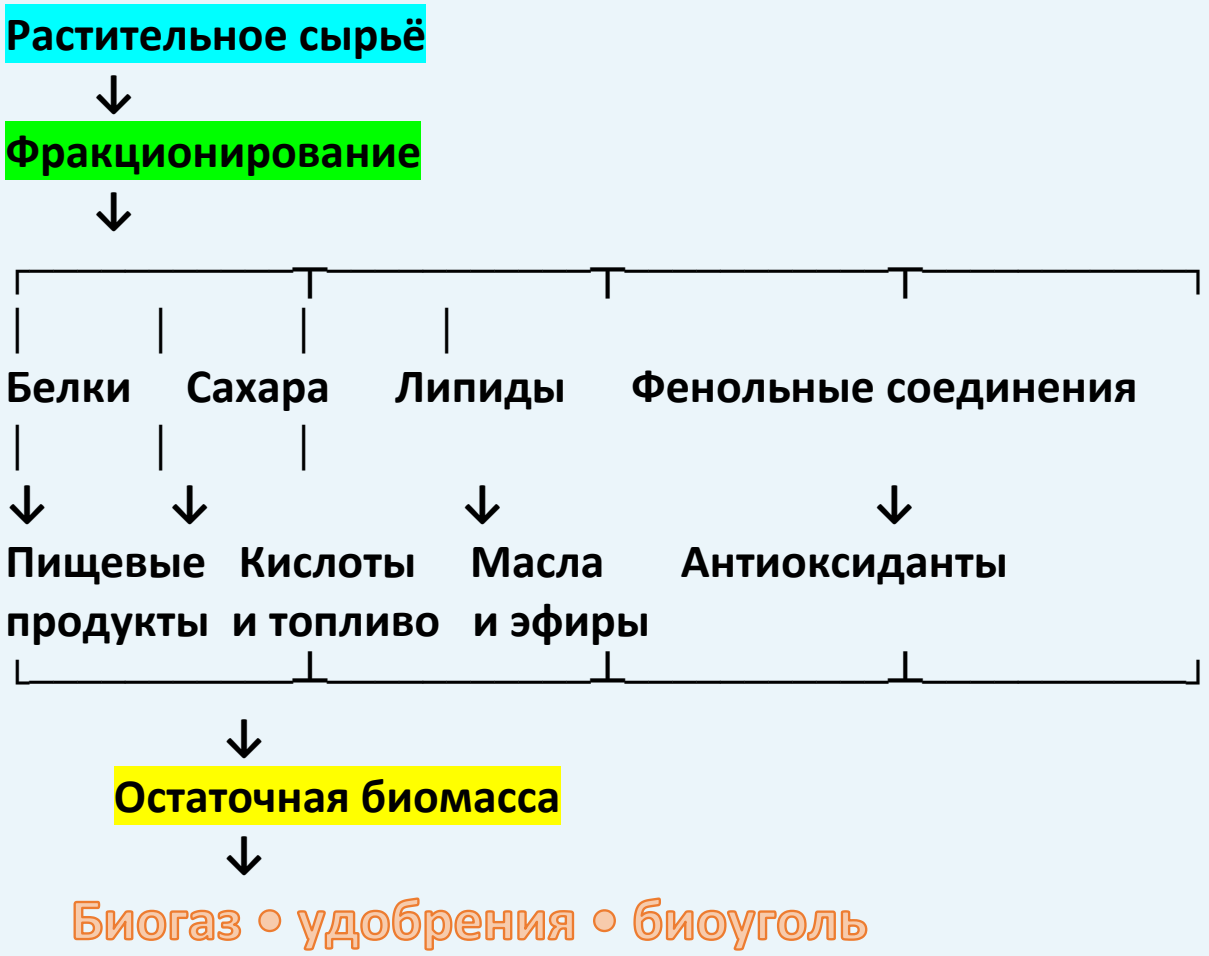
↓

Устойчивое малоотходное производство

Для Казахстана особенно актуальна организация комплексной биообработки зерна, отрубей, соломы, масличного сырья и плодоовощных отходов с получением пищевых ингредиентов, кормов, биоматериалов, биоэнергии и органических удобрений.

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.

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

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.

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.

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.

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.

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.

Заключение

1. Инновационные технологии биообработки объединяют современные ферментативные, микробиологические и комбинированные методы, обеспечивающие эффективное преобразование растительного сырья в ценные биопродукты.

2. Совершенствование биокаталитических систем на основе инженерии ферментов, иммобилизации и применения специализированных микроорганизмов расширяет возможности направленной биоконверсии растительных биополимеров.

3. Цифровизация биотехнологических процессов, включая автоматизированный мониторинг, искусственный интеллект и цифровые двойники, способствует прогнозированию, оптимизации и повышению воспроизводимости биообработки.

4. Интегрированные технологии и биорефинерия обеспечивают комплексное и каскадное использование растительной биомассы для получения функциональных ингредиентов, биохимикатов и биоэнергетических продуктов.

5. Экологическая и экономическая устойчивость биопроизводства достигается за счёт рационального использования сырья, снижения потребления воды и энергии, минимизации отходов и оценки жизненного цикла продукции.

6. Перспективы развития биообработки связаны с интеграцией биотехнологий, цифровых решений и принципов циркулярной биоэкономики для повышения качества продукции и устойчивости продовольственных систем.

Основной вывод: Инновационное развитие биообработки растительных материалов формирует научно-технологическую основу ресурсосберегающего биопроизводства, способствуя повышению эффективности переработки растительного сырья, созданию продукции с высокой добавленной стоимостью и достижению целей устойчивого развития.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под интенсификацией биотехнологических процессов?
2. Какие инновационные физические методы применяются для обработки растительного сырья?
3. Что такое кавитация и как она воздействует на растительные клетки?
4. Как ультразвуковая обработка влияет на массоперенос и экстракцию веществ?
5. В чём заключается принцип действия импульсного электрического поля?
6. Какие преимущества и ограничения имеют инновационные методы биообработки?
7. Для каких задач искусственный интеллект применяется в биотехнологическом производстве?
8. Что представляет собой цифровой двойник биотехнологического процесса?
9. Чем цифровой двойник отличается от обычной компьютерной модели?
10. Какие данные необходимы для функционирования цифрового двойника?
11. Какие параметры контролируются в автоматизированном биореакторе?
12. Какую роль выполняют датчики, контроллеры и исполнительные устройства?
13. Что такое онлайн-мониторинг биотехнологического процесса?
14. Как автоматизация влияет на воспроизводимость и качество продукции?
15. Какие показатели используют для оценки экономической эффективности технологии?
16. За счёт чего интегрированная переработка снижает себестоимость продукции?
17. Что представляет собой многопродуктовая биорефинерия?
18. Что означает каскадное использование растительной биомассы?
19. Каковы основные принципы циркулярной биоэкономики?
20. Какие показатели характеризуют экологическую эффективность производства?
21. Что такое анализ жизненного цикла продукции — LCA?
22. Как можно уменьшить водный и углеродный след биообработки?
23. Какие побочные продукты зернопереработки могут служить сырьём для биоконверсии?
24. Какие направления биообработки растительных материалов наиболее перспективны для Казахстана?
25. Как объединение ИИ, автоматизации и биорефинерии способствует устойчивому производству?

литература

Shariatifar M. et al. On digital twins in bioprocessing: Opportunities and challenges. *Process Biochemistry*. 2025. Обзор рассматривает цифровые двойники как инструменты мониторинга, управления, повышения стабильности и оптимизации биопроцессов. (ScienceDirect)

Shahab M.A., Destro F., Braatz R.D. Digital twins in biopharmaceutical manufacturing: Review and perspective on human–machine collaborative intelligence. 2025. Работа посвящена взаимодействию операторов, автоматизированных систем и цифровых двойников. (arXiv)

Abba A. et al. Advancing circular bioeconomy through systematic review of multi-product biorefinery approaches for water-hyacinth-based renewable energy. *iScience*. 2025;28:112807. DOI: 10.1016/j.isci.2025.112807. (ScienceDirect)

Bianchi M. et al. Monitoring and modelling the bioeconomy: A review of empirical practices across implementation scales. *Journal of Cleaner Production*. 2024. В статье рассматриваются показатели и методы оценки биоэкономики на уровне продукции, предприятий и регионов. (ScienceDirect)

Biofuel production for circular bioeconomy: Present scenario and future perspectives. *Science of the Total Environment*. 2024. Обзор посвящён устойчивой конверсии биомассы и использованию отходов в циркулярной экономике. (ScienceDirect)

Galanakis C.M., ed. *Sustainable Food Processing and Engineering Challenges*. Academic Press/Elsevier, 2023.

Pandey A. et al., eds. *Industrial Biorefineries and White Biotechnology*. Elsevier.

Yang S.-T. et al., eds. *Bioprocessing Technologies in Biorefinery for Sustainable Production of Fuels, Chemicals and Polymers*. Wiley.

Doran P.M. *Bioprocess Engineering Principles*. 2nd ed. Academic Press.

Shuler M.L., Kargi F., DeLisa M.P. *Bioprocess Engineering: Basic Concepts*. 3rd ed. Pearson.