



БАЛТИЙСКИЙ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ ИММАНУИЛА КАНТА

О. О. Бабич, С. А. Сухих, Л. С. Дышлюк

**ПЕРЕРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
ИСТОЧНИКОВ СЫРЬЯ
В ПИЩЕВОЙ И КОРМОВОЙ БЕЛОК**

Калининград
2026

БАЛТИЙСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. ИММАНУИЛА КАНТА

О. О. Бабич, С. А. Сухих, Л. С. Дышлюк

ПЕРЕРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ
ИСТОЧНИКОВ СЫРЬЯ
В ПИЩЕВОЙ И КОРМОВОЙ БЕЛОК

Учебное пособие

Издательство
Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
2026

УДК 664.38; 663.14

ББК 30.16; 36.93

Б12

Рецензент

Е. В. Ульрих, д-р техн. наук, доцент, профессор Калининградского государственного технического университета

Бабич, О. О.

- Б12 Переработка альтернативных источников сырья в пищевой и кормовой белок : учебное пособие / О. О. Бабич, С. А. Сухих, Л. С. Дышлюк. — Калининград : Издательство БФУ им. И. Канта, 2026. — 96 с.
ISBN 978-5-9971-1058-1

Рассматривается получение альтернативных белков в условиях глобального дефицита продовольствия. Изложены основы строения и классификации белков, роль аминокислот, дан обзор традиционных и новых (насекомые, микопротеин) источников. Детально рассмотрены технологические схемы производства микробного белка и переработки растительного сырья (бобовые, злаки, масличные) в концентраты, изоляты и текстураты. Приведены справочные данные по аминокислотному составу и функциональным свойствам белковых продуктов.

Предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлениям 19.03.01 «Биотехнология» (профиль «Общая биотехнология»), 19.04.01 «Биотехнология» (программа «Прикладная биотехнология»), а также для специалистов агропромышленного комплекса, занимающихся разработкой и внедрением ресурсосберегающих технологий кормопроизводства и производства белковых добавок.

УДК 664.38; 663.14

ББК 30.16; 36.93

ISBN 978-5-9971-1058-1

© Бабич О. О., Сухих С. А., Дышлюк Л. С., 2026

© Оформление, БФУ им. И. Канта, 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
Тема 1. Общие сведения о белке, строении и функциях	6
1.1. Определение понятия «белок», классификация аминокислот	6
1.2. Строение белка	13
1.3. Классификация белков	20
1.4. Функции белков в живом организме	25
1.5. Источники белка в пищевой и кормовой промышленности	29
Тема 2. Технология производства белка из микроорганизмов	34
2.1. Микроорганизмы для производства белка	34
2.2. Технологическая схема производства белка из микроорганизмов	41
2.3. Пищевая ценность белка микробного происхождения	52
2.4. Основные ограничения применения белков микробного происхождения	54
Тема 3. Технология производства белка из растительного сырья	56
3.1. Виды растительного сырья, используемого для производства белка	56
3.2. Технологическая схема производства белка из растительного сырья	66
3.3. Технология получения соевого белкового изолята / концентрата	73
3.4. Технология получения белкового изолята из подсолнечного шрота	76

Тема 4. Переработка насекомых для использования в пищевой и кормовой промышленности	80
4.1. Характеристика насекомых как потенциального пищевого сырья	80
4.2. Содержание белка в съедобных насекомых	82
4.3. Характеристика аминокислотного состава белка съедобных насекомых	84
4.4. Производство белка, белкового гидролизата и пептидов	87
4.5. Основные ограничения использования белков насекомых и продуктов на их основе.....	91
Список рекомендуемой литературы.....	94

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние мировой продовольственной системы характеризуется наличием ряда системных вызовов, ключевым среди которых является прогрессирующий дефицит полноценного пищевого и кормового белка. Рост численности населения Земли, прогнозируемый на уровне 9—10 млрд человек к 2050 году, изменение структуры потребления в сторону более белковой диеты, а также истощение традиционных ресурсов животного происхождения требуют безотлагательного поиска и внедрения альтернативных источников сырья. В этой связи критически важным становится развитие биотехнологических подходов, направленных на глубокую переработку вторичного растительного сырья, микробной биомассы и новых видов организмов в высококачественный белок.

Настоящее учебное пособие посвящено рассмотрению современных технологических решений в области получения белка из трех наиболее перспективных категорий альтернативного сырья: микроорганизмов, растительных ресурсов (включая отходы их переработки) и насекомых.

Пособие структурировано по тематическому принципу и включает четыре ключевых раздела. В первом разделе закладываются фундаментальные основы. Во втором разделе описаны технологии производства микробного белка. В третьем разделе детально рассмотрены технологии переработки растительного сырья. Четвертый раздел знакомит читателя с новейшим направлением — использованием насекомых в пищевой и кормовой промышленности.

Учебное пособие предназначено для студентов и магистрантов, обучающихся по направлениям 19.03.01 «Биотехнология» (профиль «Общая биотехнология»), 19.04.01 «Биотехнология» (программа «Прикладная биотехнология»). Издание содержит актуальные справочные данные, что позволяет использовать его как в работе в аудитории, так и для самостоятельного изучения материала.

Тема 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БЕЛКЕ, СТРОЕНИИ И ФУНКЦИЯХ

План темы 1

1.1. Определение понятия «белок», классификация аминокислот.

1.2. Строение белка.

1.3. Классификация белков.

1.4. Функции белков в живом организме.

1.5. Источники белка в пищевой и кормовой промышленности.

1.1. Определение понятия «белок», классификация аминокислот

Белки — органические азотсодержащие полимерные соединения, мономером которых являются альфа-аминокислотные остатки, соединенные между собой полипептидной связью (связь, образуемая между карбоксильной группой ($-\text{COOH}$) и аминогруппой ($-\text{NH}_2$)) (рис. 1.1). Белки являются линейными неразветвленными соединениями, характеризующимися сложной пространственно-структурной организацией.

В природных белках встречается 20 различных α -аминокислот, различающихся природой радикала R и постоянно встречающихся во всех белках. Читаются аминокислоты в белках с того конца, где находится свободная NH_2 -группа. Кроме того, существует еще постоянно пополняющаяся группа редких аминокислот, обнаруженных в крайне ограниченном круге белков, а иногда встречающихся только в белке одного вида. Всего к настоящему времени выделено около 300 аминокислот. Существует несколько специальных классификаций аминокислот,

основанных на структуре и химической природе, заменимости, путях метаболизма и т. д. В таблице 1.1 представлены аминокислоты по полярности радикалов.

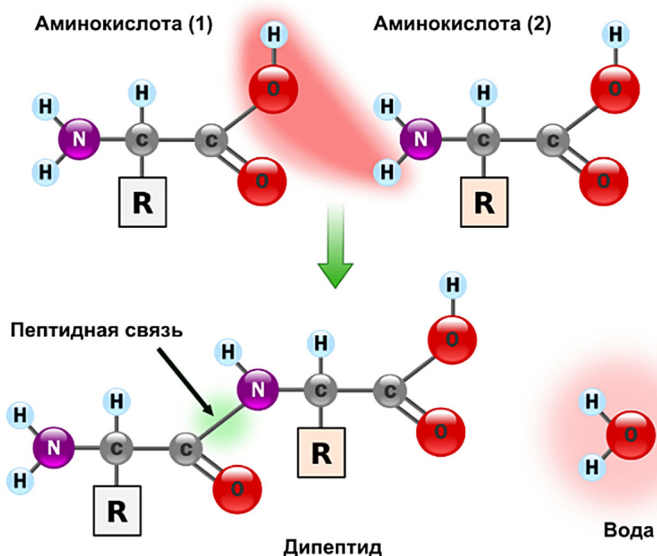


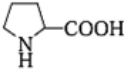
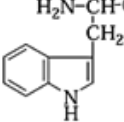
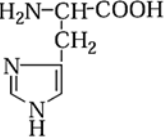
Рис. 1.1. Образование пептидной связи [8]

Таблица 1.1

Классификация аминокислот

1. Неполярные аминокислоты			
$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{COOH}$	$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{CH}-\text{CH}_3}{\text{CH}}-\text{COOH}$ CH_3	$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{CH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$ CH_2 $\text{CH}-\text{CH}_3$ CH_3	$\text{H}_2\text{N}-\underset{\text{CH}_2}{\text{CH}}-\text{COOH}$ CH_2 S CH_3
Аланин (Ала)	Валин (Вал)	Лейцин (Лей)	Метионин (Мет)

Окончание табл. 1.1

1. Неполарные аминокислоты			
	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}-\text{CH}_3 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$		$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_5 \end{array}$
Пролин (Про)	Изолейцин (Иле)	Триптофан (Три)	Фенилаланин (Фен)
2. Полярные, гидрофильные, незаряженные аминокислоты			
$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{H} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}-\text{OH} \\ \\ \text{CH}_3 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{SH} \end{array}$
Глицин (Гли)	Серин (Сер)	Треонин (Тре)	Цистеин (Цис)
$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{C}_6\text{H}_4 \\ \\ \text{OH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CONH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CONH}_2 \end{array}$	
Тирозин (Тир)	Аспарагин (Асп)	Глутамин (Глн)	
3. Кислые аминокислоты			
$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COOH} \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{COOH} \end{array}$		
Аспарагиновая кислота (Асп)	Глутаминовая кислота (Глн)		
4. Основные аминокислоты			
$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$	$\begin{array}{c} \text{H}_2\text{N}-\text{CH}-\text{COOH} \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{CH}_2 \\ \\ \text{NH} \\ \\ \text{C}=\text{NH} \\ \\ \text{NH}_2 \end{array}$		
Лизин (Лиз)	Аргинин (Арг)	Гистидин (Гис)	

Неполярные аминокислоты характеризуются тем, что они имеют незаряженный радикал. Такие аминокислоты гидрофобны, в связи с чем они обеспечивают гидрофобное взаимодействие. Полярные аминокислоты содержат в своем составе такие функциональные группы (сульфгидрильную, гидроксильную, амидогруппу), которые обуславливают их способность образовывать водородные связи и проявлять гидрофильные свойства.

Особенностью кислых аминокислот является то, что они при нейтральной среде (рН 7,0) имеют отрицательный заряд, а основные аминокислоты при значении рН 7,0 имеют положительный заряд. Радикалы кислых и основных аминокислот участвуют в образовании ионных связей.

Аминокислоты классифицируются по способности живого организма синтезировать аминокислоты (табл. 1.2). Аминокислоты, которые не могут синтезироваться живым организмом, называются незаменимыми. Как правило, они должны поступать в живой организм с пищей в достаточном количестве. Те аминокислоты, которые синтезируются живым организмом в достаточном количестве, называются заменимыми аминокислотами. Для их синтеза живой организм использует незаменимые аминокислоты и другие соединения. Живой организм может обходиться без них долгое время, если, конечно, с пищей поступают вещества, из которых эти аминокислоты могут быть синтезированы. Также выделяют третью группу аминокислот, которые образуются в организме, но в недостаточном количестве, поэтому частично должны поступать с пищей (полужаменимые аминокислоты).

Таблица 1.2

**Заменимые (–), незаменимые (+) и полужаменимые (±)
аминокислоты в белках организмов различных видов [5]**

Аминокислоты	Человек	Мышь	Курица	Лосось
Глицин	–	–	+/-	–
Аланин	–	–	–	–
Валин	+	+	+	+
Лейцин	+	+	+	+

Окончание табл. 1.2

Аминокислоты	Человек	Мышь	Курица	Лосось
Изолейцин	+	+	+	+
Цистеин	—	—	—	—
Метионин	+	+	+	+
Серин	—	—	—	—
Треонин	+	+	+	+
Аспарагиновая кислота	—	—	—	—
Глутаминовая кислота	—	—	—	—
Лизин	+	+	+	+
Аргинин	+/-	+/-	+	+
Фенилаланин	+	+	+	+
Тирозин	+/-	+/-	+	—
Гистидин	+/-	+	+	+
Триптофан	+	+	+	+
Пролин	—	—	—	—

Стоит отметить, что для человека главными источниками незаменимых аминокислот являются белки животного и растительного происхождения, а для животных — белки растительного происхождения. Все незаменимые аминокислоты должны содержаться в белках пищи.

С физиологической позиции аминокислоты помимо степени заменимости разделяются дополнительно по роли в метаболизме и по степени вхождения в состав белка (рис. 1.2).

По роли в метаболизме аминокислоты классифицируются на глюкогенные и кетогенные аминокислоты. К глюкогенным аминокислотам относятся аминокислоты, которые в процессе катаболизма превращаются в метаболиты, способные служить субстратом для глюконеогенеза — синтеза глюкозы из неуглеводных предшественников. Глюкогенные аминокислоты противопоставляются кетогенным, которые дают ацетил-КоА или ацетоацетил-КоА → кетоновые тела (ацетон, ацетоацетат). Некоторые аминокислоты являются одновременно глюкогенными и кетогенными (фенилаланин, тирозин, триптофан, изолейцин). К кетогенным аминокислотам относят лейцин и лизин.



Рис. 1.2. Классификация аминокислот по физиологической активности

Протеиногенные аминокислоты — это аминокислоты, которые кодируются генетическим кодом и входят в состав всех белков живых организмов (от бактерий до человека). Непротеиногенные аминокислоты (также называют неканоническими, нестандартными или вторичными) — это аминокислоты, которые не кодируются геномом, но встречаются в живых организмах в свободном виде, в составе пептидов (нерибосомальных) или образуются посттрансляционной модификацией уже синтезированных белков. Непротеиногенные аминокислоты также играют важную физиологическую роль в живом организме (табл. 1.3).

Таблица 1.3

**Биологическая роль некоторых видов
непротеиногенных аминокислот**

Тип	Пример	Физиологическая роль
Посттрансляционные модификации (возникают в уже синтезированных белках)	4-гидроксипролин, 5-гидроксизин (в коллагене); γ -карбоксиглутамат (в факторах свертывания крови); фосфосерин (после работы киназ)	Стабилизация коллагеновых фибрилл, связывание Ca^{2+} , регуляция активности белков

Окончание табл. 1.3

Тип	Пример	Физиологическая роль
Свободные метаболиты (не входят в белки, но важны физиологически)	γ -аминомасляная кислота (ГАМК), таурин, орнитин, цитруллин, гомоцистеин, β -аланин	Нейромедиаторы (ГАМК, таурин), компоненты мочевинового цикла (орнитин, цитруллин), маркеры патологий (гомоцистеин)
Нерибосомальные пептиды (синтезируются ферментами без рибосом)	D-аминокислоты (D-аланин, D-глутамат в клеточной стенке бактерий); L-аминоадипиновая кислота (в пенициллинах)	Структура антибиотиков (пенициллины, циклоспорины), устойчивость к протеазам
Токсические и растительные аналоги	Канаванин (заменитель аргинина), азидотирозин (искусственный); β -метиламино-L-аланин (ВМБА, нейротоксин)	Ингибиторы ферментов, защита растений от травоядных

Гидроксипролин и гидроксизин — это основные представители непротеиногенных аминокислот, которые встречаются только в коллагене. Для образования этих аминокислот ферменты пролилгидроксилаза и лизилгидроксилаза модифицируют белок после его синтеза. Для активации ферментов нужен витамин С (аскорбиновая кислота). Эти аминокислоты обеспечивают прочность соединительной ткани. Именно поэтому при дефиците витамина С снижается образование этих аминокислот, как следствие, нарушается синтез коллагена и наблюдается хрупкость сосудов, выпадение зубов. В промышленности можно использовать содержание гидроксипролина в качестве маркера для определения количества соединительной ткани (коллагена) в мясных продуктах. Чем его больше, тем ниже качество колбасы.

Еще одним представителем непротеиногенной аминокислоты является таурин (β -аминоэтансульфоновая кислота). Аминокислота отсутствует в растениях (поэтому вегетариан-

цы относятся к зоне риска по дефициту этой аминокислоты). Источником таурина являются морепродукты, мясо, яйца. Таурин оказывает антиоксидантное действие, участвует в стабилизации мембран, в регуляции работы и синтезе кальциевых каналов в сердце, осморегуляции сетчатки глаза. Данную аминокислоту обязательно добавляют в детские смеси, спортивные напитки, корма для кошек (кошки не синтезируют таурин совсем → без него у них развивается кардиомиопатия и слепота).

Физиологической активностью обладает и γ -аминомасляная кислота (непротеиногенная аминокислота). Она подавляет избыточное возбуждение нейронов, участвует в поддержании баланса между процессами возбуждения и торможения, а также принимает активное участие в регуляции метаболизма в головном мозге. Именно благодаря этому свойству ее активно используют в качестве биологически активной добавки и функционального ингредиента. γ -аминомасляную кислоту можно найти в ферментированных продуктах питания (соевый соус, темпе, кимчи, ферментированные молочные продукты), а также в зеленом чае.

Гомоцистеин является промежуточным продуктом метаболизма метионина и цистеина, который может далее метаболизироваться двумя альтернативными путями: необратимо расщепляться по пути транссульфурации или реметилироваться до метионина по пути реметилирования. Гомоцистеин — один из маркеров риска сердечно-сосудистых заболеваний и дефицита витаминов B_6 , B_9 , B_{12} . Также непротеиногенная аминокислота — гомоцистеин — является маркером, по которому оценивают качество рациона питания пожилых людей и пациентов с гипергомоцистеинемией.

1.2. Строение белка

Рассмотрим полимеры аминокислот — белки. Каждый белок характеризуется специфической аминокислотной последовательностью и индивидуальной пространственной структурой (конформацией).

Белковая молекула может состоять из одной или нескольких полипептидных цепей, содержащих от 50 до нескольких сотен (иногда более тысячи) аминокислотных остатков. Молекулы, содержащие менее 50 остатков, принято относить к пептидам. В состав многих белков входят остатки цистеина, дисульфидные связи которых ковалентно связывают участки одной или нескольких цепей, обеспечивая дополнительную стабилизацию структуры.

Аминокислотные остатки в полипептидной цепи белков расположены не случайным образом, а в строго определенной последовательности. Линейная последовательность аминокислотных остатков получила название *первичной структуры белка* (рис. 1.3). Первичная структура была открыта профессором Казанского университета А. Я. Данилевским в 1889 году. Именно первичная структура определяет все последующие уровни пространственной организации белковой молекулы — вторичную, третичную и четвертичную структуры.

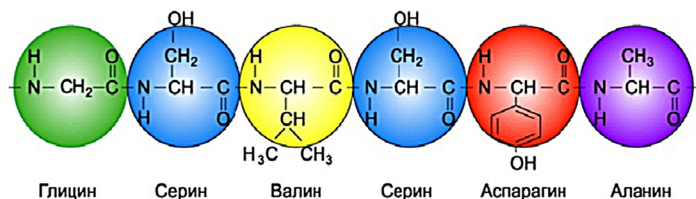


Рис. 1.3. Первичная последовательность белка [9]

Последовательность аминокислот в первичной структуре является строго специфичной для каждого индивидуального белка и служит главным признаком, отличающим один белок от другого. Биологическая активность белка чрезвычайно чувствительна к его первичной структуре: замена даже одной аминокислоты на другую может привести к полной утрате функциональной активности. Первичная структура белка генетически детерминирована и воспроизводится в процессе транскрипции и трансляции в соответствии с генетическим кодом.

Стабилизация первичной структуры обеспечивается ковалентными связями, среди которых основную роль играют пептидные связи. В ряде белков дополнительную стабилизацию вносят дисульфидные связи, образующиеся при окислении сульфгидрильных групп остатков цистеина, расположенных в разных участках одной полипептидной цепи.

Полипептидная цепь в пространстве может располагаться в виде спирали (альфа-спираль) либо в виде складчатого листа (бета-структуры). Такое расположение полипептидной цепи в пространстве называется вторичной структурой белка (рис. 1.4).

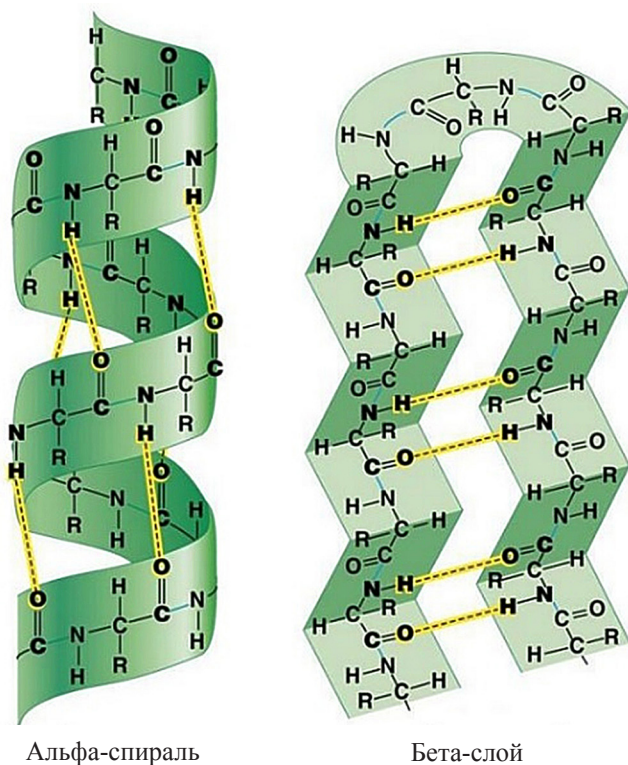


Рис. 1.4. Вторичная структура белка [10]

α -спираль. В этой конформации полипептидная цепь закручена в правозакрученную спираль. На один виток спирали приходится 3,6 аминокислотных остатка. Стабилизация α -спирали обеспечивается водородными связями между карбонильной группой (C=O) каждого i -го остатка и аминогруппой (N-H) $(i+4)$ -го остатка. Боковые радикалы аминокислот ориентированы наружу от оси спирали, что позволяет им свободно взаимодействовать с окружающей средой [5].

β -складчатый лист (β -слой). Данный тип структуры формируется за счет межцепочечных водородных связей между соседними участками полипептидной цепи. Различают параллельные (цепи ориентированы в одном направлении) и антипараллельные (цепи ориентированы в противоположных направлениях) β -листы. Аминокислотные остатки в β -структуре располагаются в вытянутой зигзагообразной конформации.

Кроме того, во вторичной структуре выделяют **β -повороты** (резкие изменения направления полипептидной цепи, часто содержащие остатки пролина или глицина) и **неупорядоченные (случайные) клубки** — участки, не имеющие строгой регулярной укладки [Там же].

Формирование вторичной структуры определяется первичной последовательностью: некоторые аминокислоты (например, глутаминовая кислота, аланин) предрасположены к образованию α -спиралей, в то время как другие (валин, изолейцин, фенилаланин) чаще встречаются в β -листах. Остатки пролина и глицина выступают как «разрушители» вторичной структуры: пролин из-за своей жесткой циклической структуры не способен образовывать водородную связь, а глицин из-за высокой конформационной подвижности нестабилен в α -спирали.

Вторичная структура является важнейшим промежуточным этапом на пути формирования функционально активной конформации белка и служит основой для укладки более высокого порядка — третичной структуры.

Третичная структура — это пространственное расположение полипептидной цепи в определенном объеме. В стабилизации третичной структуры основную роль играют нековалентные взаимодействия. К ним относятся водородные связи; электро-

статические взаимодействия заряженных групп; межмолекулярные ван-дер-ваальсовы силы; взаимодействия неполярных боковых радикалов аминокислот (гидрофобные взаимодействия); диполь-дипольные взаимодействия.

Кроме того, важную роль в формировании третичной структуры играют ковалентные дисульфидные связи (S—S-мостики) (рис. 1.5). В крупных белках дисульфидные мостики, как правило, дополняют систему нековалентных связей, придавая молекуле дополнительную жесткость.

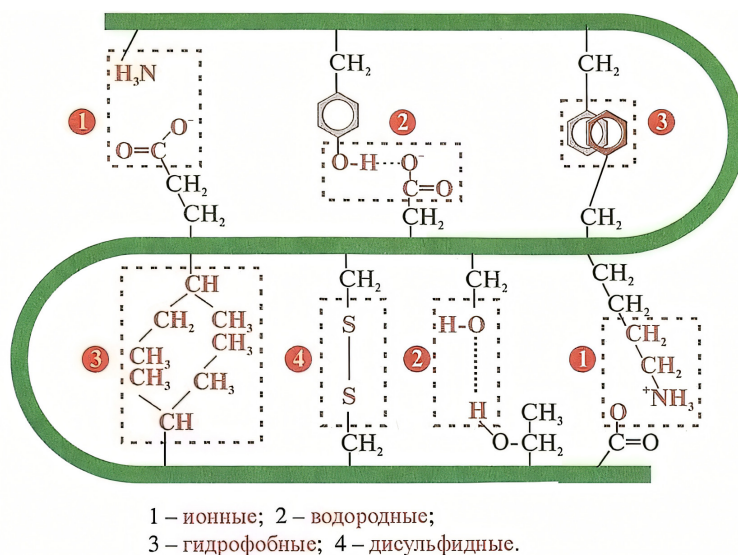


Рис. 1.5. Химические связи, участвующие в формировании третичной структуры [11]

Солевые, или ионные, связи возникают между боковыми радикалами аминокислотных остатков, несущими противоположные заряды. Образование таких зарядов происходит вследствие диссоциации карбоксильных групп (с появлением отрицательного заряда) и протонирования аминогрупп (с появлением положительного заряда).

В качестве основных (положительно заряженных) групп в составе белков выступают ϵ -аминогруппа лизина; гуанидиновая группа аргинина; имидазольная группа гистидина (один из атомов азота имидазольного кольца обладает основными свойствами, тогда как другой проявляет кислотные).

Кислотные (отрицательно заряженные) группы представлены свободными карбоксильными группами аспарагиновой и глутаминовой кислот. Помимо них, указанные выше кислотные свойства имидазольного кольца гистидина также могут вносить вклад в формирование отрицательного заряда при определенных значениях pH.

Нативная (естественная) конформация белка представляет собой наиболее энергетически выгодное состояние, к которому стремится полипептидная цепь в процессе сворачивания (фолдинга). Поскольку третичная структура жестко определяется первичной структурой полипептидной цепи, можно говорить о генетической детерминированности третичной структуры: последовательность аминокислотных остатков, закодированная в гене, однозначно задает уникальную пространственную укладку белковой молекулы.

Четвертичная структура — это наиболее высокий уровень структурной организации белка, который характеризуется способом укладки и взаимодействия нескольких отдельных полипептидных цепей (субъединиц, или протомеров) в составе единой, функционально активной белковой молекулы.

В отличие от первичной, вторичной и третичной структур, которые могут быть присущи одной полипептидной цепи, четвертичная структура возникает только в **олигомерных белках**, состоящих из двух и более субъединиц. Каждая субъединица в отдельности обладает собственной третичной структурой, но не всегда проявляет биологическую активность. Функционально активным белок становится лишь после объединения субъединиц в единый надмолекулярный комплекс.

Связи между субъединицами в олигомерном белке имеют преимущественно нековалентную природу. В стабилизации четвертичной структуры участвуют те же типы взаимодействий, что и в формировании третичной структуры:

- водородные связи между боковыми радикалами аминокислот на поверхности контакта субъединиц;
- электростатические (ионные) взаимодействия между противоположно заряженными группами;
- гидрофобные взаимодействия между неполярными участками на контактных поверхностях;
- вандерваальсовы силы.

В некоторых олигомерных белках дополнительную стабилизацию могут вносить ковалентные дисульфидные связи между субъединицами, однако такие мостики встречаются реже и характерны преимущественно для секретируемых белков (например, иммуноглобулинов).

Ключевой особенностью четвертичной структуры является кооперативность — согласованное изменение конформации и функциональной активности всех субъединиц при связывании лиганда с одной из них. Наиболее яркий пример — гемоглобин, состоящий из четырех субъединиц (двух α - и двух β -цепей). Присоединение молекулы кислорода к одной субъединице повышает сродство к кислороду всех остальных субъединиц, что обеспечивает эффективный транспорт газов.

Важно отметить, что четвертичная структура, как и третичная, генетически детерминирована первичной структурой каждой субъединицы. Однако в отличие от третичной структуры, четвертичная может быть аллостерически регуляторной, то есть ее конформация способна изменяться под действием эффекторов (активаторов или ингибиторов), что лежит в основе многих механизмов регуляции ферментативной активности.

Многие важнейшие белки организма обладают четвертичной структурой. В частности, гемоглобин имеет четыре субъединицы; иммуноглобулины (антитела) состоят из четырех полипептидных цепей; инсулин в составе депо-формы содержит шесть субъединиц; коллаген представляет собой белок, состоящий из трех полипептидных цепей. Также следует отметить, что многие ферменты имеют четвертичную структуру.

Объединение субъединиц в единый комплекс обеспечивает ряд преимуществ:

— экономию генетического материала. Одна и та же субъединица может кодироваться одним геном и многократно использоваться в сборке белка;

— регуляцию активности. Возможность аллостерического контроля позволяет тонко настраивать функцию белка в ответ на изменения условий среды;

— повышение стабильности. Межсубъединичные контакты часто увеличивают устойчивость белка к денатурации;

— формирование активных центров. Каталитический сайт может располагаться на стыке двух и более субъединиц.

Таким образом, четвертичная структура представляет собой высший уровень пространственной организации белка, обеспечивающий усложнение функций [5].

1.3. Классификация белков

Белки представляют собой обширную и разнообразную группу биополимеров, различающихся по строению, физико-химическим свойствам, биологическим функциям и локализации в организме. Многообразие белков (у человека их насчитывается до 5 млн видов) требует разработки научно обоснованных подходов к их систематизации. Единой универсальной классификации белков не существует, так как различные критерии позволяют группировать их по разным признакам. В данном разделе учебного пособия рассмотрим основные принципы классификации, получившие наибольшее распространение в биохимии и молекулярной биологии.

Классификация по химическому составу позволяет разделить все белки в зависимости от наличия или отсутствия небелкового компонента. На основе этого принципа все белки разделяются на простые (протеины) и сложные (протеиды).

Простые белки — это белки, которые при гидролизе распадаются исключительно на аминокислоты и не содержат небелковых компонентов (простетических групп). Характеристика основных белков представлена в таблице 1.4.

Таблица 1.4

Характеристика основных представителей простых белков

Группа белков	Характеристика	Основные представители
Альбумины	Низкомолекулярные белки (мол. масса 15—70 кДа), хорошо растворимы в воде и слабых солевых растворах, осаждаются при 100 %-ном насыщении сульфатом аммония. Характерен кислый характер (много глутаминовой и аспарагиновой кислот)	Сывороточный альбумин крови (транспортная функция), овальбумин яйца (запасная функция), лактальбумин молока
Глобулины	Высокомолекулярные белки (мол. масса 150—900 кДа), нерастворимы в воде, но растворимы в разбавленных солевых растворах. Осаждаются при 50 %-ном насыщении сульфатом аммония	Иммуноглобулины (антитела), фибриноген, глобулины сыворотки крови, глобулин яйца (овоглобулин)
Гистоны	Низкомолекулярные основные белки (мол. масса 11—22 кДа), богаты лизином и аргинином. Растворимы в воде и слабых кислотах	H1, H2A, H2B, H3, H4 (входят в состав хроматина, участвуют в упаковке ДНК)
Протамины	Самые низкомолекулярные из простых белков (мол. масса 4—12 кДа). Содержат до 80 % аргинина. Сильно основные	Сальмин (из спермы лососевых), клупеин (из сельди). Заменяют гистоны в сперматозоидах
Проламины	Растворимы в 70 %-ном этаноле, богаты пролином и глутамином, не содержат лизина. Запасные белки растений	Глиадин (пшеница), зеин (кукуруза), гордеин (ячмень)
Глютелины	Растворимы в разбавленных щелочах и кислотах. Запасные белки зерновых	Глютеинин (пшеница), оризеинин (рис)
Протеиноиды	Нерастворимы в воде, солевых растворах, разбавленных кислотах и щелочах. Белки опорных тканей	Коллаген (сухожилия, кости), эластин (связки, стенки сосудов), кератин (волосы, ногти, рога, перья)
Альбуминоиды (склеропротеины)	Синоним протеиноидов. Отличаются высокой механической прочностью	Фиброин шелка (основной белок нити), коллаген (в старой классификации)

Сложные белки состоят из белковой части (апобелка) и ковалентно связанной с ней небелковой компоненты — простетической группы. Биологическая активность сложного белка часто определяется именно простетической группой. Различают следующих представителей этой группы:

— фосфопротеины — белки, которые в качестве простетической группы содержат остаток фосфорной кислоты (присоединен к серину или треонину). Как правило, это белки, которые выполняют функции запасаения и транспортировки фосфора, а также регулирования ферментной системы (фосфорилирование — ключевой механизм регуляции ферментов). В качестве основных представителей следует назвать казеиноген молока, вителлин (желток яйца), фосвитин;

— гликопротеины — белки, в состав которых входят углеводные компоненты (олигосахариды, реже гликозаминогликаны). Основными представителями данной группы белков являются иммуноглобулины, рецепторы клеточных мембран, муцины (слизь), компоненты клеточных стенок;

— липопротеины — группа белков, которые содержат в качестве простетической группы липиды (триглицериды, фосфолипиды, холестерин). Основные представители: липопротеины плазмы крови; липопротеины клеточных мембран. Основная функция липопротеинов заключается в транспортировке липидов в крови и участие в структуре мембраны клетки;

— нуклеопротеины (нуклеопротеиды) — сложные белки, состоящие из белковой части и нуклеиновой кислоты в качестве простетической (небелковой) группы. Выполняют важнейшие функции хранения, передачи генетической информации и синтеза белка. Основными представителями этой группы являются дезоксирибонуклеопротеины, рибонуклеопротеины, рибосомы, хроматин;

— металлопротеины — сложные белки, содержащие в своей молекуле один или несколько прочно связанных ионов металлов. Они составляют значительную часть всех белков в живых организмах и выполняют жизненно важные функции: транспорт веществ, защиту от окислительного стресса и катализ

химических реакций. Хорошо изученными представителями этой группы являются гемоглобин и миоглобин (Fe^{2+} в геме), цитохромы (Fe), церулоплазмин (Cu), карбоангидраза (Zn);

— хромопротеины — белки, в состав которых помимо аминокислотной последовательности входят пигменты. Благодаря наличию пигментов эти белки способны играть заметную роль в фотосинтезе и процессе, связанном с восприятием света. Также отмечается, что хромопротеины участвуют в процессах дыхания. В качестве основных представителей этой группы можно назвать каротинопротеины, хлорофиллопротеины, флавопротеины и т. д.;

— флавиновые белки (флавопротеины) — сложные белки, состоящие из белковой части и флавиновых нуклеотидов (ФАД или ФМН). Принимают активное участие в окислительно-восстановительных реакциях и переносе электронов. Основными представителями данной группы сложных белков являются НАДН-дегидрогеназа, сукцинатдегидрогеназа.

Все белки можно классифицировать по принципу соотношения продольной и поперечной осей молекулы (коэффициент асимметрии) — по форме молекулы. По такому принципу различают глобулярные и нитевидные (фибриллярные) белки.

К глобулярным белкам относят протеины, полипептидные цепи которых свернуты в компактные, округлые (сферические) структуры. Коэффициент асимметрии (отношение длины к ширине) обычно не превышает 3—5. Как правило, глобулярные белки хорошо растворимы в воде и слабых солевых растворах. Основными представителями данной группы белков являются альбумины, глобулины, большинство ферментов, гемоглобин, антитела. Такие белки в живом организме выполняют динамические функции — ферментативная, транспортная, регуляторная, защитная (иммунная).

В том случае если полипептидные цепи вытянуты вдоль одной оси, образуют длинные нити или волокна, мы имеем дело с нитевидными (фибриллярными) белками. У таких белков коэффициент асимметрии более 10, может достигать 200—300. Все представители фибриллярных белков (коллаген, эластин, кератин, фиброин (шелк), миозин (сократительный фибриллярный белок)) нерастворимы в воде и солевых растворах (исключе-

чение — фибриноген, растворимый в плазме, но переходящий в нерастворимый фибрин при свертывании крови). Как видно из представленного материала, фибриллярные белки преимущественно выполняют структурные (опорные, механические) функции.

В лабораторной практике и промышленности (пищевая, кормовая) важна способность белка растворяться в различных растворителях. В зависимости от того, в каких растворителях белки растворяются, их делят на водорастворимые, солерастворимые, щелочерастворимые, спирторастворимые и нерастворимые. Эта классификация частично пересекается с делением на простые белки.

Также белки могут быть классифицированы в зависимости от локализации в клетке. По этому принципу различают следующие белки:

- ядерные (гистоны, ДНК-полимераза, РНК-полимераза, факторы транскрипции, белки ядерного матрикса). Функция ядерных белков заключается в участии процессов репликации, транскрипции, репарации ДНК, упаковке хроматина;

- цитоплазматические — белки, которые локализованы внутри клетки. Такие белки выполняют структурную, каталитическую, транспортную функции, играют ключевую роль в формировании клеточного каркаса мембраны. Цитоплазматические белки синтезируются рибосомами;

- мембранные — белки, которые входят в состав липидного бислоя мембраны клеток;

- митохондриальные — белки, которые принимают активное участие в энергетическом обмене (окислительное фосфорилирование, синтез АТФ);

- секретируемые (внеклеточные). К данной группе белков относят гормоны (инсулин), ферменты (панкреатическая амилаза), белки межклеточного матрикса (коллаген), иммуноглобулины, альбумин (кровь). Основные функции секретируемых белков: защитная, регуляторная, транспортная, участие в формировании внеклеточного матрикса.

Многообразие белков требует использования нескольких систем классификации одновременно. На практике наиболее значимыми являются химический состав (простые / сложные) —

для понимания структуры и методов анализа; классификация, основанная на форме молекулы (глобулярные / фибриллярные) — для оценки технологических свойств (растворимость, гелеобразование, вязкость).

При характеристике любого белка необходимо указывать как минимум его происхождение (растительный / животный / микробный), функциональную принадлежность (фермент, структурный, транспортный) и, при возможности, принадлежность к той или иной группе по химическому составу.

1.4. Функции белков в живом организме

Белки являются важнейшей составной частью клеток любого живого организма, им принадлежит решающая роль во всех процессах жизнедеятельности. Белки составляют материальную основу химической активности клетки, а также играют важную роль практически во всех биологических процессах (исключение составляют лишь генетические процессы) [5].

Ферментативная функция белков заключается в ускорении биохимических реакций и регуляции обменных процессов живого организма. Иначе эту функцию называют каталитической. Белки, которые проявляют каталитическую функцию, называются ферментами. В настоящее время известно более 2000 ферментов. Стоит обратить внимание, что один фермент ускоряет только одну реакцию и специфичен к субстрату.

Иммунологическая (антитоксическая) функция белков заключается в нейтрализации чужеродного агента (антигена) в живом организме. Белки, которые выполняют данную функцию, называют антителами. В результате взаимодействия белков с чужеродным агентом в организме образуется комплекс, который называют антиген — антитело.

В качестве основных представителей иммунологических белков можно назвать интерлейкины, иммуноглобулины, комплемент (белок, способствующий образованию комплекса антиген — антитело).

Защитная функция белков позволяет сохранять реологические свойства биологическим жидкостям в различных услови-

ях окружающей среды. В качестве представителей таких белков можно указать белки-антифризы — белки, которые предохраняют кровь речных рыб, насекомых, растений и микроорганизмов от замерзания (AFP I-IV типов у арктических рыб (антарктическая нототения, полярная рыба-улитка)), белки личинок жука *Dendroides canadensis* и гликопротеины, защищающие ткани растений). Антифризные гликопротеины (AFGP) синтезируются в организме арктических тресковых и антарктических нототений. Благодаря белкам-антифризам (*D. canadensis*) личинки жука выдерживают температуру до минус 60 °С. Такие растения, как пихта, ель и некоторые сорта пшеницы, способны синтезировать белки, позволяющие им выдерживать низкие температуры.

Известны белки, которые обладают способностью связывать лед (IBP). Эти белки работают не за счет концентрации (как соли), а путем прикрепления к поверхности микрокристаллов льда, препятствуя их росту (эффект термического гистерезиса).

Механическая (опорная) функция белков обусловлена их участием в построении внеклеточных структур опорных тканей. Такие белки обеспечивают дополнительно прочность опорных тканей. Основными представителями таких белков являются фиброин, коллаген, кератин и т. д. Коллаген — основной фибриллярный белок, который входит в состав костной ткани и сухожилий. Фиброин — гетерогенный димер белковой природы, который получают из коконов шелкопряда *Bombyx mori* и родственных видов. Кератин — фибриллярный белок, который входит в состав волос, ногтей и верхнего слоя кожи.

Транспортная функция белков заключается в связывании целых растворенных веществ, в активном и пассивном переносе их через мембраны клеток, а также переносе их между тканями в живом организме. Классическими представителями транспортных белков являются гемоглобин (транспортирует кислород и углекислый газ), трансферрин (транспортирует ионы железа), липопротеиды (осуществляют транспортировку липидов).

Обезвреживающая (детоксицирующая) функция белков заключается в связывании токсических элементов в живом организме. Хорошо известным представителем данного класса

белков являются альбумины (белки, которые связывают органические яды, алкалоиды, органические соединения и тяжелые металлы и переводят их в безвредное соединение). Альбумины содержатся в крови животного и коровьем молоке. Также хорошо известны белки печени, которые способны обезвреживать и расщеплять ксенобиотики и другие токсические соединения, образующиеся при метаболизме.

Когенетическая функция белков заключается в том, что с помощью некоторых белков (ДНК-полимеразы, ДНК-зависимой РНК-полимеразы) нуклеиновые кислоты реализуют свою генетическую функцию (передачу наследственной информации).

Сократительная функция белков обеспечивает возможность осуществлять внутриклеточное движение, внутриклеточную транспортировку веществ, а также сокращать мышцы. Основными представителями данного вида белков являются актин и миозин.

Энергетическая функция белков заключается в способности живого организма использовать белки в качестве субстрата для получения энергии. При полном окислении 1 г белка выделяется примерно 17,6 кДж (4,1 ккал). Все белки распадаются на аминокислоты, которые в свою очередь теряют азот (дезаминирование). Оставшийся углеводный скелет превращается в разные метаболиты (пируват, ацетил-КоА, кетокислоты, ацетоацетил-КоА), которые вступают в цикл Кребса, образуя аденозинтрифосфат (АТФ). В результате этой реакции из 1 г белка высвобождается энергия в количестве 17,1 кДж (3,8 ккал). Количество энергии сопоставимо с углеводами (4,0 ккал), но меньше, чем образующая энергия жиров (9,0 ккал).

Стоит отметить, что белки используются в качестве источника энергии обычно в условиях дефицита углеводов и жиров, а также при повышенной физической нагрузке (интенсивной нагрузке), травмах, ожогах и болезнях.

Геннорегуляторная функция обусловлена тем, что некоторые белки регулируют процессы репликации, транскрипции ДНК, а также процессы переноса наследственной (генетической) информации. В частности, гистоны — ядерные аргинин и лизинсодержащие белки, которые участвуют в процессе укладки ДНК в хроматин.

Резервная (запасающаяся, трофирическая) функция белков. Белки используются в живом организме как источник питательных веществ, необходимых для развития клеток и организма в целом. Семена растений способны запасать такие белки, как глютелины и проламины, а яйцо курицы обогащено овальбумином.

Энерготрансформирующую функцию выполняют белки, которые принимают участие в преобразовании химической энергии (АТФ) из осмотической и электрической. Классическими представителями таких белков являются ферменты, которые принимают участие в синтезе АТФ (АТФ-синтетаза).

Структурная функция — одна из самых первых функций, которая была открыта для белков: способность белков выступать в качестве строительного материала для тканей, клеток и органов живых организмов. Белки играют ключевую роль в создании внутреннего каркаса клетки — цитоскелета (тубулин, актин, кератин, ламин, виментин). Кроме того, такие белки участвуют в создании плазматической мембраны. Еще различают структурные белки митохондрий, белки рибосом и т. д.

Регуляторная функция — способность белков управлять химическими реакциями, работой генов, делением клеток и согласовывать деятельность всего организма. Многие гормоны имеют белковую или пептидную природу (инсулин, глюкагон, соматотропин, пролактин). Они вырабатываются одними клетками, разносятся кровью и действуют на другие (клетки-мишени). Однако стоит отметить, что не все гормоны имеют белковую природу. Так, например, стероидные гормоны являются производными холестерина.

Способность белков избирательно связывать различные молекулы-регуляторы (гормоны, медиаторы, циклические нуклеотиды) как на поверхности клеточных мембран, так и внутри клетки (с помощью цитозольных рецепторов) обуславливает проявление *рецепторной функции*. В качестве примера можно привести белки мембранных каналов (регулируют клеточный транспорт), никотиновый холирецептор (белок, участвующий в формировании никотиновой и этанольной зависимости), родопсин (белок, регулирующий остроту зрительного восприя-

тия, а также отвечающий за световую адаптацию), цитозольный рецептор эстрадиола (белок, участвующий в процессе связывания эстрадиола внутри клеток).

Некоторые белки и пептиды могут выполнять *токсигенную функцию*. Кроме того, некоторые белки и пептиды одних живых организмов способны проявлять токсические свойства относительно других живых организмов. Классическим примером таких пептидов являются змеиные яды, дифтерийный и ботулинический токсин.

Многие пептиды микроорганизмов способны проявлять *лекарственную функцию*, например антибиотики.

Стоит отметить, что роль белка в клетке непостоянна и зависит от его пространственного распределения по компартментам [5].

1.5. Источники белка в пищевой и кормовой промышленности

Белок — это незаменимый макронутриент, выполняющий разнообразные функции в живом организме, а также источник аминокислот и биологически активных пептидов. Главная задача промышленности заключается не просто в получении сырья с высоким содержанием белка, а в обеспечении его сбалансированности по аминокислотному составу и усвояемости. В связи с тем что в настоящее время наблюдается «белковый голод» (дефицит белка), промышленники и ученые изучают вопросы, связанные с оптимизацией технологий получения белка из традиционных источников (увеличение выхода целевого продукта), поиском и внедрением альтернативных (нетрадиционных) источников белка [1; 2].

Традиционными источниками белка для пищевой промышленности являются сырье животного и растительного происхождения. Белки животного происхождения считаются полноценными, так как содержат весь спектр незаменимых аминокислот (особенно лизин, метионин, треонин).

Источники белков животного происхождения [2]:

— молоко и молочная сыворотка (казеин (медленный белок), сывороточные белки (альбумин, глобулин)). Используются в спортивном и детском питании, мясных эмульсиях;

— мясо и субпродукты (миозин, актин, коллаген (неполноценный, но важен для гелеобразования), свинина, говядина, птица);

— яйцо (овальбумин, кональбумин, лизоцим). Считается эталоном усвояемости (97—98 %);

— рыба и морепродукты (мышечные белки с высокой скоростью переваривания (коллагена мало)). Источник незаменимой аминокислоты — гидроксипролина.

Источники белков растительного происхождения:

— зернобобовые: соя (содержит 35—40 % белка, незаменимые кислоты — кроме метионина). Изоляты и концентраты сои — основа для заменителей мяса;

— злаки: пшеница (глютен — 10—14 % белка, но низкое содержание лизина). Витальный пшеничный глютен использует в хлебопечении и мясной индустрии для связи воды;

— масличные культуры после отжима масла (шроты и жмыхи). Основной кормовой белок для сельскохозяйственных животных (подсолнечный, рапсовый, льняной шроты). Содержат антипитательные вещества (ингибиторы трипсина, госсипол у хлопчатника).

Белок необходим не только для пищевой промышленности. Это органическое соединение важный элемент питания для сельскохозяйственных животных, птиц и рыб (кормовой протеин или кормовой белок). Применение в сельском хозяйстве добавок в виде кормовых белковых концентратов связано с необходимостью балансировки рационов кормов современных пород и кроссов животных, птиц и рыбы. Основной задачей использования кормового белка, полученного из отходов агропромышленного комплекса и пищевой промышленности, является снижение себестоимости рациона питания и сохранение продуктивности (прирост массы, увеличение яйценоскости сельскохозяйственных птиц, повышение показателей удоев молока). Кроме того, источники белка, используемые в кормах для животных, должны соответствовать ряду важных требований, таких как высокое содержание белка, адекватный аминокислот-

ный профиль, высокая усвояемость, хорошие вкусовые качества, отсутствие антипитательных факторов, а также гарантированная поставка и доступная цена.

В качестве источников кормового белка традиционно используют следующие продукты в агропромышленном комплексе:

— *кровяную, мясокостную, перьевую муку*. Данные виды муки представляют собой переработанные отходы убойных животных и птиц. Перьевая мука богата цистином, однако требует высокотемпературной обработки (гидролиза) для разрушения кератина. Кровяная мука, побочный продукт скотобойни, широко используется в качестве источника белка в кормах для скота, и ее питательная ценность в значительной степени определяется используемым методом сушки — в основном периодической сухой, кольцевой и распылительной переработкой;

— *белки микробного синтеза*. В кормовой промышленности используются бактерии, дрожжи, микроводоросли и плесневые грибы для получения кормового белка. Для культивирования микроорганизмов с целью накопления белковой биомассы используют различные отходы агропромышленного комплекса и вторичные продукты пищевой промышленности;

— *зеленую массу (травяная мука, люцерна)*, содержащую помимо белка (18—22 %), еще и витамины. Зеленую массу используют в качестве кормовой добавки в рационах кроликов, свиней и сельскохозяйственной птицы;

— *рыбную муку*. Содержит большое количество энергии на единицу веса и является источником высококачественного белка, а также легкоусвояемых незаменимых аминокислот и жирных кислот. Рыбная мука в целом улучшает рост и продуктивность сельскохозяйственных животных на старте и откорме. Рыбная мука — это натуральный сбалансированный кормовой ингредиент, богатый белком, энергией и минералами (например, кальцием и фосфором). Кроме того, она естественный источник витаминов и омега-3.

Рыбная мука хорошего качества обычно содержит от 60 до 72 % сырого протеина по весу. С точки зрения питательной ценности она является одной из предпочтительных добавок животного белка в рационах сельскохозяйственных животных. Высокое содержание серосодержащих аминокислот в рыбной

муке включает не только метионин, но и лизин, который повышает устойчивость животных к многочисленным заболеваниям и улучшает рост. Аминокислотный состав рыбной муки представлен в таблице 1.5.

Таблица 1.5

**Аминокислотный состав кормового белка,
полученного из разных источников**

Аминокислота	Содержание, г/100 г			
	Рыбная мука	Перьевая мука	Кровяная мука	Мясокостная мука
Аргинин	5,70	6,15	4,33	6,67
Гистидин	2,41	1,95	6,56	2,11
Изолейцин	4,74	3,14	1,18	2,96
Лейцин	7,74	6,07	14,25	7,11
Лизин	7,91	5,18	9,13	5,69
Метионин	3,02	1,73	1,28	1,48
Цистеин	0,94	1,01	1,41	1,11
Фенилаланин	4,12	3,53	6,93	4,02
Тирозин	3,33	2,43	2,94	2,59
Треонин	4,37	3,40	5,25	3,65
Триптофан	1,18	0,75	1,40	0,65
Валин	5,43	3,92	9,14	4,93

В настоящее время для получения белка пищевого и кормового назначения предлагается использование новых источников. К альтернативным источникам белка относятся аналоги мяса, насекомые, некоторые древесные и травянистые растения и водоросли, включая морские водоросли.

Насекомые, которые также относятся к животному царству, более эффективно, чем животные, выращиваемые традиционным способом, преобразуют корм в белок, поскольку они требуют меньше воды и места и вызывают меньше загрязнения; поэтому разведение насекомых для пищевых продуктов и кормов является экологически чистой альтернативой традиционному животноводству. Другие потенциальные источники белков, например белок отдельных клеток и культивируемое (лабора-

торное) мясо, также привлекают внимание и исследуются уже около 40—50 лет. Белок отдельных клеток либо извлекается из клеток различных микроорганизмов (например, дрожжей, плесени, бактерий и водорослей), либо используется в виде целых клеток для белковой добавки. Выращенное в лаборатории (культивированное) мясо представляет собой совокупность структурированных тканей животных, выращенных с помощью клеточной культуры. Клетки мышечных волокон животных культивируются на подходящих средах, собираются и органи-
зуются / структурируются в виде мышечных продуктов.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. В чем заключается разница между незаменимыми, заменимыми и полузаменимыми аминокислотами?
2. Опишите четыре уровня структурной организации белковой молекулы (первичная, вторичная, третичная, четвертичная).
3. Чем отличаются α -спираль и β -складчатый лист?
4. На какие две группы делятся белки по химическому составу?
5. Перечислите не менее пяти основных функций белков в живом организме. Приведите конкретные примеры белков для каждой функции.

Тема 2

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕЛКА ИЗ МИКРООРГАНИЗМОВ

План темы 2

- 1. Микроорганизмы для производства белка.*
- 2. Технологическая схема производства белка из микроорганизмов.*
- 3. Пищевая ценность белка микробного происхождения.*
- 4. Основные ограничения применения белков микробного происхождения.*

2.1. Микроорганизмы для производства белка

Начиная с начала 1950-х годов предпринимались интенсивные усилия по поиску новых альтернативных источников белка в качестве пищевых добавок. Бактерии, водоросли, дрожжи и грибы богаты белками, которые можно использовать в качестве добавок кормового и пищевого назначения (рис. 2.1). Белки, полученные с помощью микроорганизмов, имеют значительные преимущества перед белками растительного и животного происхождения:

- 1) технология получения белков с помощью микроорганизмов не имеет сезонной и климатической зависимости;
- 2) белки микроорганизмов можно получать круглый год;
- 3) для выращивания (культивирования) микроорганизмов не требуется большая площадь;
- 4) микроорганизмы обладают высокой питательной ценностью, содержат больше белка, широкий спектр аминокислот и мало жира [2; 4].

Тот факт, что производство микробных белков может осуществляться с использованием органических отходов, также способствует переработке материалов. И еще одним преимуществом белков микробного происхождения является то, что они очень похожи на традиционные источники белка, такие как мясо, яйца, рыба и молоко, с точки зрения общего содержания питательных веществ.

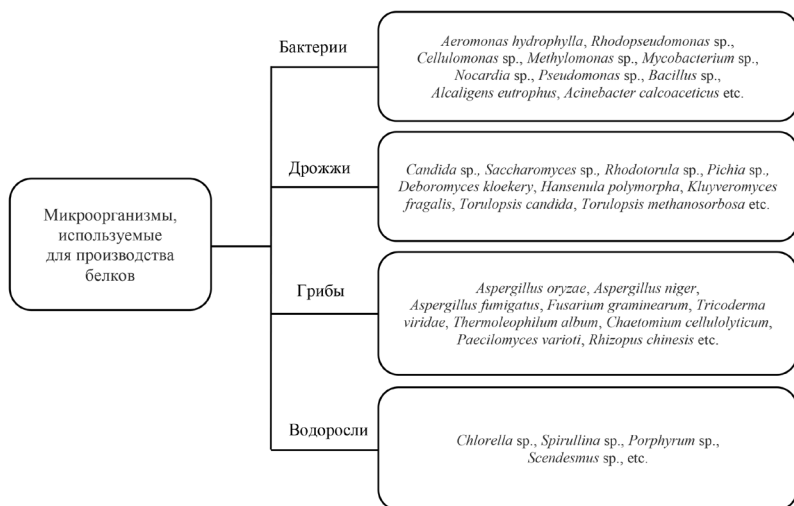


Рис. 2.1. Микроорганизмы, используемые для производства белков в биотехнологии

Бактерии. Среди ключевых свойств бактерий, делающих их пригодными для получения белка, выделяют высокую скорость роста и короткое время генерации. Микроорганизмы способны развиваться на самом разном сырье: от углеводов до газообразных и жидких углеводородов. В практике производства белка обычно рекомендуют использовать фототрофные, метанотрофные и другие группы бактерий. Крупномасштабное получение микробного белка возможно с помощью таких видов, как: *Thermomonospora fusca*, *Rhodopseudomonas capsulata*, *Pseudomonas fluorescens*, *Bacillus subtilis*, *Brevibacterium*, *Bacillus*

megaterium, *Acinetobacter calcoacenticus*, *Aeromonas hydrophila*, *Acromobacter delvaevate*, *Methylomonas methylotrophis*, виды *Lactobacillus*, виды *Cellulomonas*, виды *Flavobacterium*.

На текущий момент насчитывается более 30 разновидностей бактерий, способных служить сырьем для получения белка кормового назначения. Бактериальная биомасса содержит в своем составе белка до 60—80 % от сухой массы.

Для производства белка можно использовать метанокисляющие, пропионовые, метилокисляющие бактерии. Группа *метилокисляющих бактерий (метилотрофов)* насчитывает около 40 аэробных видов микроорганизмов. Их главная метаболическая особенность — способность утилизировать в качестве источника углерода и энергии не сам метан, а его окисленные и замещенные производные. Некоторые представители способны использовать галогенсодержащие метаны (хлорметан и дихлорметан). Важно подчеркнуть, что, в отличие от метанотрофов, метиловобактерии не растут на молекулярном метане (CH_4), что служит их ключевым дифференциальным признаком.

Метанокисляющие микроорганизмы. В систематике, предложенной в определителе Бержи, микроорганизмы, окисляющие метан, объединены в семейство *Methylococcaceae*. Главная физиологическая черта этих бактерий — использование метана как единственного углеродсодержащего субстрата для обеспечения энергией и построения биомассы. Данный процесс протекает либо в аэробных условиях, либо при крайне низком содержании кислорода. Среди штаммов, применяемых в промышленности, наиболее распространены представители родов *Mycobacterium*, *Pseudobacterium*, *Bacillus*, *Metanomonas* и *Staphylococcus*. Из клеток чистых культур метанотрофов выделяют белок, доля которого варьируется от 37 до 58 % в пересчете на сухую биомассу. По набору незаменимых аминокислот данный продукт сопоставим с рыбной и соевой мукой, а в ряде случаев даже превосходит их.

Пропионовокислые бактерии (Propionibacterium) обладают способностью самостоятельно продуцировать полный набор

аминокислот, используя в качестве источника азота сульфат аммония $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$. В процессе синтеза белков эти микроорганизмы формируют фонд из 15 аминокислот.

Кроме того, в клетках пропионовокислых бактерий присутствуют пептидазы — ферменты, благодаря которым микроорганизмы обеспечивают себя незаменимыми аминокислотами и осуществляют реакции переаминирования. Данная особенность позволяет им расти на любой из 20 аминокислот, если она введена в питательную среду как единственный азотистый субстрат.

Дрожжи. Дрожжевые клетки богаты белками и другими питательными веществами (табл. 2.1). К наиболее популярным видам дрожжей, используемых для получения белков, относятся *Torulopsis*, *Hansenula*, *Pichia* и *Saccharomyces*, *Yarrowia*, *Candida*, *Rhodotorula*, *Rhodospiridium*, *Cryptococcus*, *Trichosporon* и *Lipomyces*.

Таблица 2.1

Питательные вещества в дрожжевой клетке

Наименование вещества	Единица измерения	Значение
Протеин	%	Не менее 43,0
Сырая клетчатка	%	2,0—19,0
Липиды	%	4,5
Минеральные вещества	%	2,0—10,0

Грибы. Различные виды микроскопических грибов, в том числе нитевидные виды грибов, используются в качестве источника белка. В конце 1900-х годов было отмечено, что нитевидные грибы и *актиномицеты* способны производить белок из различных субстратов. Для культивирования плесневых грибов часто используют глюкозосодержащие питательные среды. В такой питательной среде активно развивается мицелий, содержание белка (микопroteина) в котором может достигать до 44 %.

Во время Второй мировой войны предпринимались попытки использовать *Fusarium* и *Rhizopus*, выращенные в ферментерах, в качестве источника богатой белком пищи. В настоящее время для производства белка используют такие штаммы, как *Fusarium graminearum*, *Agaricus bisporus*, *Aspergillus oryzae*, *Rhizopus arrhizus*, *Chaetomium cellulolyticum*, *Aspergillus niger*, *A. fumigates*, *Penicillium cyclopium*, *Cephalosporium cichorniae*, *Rhizopus chinensis*, *Trichoderma viride*, *Scytalidium acidophilum* и *Trichoderma alba*, *Paecilomyces variotii*. Данные штаммы не являются токсичными. В результате роста образуется большое количество грибной биомассы, которая обладает волокнистой структурой, напоминающей мышечную ткань животных, что позволяет рассматривать ее в качестве заменителя мяса. Более того, по содержанию белка, минералов, витаминов и липидов микопотеин превосходит животные белки. Среди достоинств грибной белковой массы следует выделить высокую усвояемость в пищеварительном тракте животных и низкий уровень нуклеиновых кислот. Благодаря этим свойствам грибной белок может заменять до 50 % растительного белка в комбикормах.

В последнее время технология получения микробного белка с использованием видов грибов применяется для переработки лигноцеллюлозных отходов.

Микроскопические водоросли. Микроводоросли могут накапливать белок в два раза больше в процессе своей жизнедеятельности, чем традиционные источники белка. Использование цельной биомассы микроводорослей в качестве источника белка в продуктах питания и кормах является простым и хорошо отработанным методом. В свою очередь, производство белковых добавок и изолятов из микроводорослей требует разработки осуществимых и надежных процессов, способных фракционировать биомассу микроводорослей на различные продукты с добавленной стоимостью. Поскольку большая часть белков находится внутри клеток микроводорослей, было предложено несколько методов разрушения для повышения эффективности их извлечения. После разрушения клеток микроводорослей белки могут быть извлечены, концентрированы, выделены или очищены, что позволяет разрабатывать различные продукты. Однако пока методы получения белка из микроводорослей еще не

разработаны. Поэтому по техническим и экономическим причинам обычно не предполагается выделение и использование только белка, а делается акцент на размножении всей биомассы водорослей.

Производство биомассы микроводорослей долгое время считалось перспективным способом восполнения прогнозируемого «белкового дефицита». Содержание белка и аминокислотный профиль микроводорослей сильно зависят от вида микроводоросли, а также от условий культивирования. Содержание белка в микроводорослях (28—62 %), как правило, выше, чем в сухом обезжиренном молоке (36 %), соевой муке (37 %), курице (24 %), рыбе (24 %) и арахисе (26 %). Что касается питательной ценности, то аминокислотный профиль нескольких видов микроводорослей соответствует эталонному профилю сбалансированного белка, как определено ВОЗ / FAO (табл. 2.2). В частности, выделяются *Arthrospira (Spirulina)*, *Dunaliella* и *Galdieria*, причем *Galdieria*, выращенная в фототрофных условиях, демонстрирует относительно высокую долю незаменимых серосодержащих аминокислот.

Несмотря на высокое содержание белка и благоприятный аминокислотный состав, прямое использование биомассы микроводорослей в качестве одноклеточного белка ограничено ее усвояемостью. Усвояемость цианобактерий, таких как *Arthrospira (Spirulina)*, оказывается выше, чем у зеленых водорослей, таких как *Chlorella*, которые обладают жесткой целлюлозной клеточной стенкой. По аналогичной причине виды *Dunaliella* считаются более выгодными в качестве белкового сырья, поскольку у них полностью отсутствует клеточная стенка.

Несмотря на высокое содержание питательного белка, сушеные микроводоросли пока не получили широкого распространения в качестве пищевых продуктов или заменителей пищи. Основными препятствиями являются порошкообразная консистенция высушенной биомассы, ее темно-зеленый цвет и слегка рыбный запах, что ограничивает использование водорослей в традиционных пищевых продуктах. Однако многочисленные исследования в области питания и токсикологии продемонстрировали пригодность биомассы водорослей в качестве ценной кормовой добавки.

**Аминокислотный профиль различных водорослей в сравнении
с традиционными источниками белка и эталонным образцом ВОЗ / ФАО (1973) (г/100 г)**

Источник	Ile	Leu	Val	Lys	Phe	Tyr	Met	Cys	Try	Thr	Ala	Arg	Asp	Glu	Gly	His	Pro	Ser
ВОЗ	4,0	7,0	5,0	5,5	6,0	4,2	3,2	3,5	1,0	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Яйцо	6,6	8,8	7,2	5,3	5,8	4,2	3,2	2,3	1,7	5,0	—	6,2	11,0	12,6	4,2	2,4	4,2	6,9
Соя	5,3	7,7	5,3	6,4	5,0	3,7	1,3	1,9	1,4	4,0	5,0	7,4	1,3	19,0	4,5	2,6	5,3	5,8
<i>Chlorella vulgaris</i>	3,8	8,8	5,5	8,4	5,0	3,4	2,2	1,4	2,1	4,8	7,9	6,4	9,0	11,6	5,8	2,0	4,8	4,1
<i>Dunaliella bardawil</i>	4,2	11,0	5,8	7,0	5,8	3,7	2,3	1,2	0,7	5,4	7,3	7,3	10,4	12,7	5,5	1,8	3,3	4,6
<i>Scenedesmus obliquus</i>	3,6	7,3	6,0	5,6	4,8	3,2	1,5	0,6	0,3	5,1	9,0	7,1	8,4	10,7	7,1	2,1	3,9	3,8
<i>Arthrospira maxima</i>	6,0	8,0	6,5	4,6	4,9	3,9	1,4	0,4	1,4	4,6	6,8	6,5	8,6	12,6	4,8	1,8	3,9	4,2
<i>Spirulina platensis</i>	6,7	9,8	7,1	4,8	5,3	5,3	2,5	0,9	0,3	6,2	9,5	7,3	11,8	10,3	5,7	2,2	4,2	5,1
<i>Aphanizomenon</i> sp.	2,9	5,2	3,2	3,5	2,5	—	0,7	0,2	0,7	3,3	4,7	7,8	4,7	7,8	2,9	0,9	2,9	2,9

2.2. Технологическая схема производства белка из микроорганизмов

Технология получения белка из микроводорослей

Микроводоросли — это фотоавтотрофные микроорганизмы, и наиболее очевидная стратегия их культивирования основана на энергии солнечного света и углекислого газа (CO_2). Производство одноклеточного белка для пищевых и кормовых целей требует контролируемых условий культивирования и так называемой надлежащей производственной и сельскохозяйственной практики для обеспечения безопасности продукта.

Для культивирования микроводорослей в основном используются системы производства в виде закрытых трубчатых фотобиореакторов и так называемых проточных прудов. Проточные пруды могут размещаться в теплицах для обеспечения лучшего сдерживания и контроля продукции. Трубчатые фотобиореакторные установки (рис. 2.2) могут быть построены в масштабах примерно 1000 м^2 , а дальнейшее масштабирование осуществляется путем умножения установок.



Рис. 2.2. Проточные трубные биореакторы для культивирования микроводорослей [12]

Солнечный свет является ключевым фактором роста микроводорослей, и скорость подачи света напрямую определяет продуктивность фотобиореактора или проточного пруда. Среднегодовые показатели освещенности варьируются от 20 моль фотонов ФАР¹ м⁻² сут⁻¹ в Северо-Западной Европе до 40 моль фотонов ФАР м⁻² сут⁻¹ на Аравийском полуострове. Эти значения можно преобразовать в продуктивность биомассы на основе выхода биомассы на фотоны ФАР (то есть фотосинтетической эффективности). В условиях открытого воздуха эта эффективность, как сообщается, варьируется от 0,2 до 1,0 г сухого вещества на моль фотонов ФАР в зависимости от конструкции системы, условий выращивания и вида водорослей. Предполагая содержание белка 50 % масс./масс., можно производить 22—44 т одноклеточного белка на гектар. Этот простой расчет иллюстрирует большой потенциал одноклеточного белка микроводорослей по сравнению с соей, урожайность которой составляет приблизительно 1,2 т белка на гектар.

Несмотря на высокий потенциальный выход белка из культур водорослей, крупномасштабное их применение в настоящее время ограничено затратами. Инвестиции в материалы и оборудование значительны, как и затраты на электроэнергию, необходимую для перемешивания культур, подачи углекислого газа и удаления фотосинтетически произведенного кислорода.

Подача углекислого газа — еще один субстрат, представляющий собой фундаментальную проблему. Для продуктивного культивирования микроводорослей необходимо поддерживать высокий уровень растворенного CO₂, и в то же время необходимо минимизировать относительные потери CO₂ через отходящие газы. Этого можно достичь только с помощью использования газовых потоков, богатых CO₂, и оптимизированной конструкции газожидкостного переноса в системах культивирования микроводорослей.

¹ ФАР обозначает излучение фотосинтетической активности и представляет собой ту часть светового спектра (400—700 нм), которая может быть использована в оксигенном фотосинтезе. ФАР выражается в виде потока фотонов.

Еще один аспект, который часто приводит к высоким затратам на производство биомассы микроводорослей, связан со сбором клеток. Из-за малого размера клеток (2—10 мкм) и разбавленной природы культур микроводорослей (0,25—5,00 г/л) сбор клеток и последующее обезвоживание являются энерго- и капиталоемкими этапами обработки.

Технологическая схема производства кормовых дрожжей как источника белка

Производственный цикл получения белковых кормовых дрожжей включает несколько последовательных этапов: подготовку питательной среды, культивирование дрожжевой биомассы, ее сгущение, концентрирование и окончательную сушку (рис. 2.3).



Рис. 2.3. Процессуальная схема получения белковых кормовых дрожжей

Культивирование микроорганизмов проводится в аэробных условиях глубинным методом с использованием биореакторов (ферментеров) непрерывного действия. Рабочий объем таких аппаратов может достигать от 320 до 1700 м³. В процессе куль-

тивирования в среду, содержащую размножающиеся микроорганизмы (дрожжи), непрерывно поступают водный раствор минеральных компонентов и выбранный органический субстрат (в зависимости от конкретной технологии). На протяжении всего цикла культуральная жидкость подвергается постоянному перемешиванию, насыщению кислородом и отводу избыточного тепла (охлаждению).

В процессе культивирования дрожжей количество выделяемого тепла находится в прямой зависимости от объема поглощаемого ими кислорода. На каждый грамм усвоенного кислорода генерируется 142,5 кДж тепловой энергии. При этом масса потребленного кислорода может достигать 80 % от массы образующегося сухого дрожжевого вещества.

Поскольку дрожжевые клетки способны усваивать лишь кислород, находящийся в жидкой среде в мелкодисперсном (растворенном) состоянии, его концентрация должна быть достаточной для обеспечения нормального размножения и прироста биомассы. Для эффективного диспергирования воздуха в питательной среде, ускорения его растворения и увеличения длительности контакта газовых пузырьков с жидкостью используются различные аэрационные системы:

- барботажная — основана на дроблении воздушного потока в момент его ввода в среду. Однако этот метод не дает достаточной степени диспергации и интенсивного перемешивания;

- турбоаэрационная (с механическим распылением) — измельчение крупных пузырьков осуществляется с помощью вращающихся элементов (лопастей, дисков и т. п.);

- эрлифтная;

- вибрационная.

Процесс получения белковых кормовых дрожжей на основе гидролизатов растительных отходов включает следующие этапы (рис. 2.4):

- гидролиз растительного сырья с использованием разбавленной серной кислоты;

- доведение полученного гидролизата до состояния, пригодного для биохимической переработки;

- культивирование дрожжевой биомассы;

- сгущение, упаривание и сушка готового продукта.

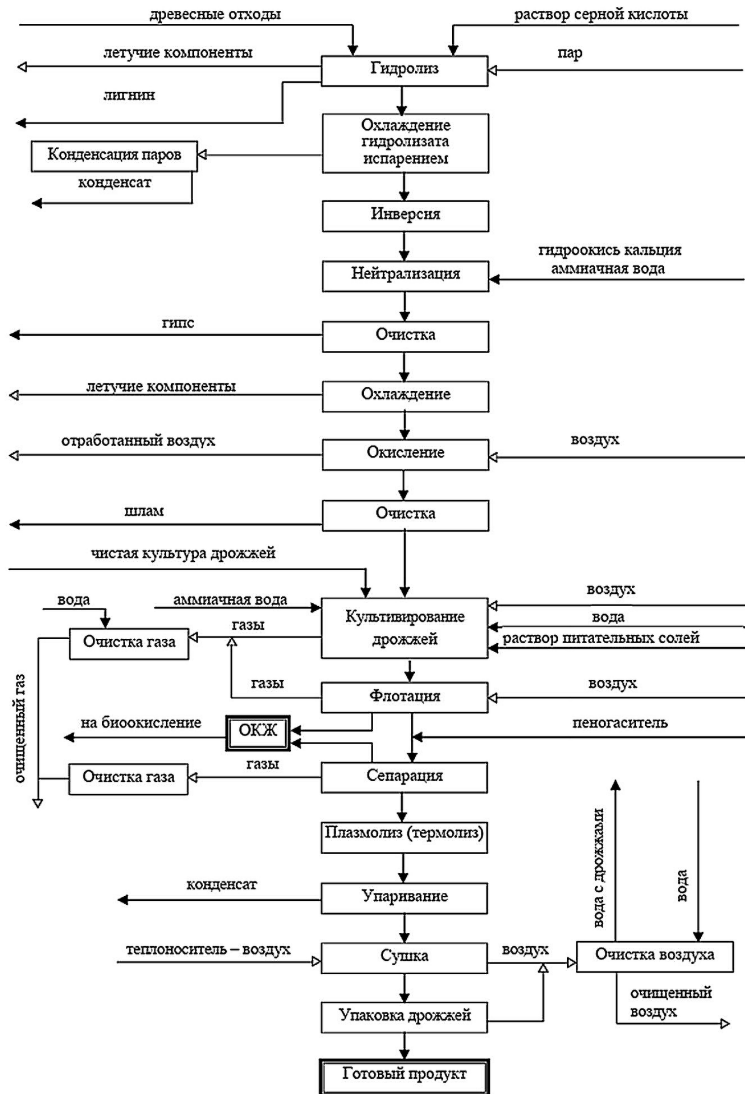


Рис. 2.4. Процессуальная схема получения кормовых дрожжей, обогащенных белком [2]

На сегодняшний день в промышленности для получения кормовых дрожжей используют углеводное сырье. Процесс культивирования кормовых дрожжей ведут в ферментаторах эрлифтной конструкции.

При использовании эрлифтной системы аэрации распределения воздуха давление газового потока не теряется в момент его подачи в биореактор (ферментер). Напротив, оно задействуется для формирования циркуляционных потоков, которые способствуют равномерному распределению кислорода, питательных компонентов и самой дрожжевой культуры по всей высоте и объему биореактора.

Воздух, нагнетаемый в аппарат, должен быть стерильным. Очистка от механических взвесей производится с помощью фильтрующих устройств. После этого воздушный поток подвергается промывке в специальной башне. Альтернативным вариантом служат фильтры с наружным нагревом до 145 °С, содержащие внутри стекловату и активированный уголь.

В процессе культивирования дрожжей на поверхности среды образуется пена. Для ее разрушения применяются химические, механические и гидравлические способы. В аппаратах эрлифтного типа гашение пены происходит естественным путем — за счет ее собственной массы при контакте со стенками биореактора.

Выращенную дрожжевую массу отделяют от водной среды с помощью флотации, сепарирования или (в случае использования мицелиальных грибов) фильтрации. Флотационный метод основан на способности дрожжевых клеток прилипать к поверхности воздушных пузырьков и подниматься вместе с ними в пенный слой при барботировании среды воздухом. После этого отработанная культуральная жидкость (ОКЖ) направляется на стадию биоокисления.

После завершения флотации дрожжевую суспензию направляют на двухступенчатую сепарацию. На первой ступени содержание сухих веществ повышается с 7,5—10,0 до 12,5—15,0 %, что соответствует увеличению концентрации прессованных дрожжей с 300—400 до 500—600 г/л. Разделение фаз в центробежном поле основано на разнице плотности: твердая фракция (дрожжевые клетки) имеет плотность около 1,1 г/см³, тогда как

жидкая — примерно $1,01 \text{ г/см}^3$. На данном этапе потери биомассы составляют 5—7 %. Далее отделенные дрожжи подвергаются термической обработке (плазмолизу) в специальных аппаратах при температуре 80—90 °С, в результате которой клетки отмирают. Полученная однородная масса сметанообразной консистенции направляется на сушку, где ее доводят до остаточной влажности 6—10 %.

Чаще всего применяются распылительные или барабанные сушилки. Распылительный метод имеет существенное преимущество: белок и аминокислоты в меньшей степени подвергаются термической деструкции, а выход белка увеличивается на 5 % по сравнению с вальцовой (барабанной) сушкой. Температура в рабочей зоне распылительных сушилок составляет 90—95 °С, тогда как в барабанных достигает 150—160 °С.

Конечным продуктом является порошок или хлопья, которые при необходимости могут быть подвергнуты гранулированию. Готовую продукцию упаковывают и отгружают на комбикормовые заводы и прочим потребителям.

Согласно ГОСТ 20083-74 «Дрожжи кормовые. Технические условия», в зависимости от содержания белка кормовые дрожжи подразделяются на четыре категории:

- к высшей категории относятся дрожжи, которые содержат 44,0 % белка и выше (55 % и выше в пересчете на абсолютно сухое вещество);

- к первой категории относятся дрожжи, которые содержат белок в количестве 41,0—43,0 % (51—55 % в пересчете на абсолютно сухое вещество);

- ко второй категории относятся дрожжи, которые содержат белок в количестве 36,0—40,0 % (46—50 % в пересчете на абсолютно сухое вещество);

- к третьей категории относятся дрожжи, которые содержат белок в количестве 32,0—35,0 % (43,0—45,0 % в пересчете на абсолютно сухое вещество).

Стоит также отметить, что товарные дрожжи помимо белка содержат до 30 % углеводов, 3—5 % липидов, до 10 % минеральных веществ, а также нуклеиновые кислоты, лигнотаниновые соединения и другие компоненты. По аминокислотному профилю микробный белок близок к животному [2; 4].

Технологическая схема грибного мицелия в качестве источника белка

В настоящее время большинство стран мира производят полноценный белок с помощью мицелий грибов, которые культивируют поверхностным методом. Для получения грибной биомассы, которая содержит до 30 % белка, создают специальные грибоводческие предприятия. На данных предприятиях в качестве питательной среды используют растительные субстраты из отходов агропромышленного комплекса (корнеплоды, несортное зерно, солома, мезга, мякина, кора, опилки и т. д.). Недостатком метода поверхностного культивирования плесневых грибов является повышенная энерго- и трудоемкость, сезонность процесса, продолжительность (более 1 месяца для получения первого урожая). Именно поэтому современная биотехнология использует более инновационный подход выращивания грибного мицелия — глубинное культивирование. Метод глубинного культивирования осуществляют в биореакторах (ферментерах). Полученный данным способом грибной мицелий содержит в своем составе больше белка и веществ, которые обуславливают его терапевтическую активность (витамины группы В). Содержание белка в грибном мицелии, полученном глубинным культивированием, достигает 50 %.

Метод глубинного культивирования грибов впервые апробировал Г. Хумфельд. В 1960-х годах он успешно провел глубинное культивирование шампиньонов. Позже другие ученые применили метод глубинного культивирования для других видов грибов. В результате выявили некоторые условия процесса, которые позволяют ему обеспечить хорошую рентабельность:

- культивируемая биомасса должна содержать не менее 20 % белка;

- синтезируемый белок должен иметь сбалансированный аминокислотный состав (содержать в себе незаменимые аминокислоты);

- грибной мицелий должен показывать высокую удельную скорость роста (10—50 г/л абсолютно сухого вещества (а. с. в.));

— грибной мицелий должен культивироваться на дешевых питательных субстратах, в том числе субстратах, полученных из отходов агропромышленного комплекса.

Среди глубинных мицелиальных культур ксилотрофных базидиомицетов выделяются штаммы, накапливающие не менее 40 % белка. К таким видам относятся шиитаке (*Lentinus edodes*), обыкновенная вешенка (*Pleurotus ostreatus*), серно-желтый трутовик (*Laetiporus sulphureus*), розовая вешенка (*Pleurotus djamor*).

Постоянный мониторинг стерильности при наращивании биомассы критически важен. Попадание в культуру посторонних грибных организмов, особенно несъедобных или токсичных, делает биомассу потенциально опасной при использовании в пищевых или кормовых целях.

Для культивирования мицелиарных грибов используют органические углеродсодержащие субстраты растительного происхождения. Мицелиарные грибы способны перерабатывать (ферментировать) сложные полимерные вещества в более доступные простые сахара. Для культивирования гетеротрофных грибов (мицелиарных грибов) можно использовать растительное сырье, которое содержит пектиновые вещества, крахмал, лигнин, целлюлозу и гемицеллюлозу. Наиболее эффективным источником углерода служит крахмал — благодаря наличию в нем примесей, стимулирующих рост.

В качестве дешевых и технологичных питательных сред могут использоваться разнообразные промышленные отходы: остатки переработки корнеплодов, кукурузы, зерновых и масличных культур; гидролизаты отходов древесины и растительного сырья; сульфитные щелоки; молочная сыворотка.

Процессуальная схема культивирования грибного мицелия с целью накопления большого количества биомассы представлена на рисунке 2.5. Согласно представленной схеме процесс производства включает в себя:

- подготовительный этап;
- стадию получения маточной культуры, или стадию получения посевного материала;
- стадию технологического культивирования.

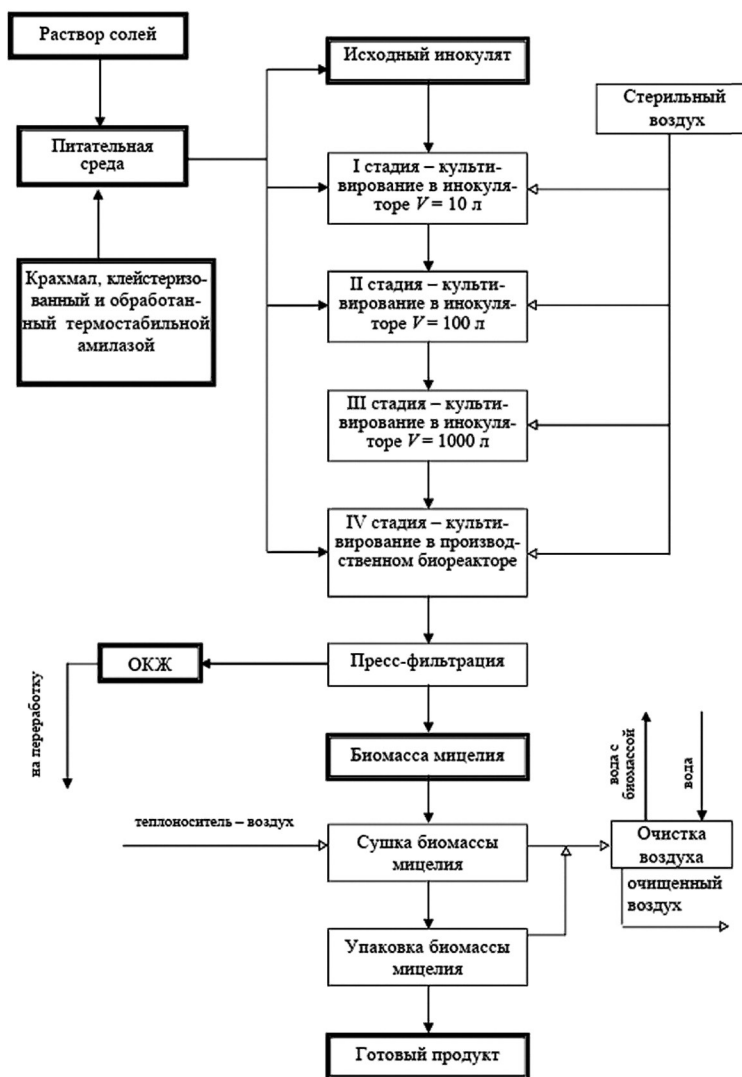


Рис. 2.5. Процессуальная схема культивирования грибного мицелия с целью накопления большого количества биомассы [2]

Подготовительная стадия: составление и стерилизация питательной среды для культивирования грибного мицелия. На этом этапе осуществляют подготовку растворов минеральных солей. Отдельно готовят раствор гидролизуемого крахмала. Для этого его нагревают до температуры 60 °С и выдерживают в течение 20 мин и далее обрабатывают альфа-амилазой.

Далее все приготовленные растворы стерилизуют при избыточном давлении не менее 40 мин.

На стадии получения маточной культуры посевной материал получают методом поверхностного культивирования. Для этого используют чашки Петри с питательной средой на основе суслу или овсяного агара. Полученную таким образом поверхностную культуру в дальнейшем переносят в жидкую среду — выращивание продолжается в колбах на орбитальных шейкерах (качалках) для наращивания биомассы в глубинных условиях.

Затем содержимое колб служит источником инокулята для первого посевного биореактора (инокулятора начальной стадии). В этом аппарате процесс идет при постоянном перемешивании и подаче воздуха на протяжении 72 ч, температура поддерживается на уровне 26—28 °С. На данном этапе концентрация мицелия в инокуляте составляет 1—2 г/л. Процесс культивирования ведут до тех пор, пока биомасса не накопится до 10—12 г/л. Далее инокулят направляют в следующий стерильный посевной ферментер большего объема (вторая ступень культивирования). На второй ступени грибной мицелий культивируется до накопления биомассы 10—12 г/л. После чего грибной мицелий направляют на третью ступень культивирования, в аналогичный биореактор большего размера (1 м³). И только после того как на третьем этапе культивирования грибной мицелий достигнет заданной биомассы (10—12 г/л), его подают уже в производственные биореакторы, объем которых достигает 10 м³.

Этап основного производства предполагает работу в режиме периодического культивирования с периодическим отбором и доливом среды. Используются ферментеры объемом 10 м³, причем заполняется лишь половина рабочего пространства (коэффициент заполнения равен 0,5). Когда плотность мице-

лиальной массы достигает 14 г/л в пересчете на а. с. в., часть культуральной жидкости сливается и отправляется на последующую переработку. Освободившийся объем восполняют свежей питательной средой до исходной отметки 5 м³. При этом начальная концентрация субстрата составляет 30 г/л, а стартовая плотность биомассы — 5 г/л.

Полный технологический цикл занимает около 30 ч, включая операции слива отработанной жидкости и долива свежей среды. За один такой цикл выход абсолютно сухой биомассы достигает примерно 45 кг. Если же пересчитать на готовую продукцию с конечной влажностью около 10 %, то получается порядка 50 кг [1; 2; 4].

2.3. Пищевая ценность белка микробного происхождения

Пищевая ценность белка микробного происхождения зависит от вида культивируемого микроорганизма, а также от субстрата, на котором выращены микроорганизмы. Очень часто в качестве источников кормового белка используют различные виды дрожжей и бактерий, микроскопические грибы, одноклеточные водоросли, белковые коагуляты травянистых растений. Именно поэтому важно рассмотреть вопрос, связанный с пищевой ценностью белка микробного происхождения (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Содержание незаменимых аминокислот в белках некоторых микроорганизмов

Наименование аминокислот	Содержание незаменимых аминокислот в белках некоторых микроорганизмов, г/100 г				
	Дрожжи	Водоросли	Бактерии	Грибы	Актиномицеты
Валин	5,0—7,0	5,0—7,0	4,0—6,0	5,0—7,0	5,5
Лейцин	6,0—9,0	6,0—10,0	5,0—11,0	6,0—9,0	7,7
Изолейцин	4,0—6,0	4,0—7,0	5,0—7,0	3,0—6,0	5,3
Треонин	4,0—6,0	3,0—6,0	4,0—5,0	3,0—6,0	4,0

Окончание табл. 2.3

Наименование аминокислот	Содержание незаменимых аминокислот в белках некоторых микроорганизмов, г/100 г				
	Дрожжи	Водоросли	Бактерии	Грибы	Актиномицеты
Метионин	1,0—3,0	1,5—2,5	2,0—3,0	2,5	1,3
Лизин	6,0—8,0	5,0—10,0	6,0—7,0	3,0—7,0	6,4
Фенилаланин	3,0—5,0	3,0—5,0	3,0—4,0	3,0—6,0	5,0
Триптофан	1,0—1,5	до 2,0	1,5	1,5—2,0	1,4

Также на пищевую ценность белка влияет техника сушки, сбора урожая и обработки. Белок, выделенный из микроорганизмов, обычно дополнительно содержит в небольших количествах белки, жиры, углеводы, воду и другие элементы, такие как калий и фосфор. Биомасса дрожжей и грибов характеризуется высоким содержанием белка и углеводов. Содержание белка в биомассе грибов и дрожжей может достигать 50—55 %. В белке содержится большое количество остатков лизина и меньшее количество остатков метионина и цистеина. Он также обеспечивает хороший баланс аминокислот и содержит большое количество витаминов группы В. Некоторые штаммы дрожжей обладают пробиотическими свойствами, например *Saccharomyces cerevisiae* и *Debaryomyces hansenii*.

Превосходный питательный состав и возможность экономичного массового производства делают микробные белки потенциальным решением продолжающегося продовольственного кризиса. Они также используются в кормах для аквакультуры в качестве замены рыбной муки и для защиты коловраток и *артемии*. Дрожжевые белки произвели революцию в рационах аквакультуры. Некоторые штаммы дрожжей с пробиотическими свойствами, такие как *Debaryomyces hansenii* и *Saccharomyces cerevisiae*, способны повышать выживаемость личинок либо за счет пребывания в кишечнике рыбы, тем самым стимулируя раннее созревание поджелудочной железы, либо за счет иммуностимулирующих глюканов, получаемых из клеточных стенок дрожжей. Идея о том, что белки микроорганизмов могут стать решением проблемы нехватки продовольствия в менее разви-

тых странах, вызывает все больший исследовательский интерес среди ученых. Для обеспечения будущего успеха белков необходимо, во-первых, решить проблемы пищевой технологии, чтобы сделать их сопоставимыми с традиционными продуктами питания, и, во-вторых, чтобы производство соответствовало другим источникам белка.

2.4. Основные ограничения применения белков микробного происхождения

Белки микробного происхождения демонстрируют очень перспективные характеристики в качестве питательного вещества как для человека, так и для животных. Такие белки обладают рядом преимуществ по сравнению с растительными и животными белками благодаря легкости размножения и роста, не зависящего от сезона или климата. Белки микроорганизмов имеют разнообразный аминокислотный состав. Белки можно производить путем культивирования микроорганизмов на питательных средах, содержащих органические отходы, что делает производство экологически чистым. Использование белков в качестве источника питательных веществ может решить проблемы, связанные с нехваткой продовольствия у быстро растущего населения, особенно в развивающихся странах. Однако, несмотря на все эти преимущества, производство белков с помощью микроорганизмов не получило должного внимания — возникают опасения относительно их приемлемости, безопасности и потенциальной токсичности. В частности, высокое содержание нуклеиновых кислот в белках микробного происхождения может представлять проблему, превышающую допустимый уровень в 71 %. Для решения этой проблемы нуклеиновые кислоты можно удалить или уменьшить одним или всеми следующими методами: химической обработкой гидроксидом натрия, обработкой клеток 10 %-ным раствором хлорида натрия, активацией эндогенных нуклеаз на последнем этапе производства биомассы и термическим шоком.

Еще одна проблема — наличие клеточных стенок, которые не перевариваются. Как и в случае с дрожжами и водорослями, могут возникнуть неприятные цвета и вкусы, а живые клетки организмов необходимо уничтожать перед употреблением.

Все эти вредные факторы снижают приемлемость белка микробного происхождения в качестве потенциального продукта питания во всем мире.

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Перечислите основных представителей микроорганизмов, которые являются потенциальными источниками белка.
2. Охарактеризуйте питательные вещества дрожевой клетки.
3. Дайте характеристику химического состава микроводорослей — продуцентов белка.
4. Перечислите и охарактеризуйте основные этапы получения белка с помощью микроорганизмов.
5. Дайте характеристику пищевой ценности белка микробного происхождения.
6. Какие имеются основные ограничения применения белков микробного происхождения?

Тема 3

ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА БЕЛКА ИЗ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

План темы 3

- 1. Виды растительного сырья, используемого для производства белка.*
- 2. Технологическая схема производства белка из растительного сырья.*
- 3. Технология получения соевого белкового изолята / концентрата.*
- 4. Технология получения белкового изолята из подсолнечного шрота.*

3.1. Виды растительного сырья, используемого для производства белка

Традиционно основным источником белка были продукты животного происхождения (мясо, молоко, яйца). Однако их производство энергозатратно и наносит значительный урон экологии. Поэтому в качестве альтернативы рассматривают растительные белки. Они дешевле, более устойчивы экологически и могут обеспечить человечество необходимыми аминокислотами, если правильно скомбинировать источники.

Все растительные источники белка делятся на три большие группы по целевому назначению и морфологии (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Классификация растительных источников белка

Группа	Представитель	Массовая доля белка, %	Основное применение
Зернобобовые	Соя, горох, нут, люпин, чечевица, фасоль, кормовые бобы	20—40 %	Пища человека (изоляты, текстуранты) и концентрированные корма (шроты)
Злаки	Пшеница, кукуруза, рис, ячмень, овес, рожь	7—14 %	Основа рациона человека (хлеб, каши) и кормовая база (дёрть, комбикорма)
Масличные культуры (отходы производства)	Подсолнечник, рапс, соя, хлопчатник, арахис, кунжут	30—50 %	Кормовые шроты и жмыхи, а также растительные белки для пищевой промышленности (жмыхи)
Листовая биомасса	Люцерна, клевер, крапива, ботва свеклы, микроводоросли	15—25 %	Кормовая мука, витаминно-белковые добавки, экспериментальные пищевые концентраты

Ниже более подробно рассмотрим каждую группу с детальным описанием их достоинств, ограничений и сфер использования.

Зернобобовые культуры. На земле произрастает несколько сотен видов бобовых, но лишь некоторые из них имеют экономическое значение в качестве источников белка для производства продуктов питания и кормов. Семейство бобовые (*Fabaceae*) — третье по величине семейство цветковых растений, включающее 751 род и 19500 видов: в частности, крупнозернистые рас-

тения (люпин — *Lupinus polyphyllus*, соя культурная — *Glycine max* (L.) Merr., горох посевной — *Pisum sativum* L., фасоль фаба — *Vicia faba* L., фасоль обыновенная — *Phaseolus vulgaris* L., птичья лапка — *Ornithopus perpusillus* L., лядвенец рогатый — *Lotus corniculatus* L., астрагал — *Astragalus christianus* L., нут — *Cicer arietinum* L., донник лекарственный — *Melilotus officinalis* L.

Бобовые растения бывают однолетними и многолетними. Они также подразделяются на съедобные бобовые, предназначенные для употребления в пищу человеком (горох, фасоль, бобы, нут, коровий горох, чечевица, арахис), и кормовые бобовые — предназначены для кормления животных.

Обилие видов и разнообразие свойств позволяют широко использовать бобовые растения. Семена бобовых используются в основном в питании человека, в сельском хозяйстве (в кормлении животных: шроты из семян в качестве компонентов кормовых смесей; на пастбищах — в качестве зеленого корма; а также при рекультивации деградированных территорий). Потребление бобовых компенсирует нехватку белка из других источников.

Виды бобовых различаются по содержанию и типу пищевых волокон, а также по концентрации крахмала, белка, минеральных веществ и витаминов (табл. 3.2). Кроме того, они содержат биологически активные соединения, ингибиторы ферментов, лектины, фитоэстрогены, олигосахариды, сапонины и фенольные соединения. При попадании в организм с пищей или кормом фитохимические вещества, содержащиеся в семенах бобовых, обеспечивают защиту от воспалительных заболеваний, нарушений обмена веществ и ряда других заболеваний. Таким образом, семена бобовых являются хорошим сырьем для производства кормов и продуктов питания, в том числе функциональных.

Таблица 3.2

Состав и питательная ценность отборных семян бобовых культур

Наименование	Белок, г/кг	Липиды, г/кг	Пищевые волокна, г/кг	Натрий, мг/кг	Йод, мг/кг	Витамин А, мг/кг	Витамин Е, мг/кг	Витамин С, мг/кг
Белая фасоль, сухие семена <i>Phaseolus vulgaris</i> L.	214,00	16,0	157,0	190,0	69,0	—	2,0	20,0
Горох, сухие семена <i>Pisum sativum</i> L.	238,0	14,0	150,0	300,0	47,0	200,0	3,0	20,0
Красная чечевица, сухие семена <i>Lens culinaris</i> Medik	254,0	30,0	89,0	20,0	58,0	100,0	2,2	30,0
Соя, сухие семена <i>Glycine max</i> (L.) Merr.	343,0	196,0	157,0	10,0	89,0	20,0	7,8	—
Зеленый горошек, свежие семена <i>Pisum sativum</i> L.	67,0	4,0	60,0	220,0	19,0	680,0	3,9	342,0
Фасоль Фаба, свежие семена <i>Vicia faba</i> L.	71,0	4,0	58,0	70,0	19,0	280,0	4,6	320,0

Селекционеры и производители убойных животных все чаще обращаются к отечественным источникам белка, таким как сладкий люпин, горох или полевая фасоль. Селекционные достижения в области растениеводства позволяют использовать семена желтого и синего люпина, гороха, фасоли, рапса (в виде жмыха или шрота) и сои для кормления животных. Однако семена гороха, люпина и фасоли полевой содержат антипитательные вещества, что ограничивает их применение в кормлении животных. Несмотря на то что эти вещества могут ограничивать использование пищевых ингредиентов и даже негативно влиять на здоровье животных, они все еще используются в кормлении животных, но в меньших количествах. Антипитательные вещества, содержащиеся в семенах бобовых, включают фитаты, дубильные вещества, ингибиторы протеолитических ферментов и алкалоиды. Использование семян бобовых для производства кормов может быть улучшено с помощью различных технологических обработок, таких как шелушение, экструзия, обжаривание, микронизация, а также замачивание или ферментация.

Злаковые культуры. Злаки являются важнейшей продовольственной культурой в мире (пшеница, рожь, кукуруза, сорго, ячмень, перловка, овес). Следует подчеркнуть, что более 80 % производимых в стране зерновых культур, особенно пшеницы, сорго и перловой крупы, потребляются в качестве основных продуктов питания в виде чапати, каши и т. д. Небольшая часть (менее 10 %) производимых злаков употребляется в виде экструдированных продуктов и выпечки. В последние годы также стали популярны ферментированные продукты и продукты, обогащенные бобовыми.

Белки кукурузы, риса и пшеницы — наиболее популярный источник энергии. Поскольку мировой спрос на продовольствие постоянно растет, белки злаков и псевдозлаков привлекают все больше внимания. Белки злаков в основном хранятся в эндосперме, самой крупной части семени, и традиционно классифицируются на альбумин, глобулин, проламин и глютелин. В среднем белки злаков распределяются следующим образом: 5—15 % альбуминов, 3—10 % глобулинов, 25—45 % проламинов и 30—40 % глютелинов. Содержание той или иной белковой фракции зависит от культуры и источника их происхождения. В рисе и овсе содержание проламинов ниже, чем в других культурах.

Содержание белка сильно варьируется между зерновыми культурами и в пределах одного вида (табл. 3.3). Были выведены высокопротеиновые инбредные линии сорго, ячменя и перлового проса, однако они дают значительно более низкие урожаи зерна. Также следует отметить, что качество белка в злаках ухудшается из-за их аминокислотного состава, поскольку в них недостаточно лизина, триптофана и треонина. Поскольку белки злаковых богаты сернистыми аминокислотами, метонином и цистином, они очень хорошо сочетаются с богатыми лизином и дефицитными сернистыми аминокислотами белками бобовых. Из-за недостатка некоторых незаменимых аминокислот белки злаковых культур плохо усваиваются в чистом виде и с низким коэффициентом полезного действия белка. Среди зерновых белки риса и овса обладают лучшей утилизационной ценностью и считаются белками хорошего качества. Как показано в таблице 3.3, усвояемость белков пшеницы самая высокая. Это связано с тем, что пшеничная клейковина обладает самой высокой усвояемостью белка, за ней следует гордеиновая фракция ячменя. Усвояемость белка кукурузы и риса сопоставима, но значительно снижается в результате переработки.

Таблица 3.3

**Вариабельность содержания белка (г/100 г)
и усвояемость в зернах злаковых культур**

Наименование злака	Ботаническое название	Диапазон значений	Усвояемость, %
Пшеница	<i>Triticum aestivum</i>	5,6—21,0	82,7
Рис	<i>Oryza sativa</i>	5,4—13,6	77,5
Кукуруза	<i>Zea mays</i>	8,0—18,2	70,6
Ячмень	<i>Hordeum vulgare</i>	6,3—13,5	75,4
Сорго	<i>Sorghum vulgare</i>	7,5—14,2	68,4
Перловое просо	<i>Pennisetum typhoidum</i>	5,5—14,6	70,5
Овсянка	<i>Avena byzantina</i>	10,7—16,4	78,5
Животные белки	—	—	96,0

Масличные культуры (отходы производства). В мире выращивается более 200 видов масличных растений. Наиболее важными в пищевой промышленности являются соя, рапс, подсолнечник, кокос, олива и арахис. Семена льна, хлопка и кунжута используются в меньшей степени. В последние годы возросла значимость других, менее популярных масличных семян, таких как чиа, примула вечерняя, конопля, нигелла, расторопша и тыква. Из перечисленных культур получают растительные масла пищевого и косметического назначения. При холодном отжиме масла из семян образуется жмых — побочный продукт, богатый белком и клетчаткой. Если перед отжимом масла семена обжаривают, а затем масло извлекают из семян органическими растворителями, то конечный продукт называется шротом. Жмых и шрот используют в качестве компонентов корма для сельскохозяйственных животных, а также как ингредиент для получения пищевого и кормового белка.

В таблице 3.4 представлено сравнение типичного состава незаменимых аминокислот в отдельных масличных культурах со стандартным белком ВОЗ / ФАО / УНУ (2007), соей, куриным мясом, свининой и говядиной. Содержание белка в семенах чиа составляет 18,18 г/100 г, а наличие как экзогенных, так и эндогенных аминокислот позволяет использовать семена чиа в качестве дополнительного источника белка. Основными белковыми фракциями, извлеченными из муки семян чиа, являются глобулины и альбумины (52 и 17,3 % соответственно), тогда как глютелины и проламины составляют минорные фракции 14,5 и 12,7 %.

Таблица 3.4

**Типичный состав незаменимых аминокислот
масличных культур, сои и сырого мяса, г/100 г**

Показатель	Ile	Leu	Lys	Met	Cys	Phe	Tyr	Thr	Trp	Val
Семена сои	1,97	3,47	2,37	0,59	0,80	2,25	1,35	1,63	0,57	1,94
Семена чиа	0,73	1,35	0,98	0,80	0,53	1,10	0,58	0,76	0,79	0,93
Высушенная ко- ксовая мякоть	0,22	0,43	0,31	0,12	0,11	0,29	0,16	0,22	0,06	0,35

Окончание табл. 3.4

Семена льна (коричневые)	0,87	1,18	0,75	0,32	0,32	0,95	0,53	0,72	0,30	1,07
Семена конопли	1,29	2,16	1,28	0,93	0,67	1,45	1,26	1,27	0,37	1,78
Мыка обезжиренная расторопши пятнистой	5,41	9,84	7,38	2,46	2,16	6,10	5,41	5,12	—	7,97
Семена тыквы	1,29	2,49	1,36	0,73	0,39	1,81	1,19	1,04	0,61	1,71
Рапсовый жмых	1,25	2,51	2,04	0,47	0,59	1,44	0,99	1,59	0,43	1,55
Семена подсолнечника	0,92	1,40	0,86	0,53	0,38	1,05	0,57	0,81	0,35	1,11
Говядина (сырая, постная, 3 % жира)	0,97	1,71	1,82	0,57	0,23	0,86	0,68	0,85	0,11	1,08
Свинина (сырая, постная, 4 % жира)	0,96	1,68	1,81	0,56	0,24	0,90	0,89	0,89	0,27	1,06
Курица (сырая грудка, без кожи)	1,10	1,86	2,16	0,58	0,24	0,91	0,81	1,01	0,28	1,16

Белки обезжиренной кокосовой муки состоят в основном из глобулиновой и альбуминовой фракций, составляющих 40 и 21 % от общего количества белка соответственно. Глобулиновая фракция состоит из одного основного полипептида с молекулярной массой 53 кДа и пяти менее распространенных субъединиц (молекулярная масса 34, 27, 25, 22 и 20 кДа). В альбуминовой фракции наблюдаются два основных полипептида (25 и 18 кДа). Кислоторастворимая фракция глютелина-1 составляет 14,4 %. Основные растворимые фракции глютелина-2 и проламина составляют менее 5 % от общего количества белка (4,8 и 3,3 % соответственно).

Обыкновенный лен (*Linum usitatissimum* L.) — растение, выращиваемое более чем в 50 странах. Полезный для здоровья эффект от употребления льняного семени обусловлен высоким содержанием белка, незаменимых ненасыщенных жирных кислот, прежде всего α -линоленовой кислоты, антиоксидантов,

микроэлементов и лигнанов. К основным запасным белкам, содержащимся в различных видах льна, относится фракция высокомолекулярного глобулина линина (252—298 кДа), состоящая из пяти глобулярных полипептидных субъединиц 11—12S с молекулярной массой 14,4, 24,6, 30,0, 35,3 и 50,9 кДа. Низкомолекулярная фракция представляет собой конлинин, хорошо растворимый в воде белок со структурой типа 2S альбумина и молекулярной массой 16—17 кДа. На долю линина и конлинина приходится 64—66 % и около 42 % соответственно всех белков льняного семени. Было обнаружено, что некоторые пептиды, выделенные из семян льна, обладают биологической активностью.

Конопля (*Cannabis sativa* L.) — однолетнее травянистое растение, которое выращивают уже тысячи лет и используют в качестве источника волокна, лекарств и продуктов питания. В настоящее время в большинстве стран мира легально выращивают в промышленных целях сорта конопли с низким содержанием наркотических веществ, содержащие до 0,3 % дельта-9-тетрагидроканнабинола (ТГК) — основного психоактивного вещества каннабиса. Отмечено, что конопля содержит в себе липиды, углеводы, белки, полиненасыщенные жирные кислоты, минеральные элементы (магний, марганец, железо и медь). Общий белок конопли состоит в основном из одного глобулярного запасного белка, эдестина (приблизительно 65 %), а низкомолекулярная (ниже 20 кДа) фракция альбумина составляет 25 % запасных белков. Эдестин представляет собой гексамер, состоящий из трех кислых и трех основных субъединиц с молекулярной массой 34 и 20 кДа соответственно.

Тыква (*Cucurbita* sp.) широко культивируется на всех континентах. Семена отличаются высокой биологической и питательной ценностью благодаря высокому содержанию масла и ценного белка. Белки семян тыквы становятся востребованным ингредиентом в пищевых продуктах благодаря своему биоактивному потенциалу. Однако их все более частое добавление в пищу может стать причиной увеличения числа пищевых аллергий в будущем.

Рапс (*Brassica napus* L.) — одно из важнейших масличных растений в мире. Благодаря питательной ценности рапсового

масла, а именно содержанию ненасыщенных жирных кислот, омега-3 и омега-6 кислот и жирорастворимых витаминов, а также отсутствию холестерина, диетологи рекомендуют его регулярное употребление. Рапс является не только отличным источником ненасыщенных жирных кислот, но и белка.

Белки рапса уже много лет используются в производстве функциональных продуктов питания, включая хлебобулочные изделия, напитки, заменители молочных продуктов и яиц, переработанные мясные продукты, заправки для салатов, соусы и ароматизаторы. Дополнительным аргументом в пользу использования белков рапса в качестве ингредиента или заменителя животных белков в пищевых продуктах является отчет, подтверждающий образование биоактивных пептидов в процессе их переваривания. Многочисленные пептиды, образующиеся из белков рапса, были описаны и идентифицированы как обладающие биоактивной активностью, а именно: ингибирующей активностью в отношении АПФ, антиоксидантной активностью, способностью связывать желчные кислоты, антитромботической активностью и влиянием на рост клеток. Эти пептиды могут оказывать положительное влияние на регуляцию сердечно-сосудистой и иммунной систем.

Подсолнечник (*Helianthus annuus* L.) — одно из четырех основных масличных растений, выращиваемых во всем мире. Семена подсолнечника в основном употребляются в необработанном виде в салатах и закусках, а также в переработанном — в виде масла. Белок, извлекаемый из семян подсолнечника, является ценным макронутриентом, который в последнее время привлекает все больше внимания. Основные запасные белки составляют около 85 % от общего содержания белка и характеризуются высоким содержанием двух белковых фракций: 11S-гелиантинина и 2S-альбумина. 11S-гелиантинин относится к семейству глобулинов, подобных легуминам. Глобулины, составляющие большую часть белков подсолнечника, присутствуют в диапазоне примерно 40—90 %, тогда как альбумин составляет около 10—30 % всех белков. Глютелины, особенно проламины, присутствуют в небольших количествах.

Соя как зернобобовая культура является наиболее значимой масличной культурой, производимой в мире, при этом товар-

ная соя (*Glycine max* (L.) Merr.) представляет собой наиболее важную масличную культуру с мировым производством, за ней следуют рапс и подсолнечник. Содержание масла в сое ниже, чем в других масличных культурах (15,5—24,7 % от сухой массы), в то время как содержание белка в ней выше (32—43,6 % от сухой массы). Сою выращивают в основном для удовлетворения потребностей животных в белке, и соевый шрот / жмых в настоящее время является наиболее значимым источником белка в кормах для птицы. Соевые белки представляют собой смесь нескольких белков, классифицированных на четыре категории в зависимости от их коэффициентов седиментации: 2S, 7S, 11S и 15S, которые осаждаются при различных гравитационных силах под воздействием центробежного поля. Более 80 % белков сои составляют 7S (β -конглицинин) и 11S (глицинин), а соотношение 7S/11S варьируется от 0,5 до 1,3 в зависимости от сорта. Нативный глицинин имеет компактную структуру, стабилизированную дисульфидными связями, что приводит к более низким эмульгирующим и пенообразующим свойствам по сравнению с β -конглицинином, который не имеет дисульфидных связей.

Масличные семена и жмых масличных семян — это богатое белком сырье, являющееся ценным источником питательных и биологически активных компонентов. Поэтому в последние годы масличные семена стали все более популярным альтернативным источником белка в пищевой и нутрицевтической промышленности. Их свойства широко пропагандируются диетологами и производителями продуктов питания, и поэтому интерес потребителей к этим новым полезным для здоровья ингредиентам быстро растет во всем мире.

3.2. Технологическая схема производства белка из растительного сырья

Производство растительного белка — это сложный многостадийный процесс, целью которого является извлечение белковых фракций из растительной биомассы с максимальной

степенью чистоты и сохранением нативных свойств. Для извлечения белка из растительного сырья используются разные методы (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Методы извлечения белка из растительного сырья

Наименование метода	Продукт	Применение
Сухой помол и воздушная сепарация	Белковая мука (40—60 % белка)	Заменитель муки в хлебобулочных изделиях
Водно-солевая экстракция	Изоляты (85—90 % белка)	В технологии производства мясозаменителей, специализированных продуктов питания, спортивного питания
Ферментативный гидролиз	Белковые гидролизаты	В технологии производства лечебного энтерального питания, ароматизаторов
Экструзия (термомеханическая обработка)	Текстурированный белок	В технологии производства «растительного мяса»

В зависимости от типа сырья (зернобобовые, масличные, листовая биомасса, грибной мицелий) и требуемой степени очистки (мука, концентрат, изолят) технологические схемы могут существенно различаться. Однако можно выделить универсальную последовательность этапов, характерную для большинства промышленных и лабораторных методов.

Процесс получения белкового продукта из растительного сырья (рис. 3.1) включает такие этапы, как подготовка сырья к экстракции, экстракция белка, очистка экстракта, осаждение белка, сепарация, сушка, фасовка. Каждый из этих этапов может быть реализован различными методами в зависимости от свойств сырья и требований к конечному продукту.

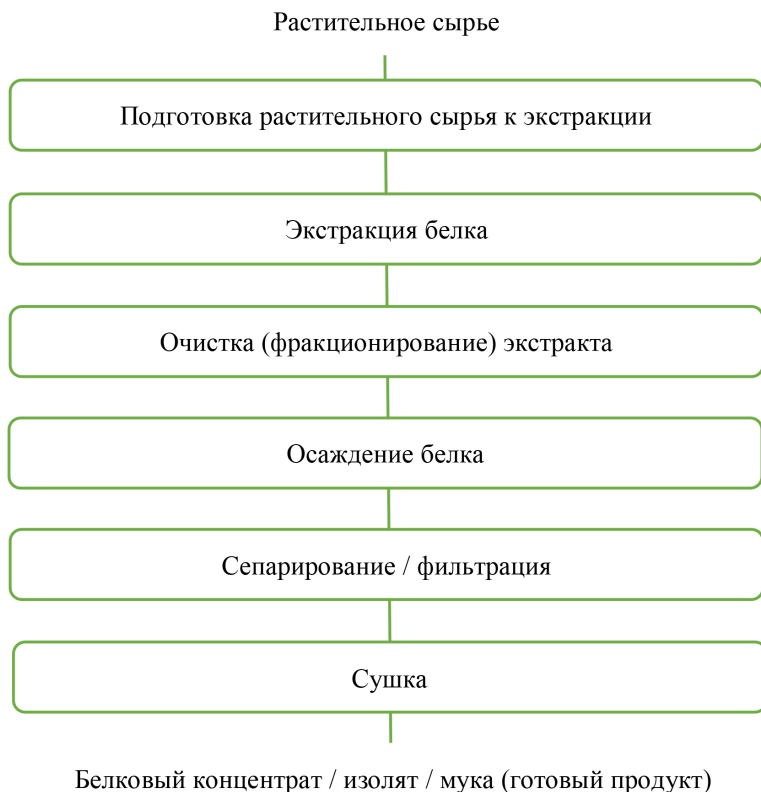


Рис. 3.1. Обобщенная процессуальная схема получения белка из растительного сырья

Стадия подготовки сырья включает в себя процессы, направленные на очистку и сортировку растительного сырья, измельчения растительного сырья, обезжиривания, удаления небелковых компонентов и разрушение клеточных структур. Данная стадия необходима для облегчения последующего извлечения белка.

На стадии очистки и сортировки проходит удаление механических примесей (камни, песок, металломагнитные примеси),

отделение испорченных зерен (пораженных плесенью, с повышенным содержанием микотоксинов), калибровка по размеру для равномерной обработки. Далее растительное сырье поступает на измельчение. Степень измельчения критически важна для эффективности экстракции. Оптимальный размер частиц обычно составляет 50—200 мкм. Слишком крупный помол снижает выход белка, слишком мелкий — затрудняет последующее разделение фаз.

При переработке семян с высоким содержанием жира (соя, подсолнечник, рапс, лен) включают также стадию обезжиривания (предварительное удаление липидов). Для этого используют либо метод прессования, либо экстракции. Также для некоторых видов сырья, например льняного жмыха, требуется предварительное удаление слизистых веществ, которые могут затруднять экстракцию белка.

Следующая ключевая стадия — *экстракция белка*. На данной стадии белок переводится в растворимую форму и отделяется от нерастворимых компонентов (клетчатка, крахмал, лигнин). Различают несколько видов экстракции (водная, ферментативная, солевая экстракции и ультразвуковая обработка). Наиболее простым и экологичным методом является водная экстракция. Для реализации метода водной экстракции растительное сырье смешивают с водой при определенном гидромодуле (соотношение сырье:вода), обычно 1:8—1:10. Процесс водной экстракции, как правило, протекает при температуре 25—50 °С (более высокие температуры могут денатурировать белок), pH 7,5—9,0 (при данном значении pH растворимость белка максимальна), продолжительности 30—120 мин.

Метод солевой экстракции основан на использовании способности белков растворяться в растворах нейтральных солей. В патенте РФ № 2138172 описан ступенчатый метод с использованием растворов сульфата аммония возрастающей концентрации (0,5 % → 2,5 % → 5,0 %) при низкой температуре (0—5 °С). Преимущество метода — мягкие условия, сохраняющие нативную структуру белка. Прогрессивным методом, позволяющим повысить выход белка и улучшить его функциональные свойства является метод ферментативного гидролиза. Ферментативная экстракция считается экологически

чистой технологией, поскольку предлагает возможности «зеленой химии» для пищевой промышленности, стремящейся к более чистым технологическим процессам. Она обеспечивает более высокую скорость экстракции, более высокий выход, меньшее использование растворителей и меньшее энергопотребление, чем неферментативные методы, и поэтому представляет собой потенциальную альтернативу традиционным методам экстракции с использованием растворителей. Для реализации данного метода используют амилазу, целлюлазу и протеазу (табл. 3.6).

Таблица 3.6

**Характеристика ферментативного гидролиза
(метода экстракции белка)**

Тип фермента	Целевой субстрат	Результат
Амилазы	Крахмал	Снижение вязкости, высвобождение белка
Целлюлазы	Клетчатка	Разрушение клеточных стенок
Протеазы	Белок	Частичный гидролиз (улучшение растворимости и усвояемости)

Современным методом интенсификации экстракции является метод ультразвуковой обработки. Ультразвук вызывает кавитацию, разрушающую клеточные стенки и ускоряющую массообмен. Технология позволяет избежать нагрева сырья и разрушения ценных компонентов.

Полученный после экстракции раствор представляет собой сложную смесь белков, углеводов, минеральных веществ и пигментов. Для выделения целевого белка необходимо удалить балластные компоненты, поэтому в технологическую схему включена *стадия очистки (фракционирования) экстракта*. Разделение экстракта на фракции можно проводить методом центрифугирования (низко- и высокоскоростное центрифугирование), мембранными методами, термокоагуляцией.

Высокоскоростное центрифугирование ($1000\text{—}3000\times g$) применяется для удаления грубых частиц и нерастворимого осадка из экстракта, а высокоскоростное центрифугирование ($6000\text{—}10000\times g$) позволяет отделить тонкие суспензии.

Среди мембранных методов для фракционирования белкового экстракта активно применяют метод ультрафильтрации и диафильтрации. Главные преимущества ультрафильтрации — это мягкие условия эксплуатации и высокая селективность. Использование щадящего процесса позволяет получить меньше денатурированного белка, чем при традиционном неудовлетворительном осаждении. Ультрафильтрация с использованием мембран позволяет концентрировать белок и отделять его от низкомолекулярных примесей (сахаров, солей). Селективность мембран подбирается по молекулярной массе (обычно пороги от 10 до 50 кДа).

Диафильтрация представляет собой процесс промывки белкового концентрата буферным раствором для более глубокой очистки. Метод диафильтрации эффективен для удаления олигосахаридов из экстракта.

Для некоторых видов сырья (например, листовая биомасса) используется тепловая обработка: балластные белки денатурируют и выпадают в осадок при нагревании до определенной температуры, в то время как целевой белок остается в растворе.

После очистки необходимо перевести растворенный белок из жидкой фазы в твердый осадок, поэтому следующей стадией в технологии получения белкового продукта является *осаждение белка*. Наиболее распространенный метод осаждения белка — изоэлектрическое осаждение. В изоэлектрической точке (pI) суммарный заряд молекулы белка равен нулю, что минимизирует электростатическое отталкивание и вызывает агрегацию и выпадение в осадок. Для большинства растительных белков pI находится в диапазоне pH 3,0—5,0. Процесс осуществляется добавлением кислоты (чаще всего соляной) или щелочи (для белков, растворимых в кислой среде). Температура поддерживается низкой (4—10 °C) для предотвращения денатурации.

В качестве методов осаждения белков также применяют метод осаждения органическими растворителями и метод осажде-

ния сульфатом аммония. Осаждение сульфатом аммония представляет собой ступенчатое «высаливание» при повышении концентрации соли, что позволяет дополнительно фракционировать белки по молекулярной массе. Метод осаждения органическими растворителями реализуется путем добавления этанола, ацетона или изопропанола. Данные растворители снижают диэлектрическую проницаемость раствора, вызывая осаждение белка. Метод эффективен, но дорог и требует рециркуляции растворителя.

Следующая технологическая *стадия сепарации и промывки* позволяет осажденный белок отделить от жидкой фазы (надосадочной жидкости). Для реализации этого этапа применяют метод центрифугирования, фильтрации и промывки. Центрифугирование проводят с помощью промышленных декантеров и сепараторов, которые позволяют отделять белковый осадок с высокой эффективностью. Для фильтрации применяют нутч-фильтр (вакуумные фильтры периодического действия) и мембранные фильтр-прессы (для более тонкого разделения).

Метод промывки используют для удаления остаточных солей, сахаров и других примесей, белковый осадок ресуспендируют в дистиллированной воде или буферном растворе с последующим повторным центрифугированием. Процесс может повторяться 2—3 раза.

Финальный этап получения стабильного при хранении белкового продукта — *сушка*. Выбор метода сушки критичен для сохранения функциональных свойств белка. Выделяют следующие методы сушки: лиофильная (сублимационная), распылительная, конвективная.

Метод лиофильной сушки является наиболее щадящим методом и применяется для получения высококачественных белковых концентратов, в том числе фасолевого белка с выходом 65,5 % от исходного содержания. Заморозка продукта происходит при низких значениях температуры ($-30 \dots -50$ °C), сублимация льда происходит под вакуумом (минуя жидкую фазу). Достоинство данного метода заключается в максимальном со-

хранении нативной структуры, растворимости, биоактивности. Однако в промышленности применяется ограниченно в связи с высокой стоимостью и низкой производительностью.

В промышленности широко используется метод распылительной сушки: особенно при производстве соевого изолята, горохового белка и других продуктов. Белковый раствор распыляется в камере с потоком горячего воздуха (150—200 °С). Мелкие капли мгновенно высыхают, превращаясь в порошок. Достоинством данного метода является высокая производительность, непрерывность процесса. Однако метод распылительной сушки не позволяет получить продукт с высокой степенью нативности. При реализации метода происходит частичная денатурация белка (допустимое количество).

Более дешевый метод сушки — конвективная сушка, которую применяют для производства кормовых белков (шроты, белковая мука). Требуется контроль температуры, чтобы избежать карамелизации и потери аминокислот.

3.3. Технология получения соевого белкового изолята / концентрата

Соевый белковый изолят / концентрат — продукт чрезвычайно интересный. Применение соевых белков в качестве пищевых добавок широко распространено. В основном их используют в тех производствах продуктов питания, где замена животных белков на растительные экономически очень выгодна.

Технология получения соевого изолята / концентрата относится к области глубокой переработки сои. Классическая схема (рис. 3.2) включает в себя следующие стадии: на первом этапе из сои извлекается масло, которое проходит дальнейшую рафинацию, сырьем для производства изолята / концентрата служит шрот. Исходные требования к шроту достаточно жесткие. Содержание жира в нем должно быть не выше 1 % («белый соевый лепесток»), белка ($N \times 6,25$) — минимум 50 % (по сухим веществам), воды — максимум 10 %, мезги — максимум 4 %, растворимого белка — минимум 80 %.

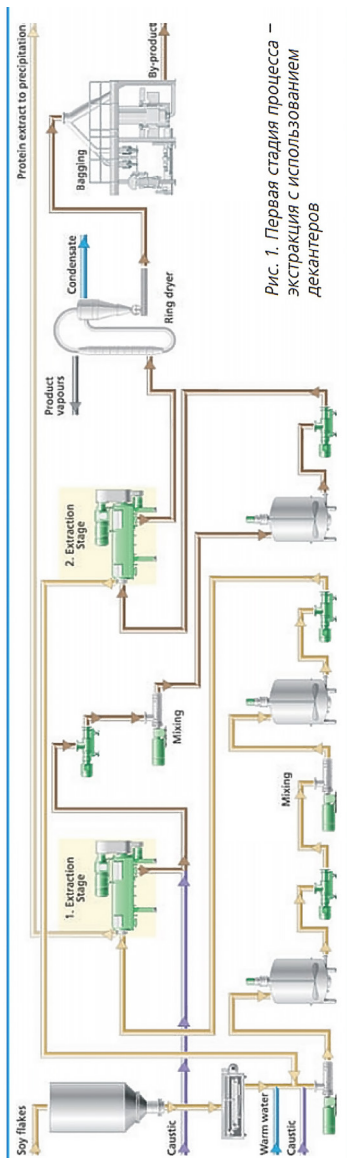


Рис. 1. Первая стадия процесса – экстракция с использованием Декантеров

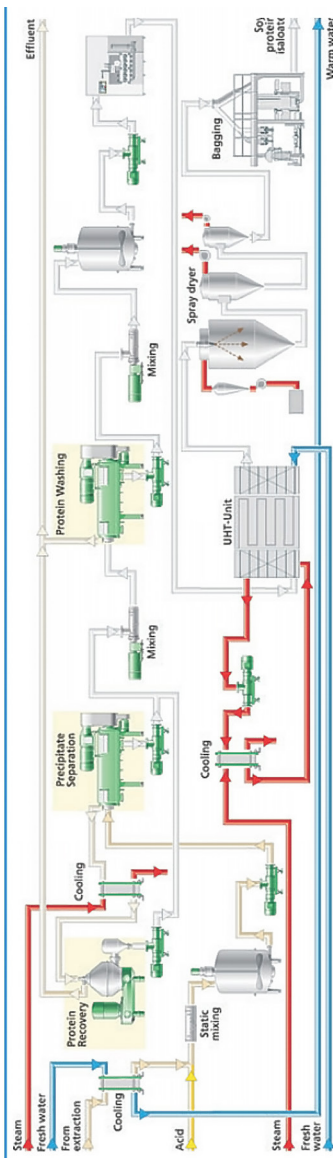


Рис. 3.2. Экстракция белка с целью получения соевого изолята [7]

Обезжиренный соевый лепесток переводится в состояние пульпы, из которой в несколько стадий проводится экстракция белка. Обычно применяют две или три стадии с использованием декантеров. В первой стадии производится отделение жидкой фазы от твердой при непрерывном удалении последней. В связи с тем что в твердой фазе содержание белка остается высоким, необходим второй декантер, который работает по принципу экстракции в противотоке. Твердая фаза после второго декантера содержит связанный и нерастворимый белок, который может быть высушен и использован на корм скоту. Верхний сход второго декантера возвращается в процесс в виде процессной воды на стадию приготовления пульпы, что, с одной стороны, снижает потребление свежей воды, а с другой — сокращает количество сточной воды.

Белок, растворенный в верхнем сходе первого декантера, извлекается и поступает на стадию осаждения. Для осаждения белка проводится корректировка pH с целью достижения изоэлектрической точки, значение pH находится между 4,0 и 5,0.

В процессе осаждения образуются хлопья белка, которые извлекаются с помощью декантеров компании «Вестфалия Сепаратор», специально разработанных для этого процесса.

Оставшийся белок (в верхнем сходе декантера) может быть стабилизирован путем тепловой обработки и позднее извлечен в высокоэффективном сепараторе-осветлителе. Это приводит к увеличению общего выхода белка и одновременно улучшает качество сточных вод. Белок, извлеченный в декантере и сепараторе, подвергается промывке в следующем декантере при соотношении твердое вещество / вода 1:4. Чистый белок после стадии промывки подвергается финальной обработке. Верхним сходом декантера выводятся углеводороды и избыток воды.

Окончательные стадии процесса: гомогенизация, высокотемпературная обработка и сушка в распылительной сушилке, упаковка. Содержание белка в порошке после сушилки составляет более 90 %.

Чем чище получен белок, тем шире сфера его возможного применения. Представленная технология с использованием декантеров и сепаратора-осветлителя позволяет достичь наибольшего выхода белка. Потребление свежей воды, по представ-

ленной схеме, сокращено в связи с рециклом воды в качестве процессной воды. Дополнительный продукт в виде сухого корма для скота безусловно увеличивает экономические показатели всей технологии.

3.4. Технология получения белкового изолята из подсолнечного шрота

Одним из системных решений продовольственных, экологических и энергетических вызовов современности становится вовлечение в хозяйственный оборот вторичного растительного сырья, которое служит доступным источником нативных биомолекул, способных замещать первичные ресурсы в пищевых, кормовых и технических цепочках.

Значительное количество вторичных ресурсов (подсолнечный шрот) образуется в процессе переработки семян подсолнечника.

Подсолнечный шрот обладает тремя важными характеристиками: повышенной концентрацией протеина, экономической доступностью и полным отсутствием токсических или снижающих усвояемость веществ. Его аминокислотная формула оценивается как благоприятная, что служит основанием для разработки методов выделения белка из этого вида растительного сырья.

Процесс извлечения белка из подсолнечного шрота включает стадию экстракции с применением одной из следующих сред — вода, растворы солей, щелочей или кислот, а также органические растворители. Затем целевой компонент осаждают, подкисляя смесь соляной кислотой до достижения изoeлектрической точки. Полученный таким образом белковый препарат содержит в своем составе фенольные вещества, хлорогеновую кислоту и пигменты, которые окрашивают его в темный цвет.

Технологическая схема получения белка из подсолнечного шрота представлена на рисунке 3.3.

Производственный подсолнечный шрот предварительно очищают от крупных частей и посторонних примесей для интенсификации процесса растворения и экстракции. Экстрак-

цию белка из подсолнечного шрота проводят 10 %-ным водным раствором хлористого натрия. Для отделения нерастворимого осадка полученный экстракт отфильтровывают.

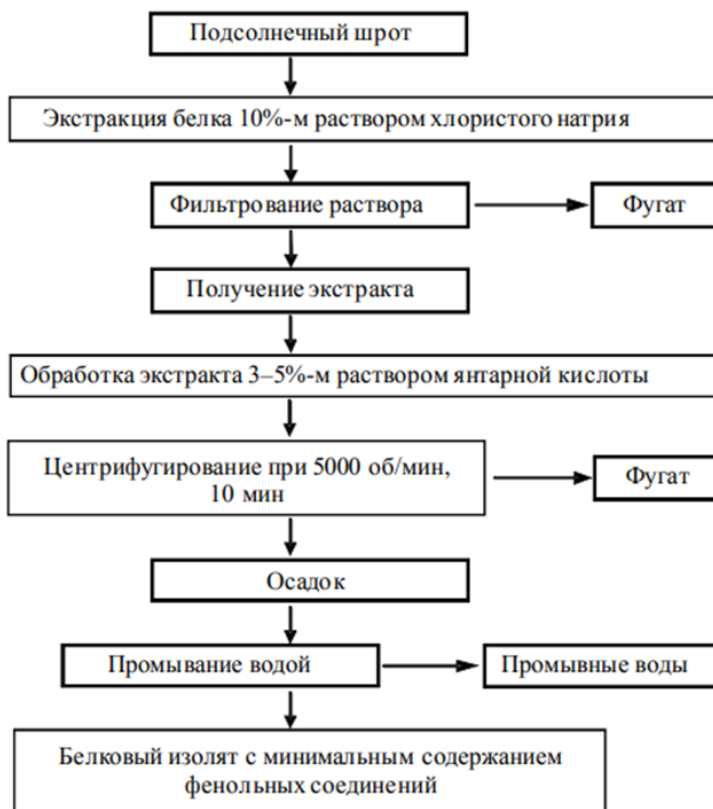


Рис. 3.3. Технологическая схема получения белка из подсолнечного шрота [3]

Для осаждения белка и связывания фенольных соединений экстракт обрабатывают реагентом кислотного типа. Осаждение белка проводят при перемешивании в течение 20—30 мин при 45—55 °С и соотношении весовых частей экстракта и янтарной кислоты 1:(10—12). После осаждения полученный белок отде-

ляют центрифугированием с последующей промывкой водой и сушкой. Полученный по такой технологии белковый концентрат характеризуется удовлетворительными физико-химическими и функциональными свойствами (табл. 3.7).

Таблица 3.7

**Физико-химические и функциональные свойства
белкового концентрата**

Показатель	Единица измерения	Значение
Массовая доля сырого протеина	% на а. с. в.	87,3
Относительная биологическая ценность	%	91,0
Содержание хлорогеновой кислоты	% на а. с. в.	0,022
Массовая доля сырой золы	% на а. с. в.	2,9
рН 10 %-ный водной суспензии	—	3,6
Жироудерживающая способность	г/г	4,73
Водоудерживающая способность	г/г	5,2
Пенообразующая способность	%	20,4
Коэффициент пенообразующей способности	—	0,33
Стойкость пены	%	85,7
Коэффициент стойкости пены	—	0,92

Таким образом, описанная технология позволяет получить белковый концентрат из подсолнечного шрота с высокой массовой долей белка, минимальным содержанием фенольных веществ и хлорогеновой кислоты, а также более светлым [3].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Перечислите четыре основные группы растительных источников белка согласно классификации. Для каждой группы укажите типичную массовую долю белка и основное применение.
2. Какие антипитательные вещества содержатся в семенах бобовых культур? Назовите не менее четырех классов таких соединений и укажите, как они влияют на организм животных.

3. Используя данные таблицы 3.2, сравните содержание белка и липидов в сое, сухом горохе и белой фасоли. Какая из этих культур имеет максимальное содержание белка?

4. В чем заключается главный недостаток аминокислотного состава белков злаковых культур? Каких незаменимых аминокислот в них недостает? Почему злаки и бобовые рекомендуется комбинировать в рационе?

5. Используя данные таблицы 3.5, назовите злак с самой высокой усвояемостью белка. Сравните усвояемость белков злаков (в среднем) с усвояемостью животных белков.

6. Чем отличается жмых от шрота? Какие технологии получения этих продуктов вы знаете?

7. Используя данные таблицы 3.6, сравните содержание лизина и серосодержащих аминокислот (метионин+цистеин) в семенах конопли и сои. Какая из этих культур ближе по аминокислотному профилю к куриному мясу?

8. Какие основные методы технологической обработки семян бобовых позволяют снизить содержание антипитательных веществ и улучшить усвояемость белка?

Тема 4

ПЕРЕРАБОТКА НАСЕКОМЫХ ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ПИЩЕВОЙ И КОРМОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

План темы 4

- 1. Характеристика насекомых как потенциального пищевого сырья.*
- 2. Содержание белка в съедобных насекомых.*
- 3. Характеристика аминокислотного состава белка съедобных насекомых.*
- 4. Производство белка, белкового гидролизата и пептидов.*
- 5. Основные ограничения использования белков насекомых и продуктов на их основе.*

4.1. Характеристика насекомых как потенциального пищевого сырья

Насекомые — хладнокровные, быстрорастущие, богатые белками, липидами и минеральными соединениями, занимающие минимальное пространство и являющиеся частью естественного рациона многих видов, поэтому они потенциально могут стать ценным источником белка. Кроме того, насекомые обладают значительным потенциалом в качестве устойчивого решения для удовлетворения будущих потребностей в питании, поскольку они являются возобновляемыми природными ресурсами, доступными круглый год, оказывают низкое воздействие на окружающую среду и обладают повышенной безопасностью пищевых продуктов.

Белок насекомых относят к белкам животного происхождения. В настоящее время насчитывается 1900 видов съедобных насекомых, большинство из которых потребляется в пищу

в Азии, Африке и Центральной Америке. Примерно 49 % этих съедобных видов насекомых составляют жуки и гусеницы; 14 % — пчелы, осы и муравьи; 13 % — кузнечики, саранча и сверчки; 10 % — полужесткокрылые; 3 % — стрекозы; 3 % — термиты; 2 % — мухи.

Наиболее часто используемыми насекомыми в качестве корма и пищевого сырья являются личинки *Hermetia illucens*, *Bombyx mori*, *Zophobas morio*, *Locusta migratoria*, *Tenebrio molitor*, *Tettigonia viridissima*, *Musca domestica*, *Lumbricina* и др. В таблице 4.1 представлен полный список съедобных насекомых, сгруппированных по таксономическим отрядам, общепринятым и народным названиям.

Таблица 4.1

Съедобные насекомые с высоким потенциалом потребления

Таксономический отряд	Тривиальное название	Общепринятое название
Жуки	Мучной хрущак бурый	<i>Alphitobius diaperinus</i>
	Смоляно-бурый хрущак	<i>Alphitobius laevigatus</i>
	Красный пальмовый долгоносик	<i>Rhynchophorus ferrugineus</i>
	Большой мучной хрущак	<i>Tenebrio molitor</i>
	Зофобас	<i>Zophobas atratus</i>
Двукрылые	Мясная муха	<i>Chrysomya chloropyga</i>
	Черная львинка (черный солдатик)	<i>Hermetia illucens</i>
	Домашняя (комнатная) муха	<i>Musca domestica</i>
Перепончатокрылые	Медоносная пчела	<i>Apis mellifera</i>
	Муравей-листорез	<i>Atta laevigata</i>
Чешуекрылые	Малая восковая моль	<i>Achroia grisella</i>
	Тутовый шелкопряд	<i>Bombyx mori</i>
	Большая восковая моль	<i>Galleria mellonella</i>
	Южноафриканская павлиноглазка (бабочка), гусеница мопане	<i>Gonimbrasia belina</i>

Окончание табл. 4.1

Таксономический отряд	Тривиальное название	Общепринятое название
Прямокрылые	Сверчок домовый	<i>Acheta domesticus</i>
	Индийский сверчок / полосатый сверчок	<i>Grylloides sigillatus</i>
	Банановый сверчок	<i>Gryllus assimilis</i>
	Двупятнистый сверчок	<i>Gryllus bimaculatus</i>
	Полевой сверчок	<i>Gryllus campestris</i>
	Саранча перелетная	<i>Locusta migratoria migratorioides</i>
	Длинноногий тайский кузнечик	<i>Mecopoda elongata</i>
	Рисовый кузнечик	<i>Oxya</i> spp.
	Саранча	<i>Melanoplus</i> spp.
	Рисовая саранча	<i>Hieroglyphus</i> spp.
	Бомбейская саранча	<i>Patanga succincta</i>
	Американская саранча	<i>Schistocerca americana</i>
	Африканская саранча	<i>Schistocerca gregaria</i>
	Сверчок коричневый	<i>Teleogryllus mitratus</i>

Принятие насекомых в качестве источника пищи зависит от многих факторов, включая содержание питательных веществ, особенно белка, а также вкуса, аромата, внешнего вида и вкусовых качеств насекомых. Кроме того, внешние факторы, такие как доступность насекомых, приемлемая цена и благоприятная социальная среда, играют ключевую роль в формировании отношения потребителей к потреблению насекомых [4].

4.2. Содержание белка в съедобных насекомых

Химический состав и размер насекомых определяются видом насекомых и кормом, потребляемым ими в процессе выращивания. Например, одна самка черной львинки может произвести от 400 до 600 личинок, при этом каждая личинка, по оценкам, потребляет 0,5 г органического вещества в день.

Взрослые особи черной львинки не потребляют корм и, таким образом, накапливают запасы белка и жира в стадии роста. Следовательно, состав корма, предоставляемого растущим личинкам, будет определять конечное содержание жира и белка. Это перспективно, поскольку позволяет манипулировать конечными продуктами в соответствии со специфическими индивидуальными потребностями различных производственных систем и типов животных в рамках одной производственной системы.

Насекомые обычно используются в качестве пищевой добавки для человека и кормовых источников, так как они содержат большое количество белка. В среднем содержание белка в съедобных насекомых составляет от 35 до 60 % сухого веса, или от 10 до 25 % свежего веса, а содержание белка в некоторых насекомых выше, чем в некоторых растительных белках (табл. 4.2).

Таблица 4.2

**Содержание белка в обычных
и съедобных насекомых в пересчете на сухой вес**

Насекомое	Содержание белка, %*	Насекомое	Содержание белка, %*
Личинки	26,0—45,0	Кузнечики	20,0—56,0
Сверчки, саранча	6,0—77,0	Жуки, личинки	8,0—69,0
Термиты	20,0—43,0	Пчелы, муравьи	5,0—66,0
Стрекозы	26,0—54,0	Тараканы	43,0—66,0
Мухи	35,0—64,0	Бабочки	18,0—60,0
Мотыльки	18,0—56,0	Равнокрылые стрекозы	54,0—56,0

Примечание: * значения указаны в пересчете на сухой вес.

Большая часть белка в экзоскелете химически связана и, следовательно, может быть недоступна для потребления. Кроме того, экзоскелеты содержат полисахарид хитин и азот, что потенциально может привести к завышению общей оценки

белкового состава насекомых при оценке на основе содержания азота. Важно учитывать возможное завышение, связанное с широко используемым коэффициентом пересчета азота в белок 6,25. Поэтому для перерасчета общего азота на белок необходимо использовать коэффициент 5,00 или 5,09. Такой подход снижает вероятность переоценки, обеспечивая более точное представление содержания белка у насекомых и признавая важность видоспецифических характеристик. Более того, учитывая среднее содержание в разных отрядах насекомых, основными компонентами насекомых были белок и жир, за которыми следовали клетчатка, безазотистый экстракт (БЭ) и зола, без определенного порядка.

Примечательно, что содержание белка в саранче (*Sphenarium purpurascens*) (35—48 %) выше, чем в традиционных источниках белка, таких как баранина (16,32—17,91 %), говядина (17,17—32,27 %), свинина (17,43—21,10 %), курица (16,52—22,50 %), индейка (18,73—21,84 %) и рыба (16,38—29,40 %) [4].

4.3. Характеристика аминокислотного состава белка съедобных насекомых

Белок насекомых имеет аминокислотный состав, сходный с составом рыбной муки и мяса, и таким образом, его можно использовать в качестве замены белка традиционных источников. Насекомые обычно считаются важным источником незаменимых аминокислот (НАК). Содержание аминокислот в белках отдельных видов насекомых (миллиграммы на грамм белка), рыбы и говядины представлено в таблице 4.3. Хотя уровни, развиваемые видами, различаются в зависимости от уровня незаменимых аминокислот, они, как правило, хорошо сопоставимы с традиционными источниками белка, используемыми в кормах для животных, и высококачественными источниками белка для человека, такими как мясо, молоко и рыба.

Таблица 4.3

Сравнение содержания аминокислот (мг/г белка) в различных съедобных источниках белка, включая насекомых, говядину и рыбу (в пересчете на сухой вес, мг/г белка)

Насекомое	Lys	His	Arg	Asp	Thr	Ser	Glu	Pro	Gly	Ala	Met	Cys	Val	Ile	Leu	Phe	Tyr	Trp
<i>Zonocerus variegatus</i>	48,4	39,2	60,6	81,9	30,7	46,7	133,7	43,0	44,9	36,6	18,9	6,50	35,4	36,7	50,6	30,5	25,3	—
<i>Periplaneta americana</i> La	40,0	20,0	51,0	—	36,0	45,0	130,0	65,0	71,0	61,0	36,0	20,0	65,0	31,0	56,0	31,0	69,0	6,0
<i>Rhynchophorus phoenicis</i> (личинки)	45,0	38,9	79,2	—	30,6	39,0	156,0	50,1	47,2	52,5	19,7	20,2	35,0	39,0	54,2	47,5	29,0	—
<i>Sciphophorus asurinctatus</i> (личинки)	53,5	14,7	44,0	—	40,0	—	—	—	—	—	20,2	26,7	62,0	48,2	78,2	46,1	63,5	8,1
<i>Ephydra hians</i> (личинки)	55,0	10,0	—	—	49,0	—	—	—	—	—	19,0	—	61,0	40,0	74,0	54,0	51,0	7,1
<i>Hoplophorion monogramma</i>	55,0	15,0	—	—	45,0	—	—	—	—	—	19,0	—	74,0	41,0	77,0	47,0	90,0	9,6
<i>Liometopum apiculatum</i>	58,0	29,0	50,0	—	42,0	—	—	—	—	—	18,0	14,0	60,0	49,0	76,0	39,0	68,0	8,0
<i>Macrotermes bellicosus</i>	54,2	51,4	69,4	—	27,5	—	—	—	—	—	7,5	18,7	73,3	51,1	78,3	43,8	30,2	14,3

В общей сложности было отмечено, что усвояемость белка составляет от 77 до 98 % для 78 видов, охватывающих различные отряды. Однако оценка усвояемости белка остается неполной для всех видов насекомых. Кажущаяся усвояемость белка для мучного червя и черной львинки составила 60 и 51 % соответственно. Интересно, что усвояемость сырых белков мучного червя и черной львинки, по-видимому, демонстрирует обратную зависимость от концентрации хитина.

У некоторых насекомых наблюдается дефицит или крайне низкий уровень метионина, цистеина и триптофана. Если такие насекомые составляют основную часть рациона, корм должен быть сбалансирован с другими ингредиентами. У насекомых отряда *Blattodea*, как правило, более высокие концентрации лизина, валина, метионина, аргинина и тирозина по сравнению с другими видами насекомых. Количество лейцина у *Coleoptera* больше, чем в других источниках белка, включая говядину. Аналогично, количество фенилаланина у *Hemiptera* обычно больше, чем в других традиционных источниках белка. Аргинин, ценная аминокислота, известная своими полезными свойствами для сердечно-сосудистой системы, а также свойствами, укрепляющими иммунную систему, в большом количестве встречается у этих видов насекомых.

Индекс незаменимых аминокислот благоприятен для личинок черной львинки в качестве корма сельскохозяйственных животных и птиц. В таблице 4.4 представлен аминокислотный состав личинок мухи черной львинки в сравнении с распространенными источниками белка в кормах для сельскохозяйственных животных, что демонстрирует благоприятный состав для включения их в рационы животных агропромышленного комплекса.

Мука из насекомых является важным источником аминокислот с высокой усвояемостью — от 76 до 96 %. Именно поэтому следующий вопрос будет посвящен описанию технологии получения муки из насекомых [4].

Таблица 4.4

**Аминокислотный состав белков в личинках черной львинки
в сравнении с другими источниками белка**

Аминокислота	Содержание, мг/г		
	Личинки черной львинки	Соевый шрот	Сывороточный белок
Аланин	24,0	15,0	49,0
Аргинин	17,0	26,0	21,0
Аспарагиновая кислота	34,0	40,0	108,0
Цистеин	4,0	5,0	21,0
Глутаминовая кислота	43,0	63,0	167,0
Глицин	19,0	16,0	18,0
Гистидин	12,0	10,0	22,0
Изолейцин	16,0	17,0	58,0
Лейцин	25,0	27,0	102,0
Лизин	24,0	22,0	96,0
Метионин	6,0	5,0	19,0
Фенилаланин	15,0	18,0	33,0
Пролин	20,0	18,0	58,0
Серин	14,0	19,0	47,0
Треонин	14,0	15,0	72,0
Триптофан	4,0	5,0	21,0
Тирозин	18,0	13,0	18,0
Валин	21,0	17,0	58,0

4.4. Производство белка, белкового гидролизата и пептидов

Эффективное извлечение белков из насекомых, подобно извлечению белков из других источников, требует метода, который максимизирует площадь поверхности сырья для достижения оптимального выхода как белка, так и жиров. Общий технологический процесс получения белков из насекомых представлен на рисунке 4.1. Насекомых сначала высушивают, а затем измельчают, просеивают для получения однородной муки.



Рис. 4.1. Процессуальная схема получения белка из насекомых

На следующем этапе проводят обезжиривание муки из насекомых, что облегчает эффективное и качественное извлечение белка. При этом отметим, что мука из насекомых может быть использована в качестве пищевого ингредиента для приготовления различных пищевых продуктов питания. Обезжиривание муки из насекомых является важнейшим этапом экстракции белка, поскольку оно повышает выход экстракции и эффективность процесса экстракции, а также предотвращает взаимодействие жиров / масел с белком и проблемы, возникающие в результате взаимодействия гидрофобных аминокислот с жирами.

Следующим этапом извлечения белка после обезжиривания является его растворение. Наиболее широко применяемый метод растворения белка из насекомых включает использование

щелочной среды. Этот метод предполагает выбор соответствующего уровня pH и определенного соотношения растворителя к насекомому, определение оптимальной температуры и продолжительности реакции, а также обеспечение перемешивания смеси муки насекомых и щелочного растворителя для достижения максимального растворения белка. Оптимальными условиями для выделения белка являются 0,25 М NaOH, соотношение растворитель:насекомое 1:15, температура 40 °С и время 60 мин.

Далее растворенный белок направляют на разделение — центрифугирование (сепарирование или фильтрацию). Последними этапами извлечения белка из насекомых являются осаждение белка, а затем разделение надосадочной жидкости и белкового осадка с помощью центрифугирования. В результате получают белковый концентрат или белковый изолят насекомых.

В последнее время наблюдается растущий интерес к получению белковых гидролизатов и пептидов из различных видов насекомых, что обусловлено некоторыми проблемами, связанными с белками насекомых, включая аллергенность и слабые функциональные свойства. Существует три различных метода ферментативного гидролиза белков, основанных на способе добавления ферментов в буферный раствор, содержащий белок. Методы подразделяются на три различные системы добавления ферментов: системы множественного ферментативного расщепления, системы одновременного добавления ферментов и системы последовательного добавления ферментов. В системах однократного добавления к белковому субстрату добавляется только один фермент, и гидролиз осуществляется с помощью соответствующего фермента. Однако в системах множественного ферментативного расщепления и последовательного добавления ферментов добавляется более одного фермента (более 2). В таблице 4.5 представлены технологические параметры, позволяющие получить гидролизаты белков насекомых.

Технологические параметры, позволяющие получить гидролизаты
белков насекомых

Насекомое	Фермент	Соотношение фермент / субстрат	Температура, °C	Продолжительность, ч	pH
<i>Gryllodes sigillatus</i>	Алкалаза	0,5—3,0 %	50	0,5—1,5	8,0
<i>Tenebrio molitor</i> L.	Алкалаза	1 : 100	50	4,0	8,5
<i>Bombyx mori</i>	Алкалаза	1,0 % (вес/объем)	50	4,0	8,0
<i>Gryllodes sigillatus</i>	Алкалаза	3,0 %	55	1,5	8,0
<i>Tenebrio molitor</i>	Алкалаза	0,03 % (масс./масс.)	60	2,0	8,5
	Пепсин	0,25 %	40	4,0	2,0
<i>Alphitobius diaperinus</i> L.	Алкалаза	0,5—3,0 %	50	24,0	8,0
	Королаза	0,5—3,0 %	50	24,0	8,0
<i>Protaetia brevitarsis</i>	Субкритическая вода	—	100—300	—	—

Следует отметить, что для получения гидролизатов белков насекомых наибольшее распространение получил метод ферментативного гидролиза с однократным добавлением фермента. Также отметим, что для гидролиза в основном используют протеазы.

Субкритическая вода стала экологически чистой, быстрой и эффективной технологией гидролиза белков, заменяющей широко используемые химические, ферментативные и ферментационные методы.

В результате гидролиза белков насекомых получают различные пептиды, обладающие биоактивными свойствами, такими как антиоксиданты, антимикробные и антигипертензивные свойства, могут стимулировать увеличение инвестиций и расширение исследований в области экстракции и добавления белков насекомых.

4.5. Основные ограничения использования белков насекомых и продуктов на их основе

Несмотря на то что потребление насекомых, муки из насекомых, а также изолятов и концентратов их белка растет во всем мире, все еще существуют некоторые проблемы и вызовы, которые необходимо учитывать и решать. Среди важнейших проблем, связанных с энтомофагией с использованием насекомых и интеграцией муки или белка на основе насекомых в различные продукты, следует рассмотреть ряд ключевых вопросов, включая принятие потребителями, методы обработки, воздействие на окружающую среду, экономические соображения, необходимость нормативно-правовой базы и законодательства, а также обеспечение безопасности пищевых продуктов как самих насекомых, так и продуктов их переработки.

Проблемы безопасности пищевых продуктов, которые могут вызывать проблемы со здоровьем у потребителей, включают потенциальную аллергенность, токсичность из-за химического загрязнения и риск микробного загрязнения. Аллергенность является критически важной проблемой.

Еще одна серьезная проблема — химические загрязнители, включая тяжелые металлы (кадмий, ртуть, свинец и мышьяк), а также накопившиеся загрязнители окружающей среды (гормоны и пестициды). Кадмий и мышьяк были обнаружены в двух важных насекомых, используемых в рационе человека (личинки черной львинки и желтого мучного червя). Факторами, которые могут увеличить присутствие химических веществ и металлов, являются вид насекомых, фаза роста и источник корма. Присутствие пестицидов вызывает опасения, когда насекомые собираются в дикой природе, например на рисовом поле, где пестициды применялись для борьбы с насекомыми и защиты урожая. Однако эти проблемы, связанные с химическими веществами и пестицидами, можно уменьшить за счет надлежащей производственной практики и методов до- и послеуборочной обработки, при которых можно контролировать такие факторы, как корм и вид насекомых.

Кроме того, микробное загрязнение, как вызывающее порчу, так и вызванное патогенными микроорганизмами, представляет собой проблему при использовании насекомых в качестве источника пищи. Насекомые могут служить переносчиками патогенов, таких как *Salmonella* spp. и *Campylobacter* spp., или содержать спорообразующие бактерии в продуктах, связанных с насекомыми, потенциально способствуя передаче инфекции человеку. Однако это вызывает опасения, когда насекомые употребляются в сыром виде в качестве готовой к употреблению пищи.

Паразиты — еще одна биологическая опасность, связанная с некоторыми конкретными видами насекомых. Такие паразиты, как *Entamoeba histolytica*, *Giardia lamblia* и *Toxoplasma* spp., обнаружены у насекомых, собранных в дикой природе.

Еще одна проблема — это нехватка информации и знаний о методах обработки, позволяющих оптимизировать выход и чистоту белка насекомых, которые, как правило, используются исключительно в лабораторных условиях, что представляет собой серьезную проблему в переработке белка насекомых. Как уже отмечалось, белок насекомых обычно получают с использованием уже известных и применяемых методов для произ-

водства растительных продуктов. Содержание белка и функциональные свойства значительно различаются в зависимости от вида насекомых, способа их разведения и переработки.

Таким образом, использование насекомых из безопасных и подходящих источников пищи в сочетании с процедурами обработки, минимизирующими риски, имеет важное значение для применения насекомых в качестве возможных источников белка и других питательных веществ [4].

Контрольные вопросы для самопроверки

1. Перечислите основные биологические и экологические преимущества насекомых как источника пищи.
2. Назовите не менее пяти видов насекомых, которые наиболее часто используются в качестве кормового и пищевого сырья (приведите латинские и русские названия из текста).
3. В чем заключается методологическая проблема при оценке содержания белка в насекомых, связанная с экзоскелетом?
4. С какими традиционными источниками белка (мясо, рыба) сравнивают аминокислотный состав белка насекомых? Какие незаменимые аминокислоты могут быть дефицитны у некоторых видов насекомых?
5. Охарактеризуйте основные стадии технологического процесса получения белка и гидролизатов белков из насекомых.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бирюков В. В.* Основы промышленной биотехнологии : учеб. пособие. М. : Колос, 2004.
2. *Киселева О. В., Тарнопольская В. В., Миронов П. В.* Биотехнология пищевого белка : учеб. пособие. Красноярск : Изд-во СибГУ им. М. Ф. Решетнева, 2021.
3. *Щеколдина Т. В., Кудинов П. И., Бочкова Л. К. и др.* Получение белкового изолята из подсолнечного шрота // Известия вузов. Пищевая технология. 2008. № 1. С. 19—20.
4. *Аркадьева З. А., Безбородов А. М., Блохина И. Н. и др.* Промышленная микробиология. М. : Высш. шк., 1989.
5. *Шугалей И. В., Гарабаджиу А. В., Целинский И. В.* Химия белка : учеб. пособие. СПб. : Проспект Науки, 2010.
6. *Hasnan F. F. B., Feng Y., Sun T. et al.* Insects as valuable sources of protein and peptides: Production, functional properties, and challenges // Foods. 2023. Vol. 12, № 23. P. 4243.
7. *Мандреа А. Г.* Технология и оборудование для получения соевого белкового изолята / концентрата // Пищевая промышленность. 2004. № 5. С. 54—55.
8. *Пептидная связь* // Википедия: свободная энциклопедия : [офиц. сайт]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Пептидная_связь (дата обращения: 03.07.2026).
9. *Белки — определение, структура, свойства белков* // Справочник для школьников — Образовательный сайт для школьников. URL: <https://pochemu-kak.ru/belki-struktura-belkov-funkzii-aminolisloty/> (дата обращения: 03.07.2026).
10. *Структуры белка. Денатурация* // Biofil. URL: <https://biofil.pro/test/8-biosintez-belka-teor-2.php> (дата обращения: 03.07.2026).
11. *Модуль 1. Строение, свойства и функции белков* // Biofil. URL: <https://biofil.pro/test/8-biosintez-belka-teor-2.php> / (дата обращения: 03.07.2026).

12. *Выращивание* микроводорослей. Перспективная «сельскохозяйственная культура» // Best Crop. URL: <https://best-crop.com/innovatsii/vyrashchivaniye-mikrovodorosley/> (дата обращения: 03.07.2026).

Учебное издание

Бабич Ольга Олеговна
Сухих Станислав Алексеевич
Дышлюк Любовь Сергеевна

**ПЕРЕРАБОТКА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ СЫРЬЯ
В ПИЩЕВОЙ И КОРМОВОЙ БЕЛОК**

Учебное пособие

Редактор *В. Е. Москаленко*
Компьютерная верстка *Е. В. Денисенко*

Подписано в печать 22.07.2026 г.
Дата выхода в свет 05.08.2026 г.
Формат 60×90^{1/16}. Усл. печ. л. 6,0
Тираж 300 (1-й завод 31 экз.). Заказ 62

Издательство Балтийского федерального университета им. Иммануила Канта
236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14

