А. Ю. Винаров, А. А. Кухаренко, Н. Е. Николайкина

БЕЗОТХОДНАЯ БИОТЕХНОЛОГИЯ ЭТИЛОВОГО СПИРТА

МОНОГРАФИЯ

2-е издание, переработанное и дополненное

**Книга доступна в электронной библиотеке biblio-online.ru,
а также в мобильном приложении «Юрайт.Библиотека»**

Москва ▪ Юрайт ▪ 2019

УДК 60
ББК 28.087
В48

Авторы:

Винаров Александр Юрьевич — доктор технических наук, профессор, академик Международной академии информатизации, член-корреспондент Российской и Международной инженерной Академии;

Кухаренко Александр Александрович — доктор технических наук, профессор, заслуженный химик Российской Федерации, академик Международной академии информатизации;

Николайкина Наталья Евгеньевна — кандидат технических наук, профессор, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, действительный член Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, заведующая кафедрой химии и биотехнологии Московского политехнического университета, ведущий специалист в области экологически безопасных технологий.

Винаров, А. Ю.

В48 Безотходная биотехнология этилового спирта : монография / А. Ю. Винаров, А. А. Кухаренко, Н. Е. Николайкина. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 217 с. — (Актуальные монографии). — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-534-10889-7

Издание посвящено научному и экспериментальному исследованию биотехнологии этилового спирта и растительного сырья в связи с созданием безотходных ресурсосберегающих производств. С позиций теории логистики предложен подход к разработке многопродуктовой технологической схемы, обеспечивающей наиболее полное использование исходного сырья и получение продуктов, пользующихся высоким потребительским спросом.

Авторы, используя результаты собственных исследований, а также публикации и патенты по данной проблеме рассмотрели технологические особенности и аппаратурное оформление предлагаемых промышленных процессов.

Книга будет полезна широкому кругу специалистов, связанных с разработкой, созданием и эксплуатацией спиртовых производств, а также работающим в пищевой, химической, нефтехимической, биотехнологической, сельскохозяйственной и экологической областях науки и техники.

УДК 60
ББК 28.087

Delphi Law Company

Все права защищены. Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав. Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая компания «Дельфи».

© Винаров А. Ю., Кухаренко А. А., Николайкина Н. Е., 2001
© Винаров А. Ю., Кухаренко А. А., Николайкина Н. Е., 2019, с изменениями
© ООО «Издательство Юрайт», 2019

ISBN 978-5-534-10889-7

Оглавление

Предисловие **5**

Глава 1. Тенденции развития спиртовой промышленности **8**

1.1. Характеристика различных видов сырья для производства этилового спирта 13

1.2. Комплексная переработка сельскохозяйственной продукции в этанол 19

Глава 2. Биотехнология переработки растительного сырья в этанол **23**

2.1. Способы предобработки растительного сырья 25

2.2. Ультразвуковой метод обработки целлюлозосодержащего сырья 27

2.3. Ферментативный гидролиз крахмалсодержащего сырья и лигноцеллюлозы 31

2.4. Перспективные технологические схемы переработки растительного сырья в этанол 39

2.5. Использование иммобилизованных клеток микроорганизмов при биосинтезе этилового спирта 46

Глава 3. Ректификационная очистка этанола и отходы спиртового производства **55**

3.1. Процесс ректификации и его аппаратурное оформление 56

3.2. Расчет и оптимизация процесса ректификации 60

3.3. Жидкие отходы спиртового производства 69

3.4. Газообразные отходы производства и способы их утилизации 73

Глава 4. Методы теории логистики при анализе и совершенствовании производства этанола из зерносырья **85**

4.1. Формирование номенклатуры продуктов оптимального состава, выпускаемых предприятием по переработке зерносырья 89

4.2. Разработка структуры многопродуктового производства по переработке зерносырья в этиловый спирт и биологически активные добавки 99

Глава 5. Технология получения кормового белкового продукта при использовании спиртовой барды **107**

5.1. Процесс аэробного культивирования микроорганизмов на спиртовой барде и зерносырье 109

5.2. Системный подход к анализу и математическому описанию процесса биосинтеза 115

5.3. Характеристика готового продукта 120

Глава 6. Технология получения кормового витамина B_{12} на основе спиртовой барды 124
6.1. Применение витамина B_{12} в животноводстве.....125
6.2. Микробиологический синтез витамина B_{12} 142
6.3. Анализ биотехнологий получения кормового витамина B_{12}.....155
6.4. Аппаратурное оформление и интенсификация процесса биосинтеза витамина B_{12} 169

Глава 7. Использование отходов производства этанола для получения биоорганических удобрений и кормового белка из биогаза 178
7.1. Спиртовая барда как компонент органоминеральных удобрений.....178
7.2. Анаэробный способ получения удобрений 183
7.3. Аэробный способ получения биоорганического удобрения.....187
7.4. Биотехнология получения микробиологического белка из биогаза...196

Заключение..... 202

Библиографический список 203

Новые издания по дисциплине «Биотехнология» и смежным дисциплинам 217

Предисловие

Продолжающиеся в США, Японии, России, Канаде, Бразилии и других странах увеличение объемов выпуска этилового спирта, рост инвестиций в биотехнологические предприятия и научные исследования по переработке растительного сырья в этанол, свидетельствуют о том, что это производство является областью динамичного развития.

На смену кустарным заводам появляются мощные биотехнологические предприятия с непрерывным технологическим циклом, позволяющие за счет передовой технологии постоянно снижать себестоимость этанола. Важнейшим фактором при этом являются практически неограниченные запасы сырья, в качестве которого используются различные сельскохозяйственные и бытовые отходы, а также возобновляемое растительное сырье.

В России производство и продажа спиртных напитков в XVII—XIX вв. давала в бюджет государству от четверти до трети всех доходов. Однако одним из первых декретов советской власти был декрет 1919 г. «О воспрещении на территории РСФСР изготовления и продажи спирта…» с целью воспрепятствовать использованию зерна на самогон. Но уже в 1925 г. был принят декрет СНК СССР «О производстве спирта, спиртных напитков и торговле ими» и к 1926 г. было восстановлено 376 заводов с общей выработкой спирта 16 млн декалитров в год. В России после определенного спада происходит постепенное наращивание объема выпуска этанола в период 2013—2017 гг. и в настоящее время производится более 70 млн декалитров в год.

Однако, использование этилового спирта в пищевой, водочной, медицинской и даже в химической промышленностях не могло бы вызвать нового резкого увеличения его производства во всем мире, как возможность применения этанола в качестве биотоплива. При этом производство биоэтанола в настоящее время составляет более 30 млн т из них 47 % выпускает Бразилия и 43 % — США. Смеси бензина с этанолом (10 % и 20 %) уже сегодня широко используются как более экологически чистое моторное топливо. При этом, постоянный рост цен на нефтепродукты и совершенствование биотехнологии этанола из возобновляемого растительного сырья, а также значительная потенциальная потребность в биотопливе, позволяют считать крайне перспективным дальнейшее развитие спиртовой промышленности.

В то же время, расширение производства этилового спирта, появление новых крупных биозаводов приводит к определенной экологической напряженности, что связано с отсутствием надежных и эконо-

мически эффективных промышленных технологий утилизации отходов этих производств и полного использования исходного растительного сырья. Значительный интерес, в связи с этим, представляют рассматриваемые в книге вопросы получения ценных биопродуктов при использовании основного отхода производства этанола — послеспиртовой барды. В связи с этим можно утверждать, что дальнейший рост выпуска этанола и повышение эффективности связаны с разработкой и реализацией безотходной биотехнологии, позволяющей создать многопродуктовое производство с наиболее полным использованием сырья.

В России, в настоящее время существуют, практически в каждом регионе и области, предприятия, на которых реализуется микробиологическое производство этилового спирта из зерносырья. Эти предприятия имеют неограниченный сбыт своей продукции и, следовательно, развитие их продолжается. В то же время, при производстве этилового спирта образуется большое количество отходов: послеспиртовая барда, побочные продукты перегонки этилового спирта, клетки микроорганизмов, загрязняющие окружающую среду и данные предприятия нельзя отнести к безотходным или экологически чистым. С другой стороны, отходы микробиологического производства этилового спирта из зерносырья можно использовать в качестве сырья для синтеза целого ряда продуктов, полезных для агропромышленных комплексов, в том числе: кормовых белковых добавок, кормового витамина B_{12}, биогаза, эффективных органических удобрений и т. д. Значительный практический интерес представляет рассмотренная в книге биотехнология переработки послеспиртовой барды в биогаз с выращиванием на нем высокобелковой биомассы для кормов.

Возможность широкого использования возобновляемого растительного сырья для производства этанола, а также повышение эффективности технологии и снижение себестоимости готового продукта, позволяют рассматривать новые направления его применения. Разработаны биотехнологии, обеспечивающие переработку не только пищевого сырья в этанол, но и отходов, содержащих лигноцеллюлозу, что значительно расширяет и удешевляет сырьевую базу этанола.

Технический прогресс позволил решить ряд проблем, которые прежде были препятствием к выгодному производству этанола для его использования в качестве топлива, что открывает серьезные перспективы в части дальнейшего расширения выпуска этанола из возобновляемого сырья. Проблема конкурентоспособности биотехнологии этанола и создание рентабельного производства требует оптимизации не только отдельных компонентов производственно-коммерческого процесса, но и всего производства в целом для наиболее полного использования ресурсного потенциала и скорейшей окупаемости затрат на его модернизацию.

В связи с этим является актуальным создание логистически-ориентированного многопродуктового производства, обеспечивающего с наименьшими затратами максимальную приспособленность предприятия

к изменяющейся рыночной обстановке, расширение рыночного сегмента и получение конкурентного преимущества за счет комплексного использования сырья и побочных продуктов синтеза этилового спирта.

К значимым вопросам, которые встают при создании производств по получению этанола, можно отнести следующие:

- изучение состава углеродсодержащих субстратов, из которых можно получить этанол микробиологическим синтезом;
- идентификация видов возобновляемого растительного сырья и сельскохозяйственной продукции и отходов ее переработки, которые могут быть доступны в определенном регионе для переработки в этанол;
- оценка устойчивости сырьевой базы, стоимости сельхозпродукции, урожайности зернокультур, картофеля и других сельхозкультур в регионе, пригодных для их переработки в этанол;
- выбор биотехнологии этанола с учетом последних достижений в области технологических процессов и аппаратов и организации комплексного производства;
- оценка капиталовложений и эксплуатационных расходов при производстве этанола из различных видов сырья;
- идентификация побочных продуктов, получаемых при комплексной схеме переработки исходного сырья в этанол, и оценка их потенциальных рынков;
- обеспечение экологической безопасности при производстве этанола и организация безотходного производства.

Данные задачи и явились основой для подготовки и издания настоящей монографии. Накопленный научно-практический опыт позволил авторам обобщить собственные исследования и с учетом известных разработок в этой области предложить конкретные направления по реализации безотходной биотехнологии этанола.

Учитывая, что без серьезных инвестиций создание современных безотходных спиртовых заводов сегодня не реально, авторы сознательно уделили внимание развитию эффективных методов промышленной логистики применительно к созданию многопродуктового безотходного производства этанола с достаточно коротким сроком окупаемости затрат.

Авторы высоко оценивают большую помощь в проведении исследований по данной проблеме специалистов института «Госниисинтезбелок» (г. Москва), в первую очередь сотрудников лаборатории «Технология промышленного биосинтеза», а также ведущих специалистов спирт-завода «Биотехнологический завод», где отрабатывались новые технологические и технические решения.

Авторы надеются, что книга будет полезна широкому кругу специалистов, связанных с разработкой, созданием и эксплуатацией спиртовых производств, а также работающим в пищевой, химической, нефтехимической, биотехнологической, сельскохозяйственной и экологической областях науки и техники.

Глава 1
ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СПИРТОВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Этанол, получаемый в результате биодеградации ежегодно возобновляемых растительных субстратов (зерна злаковых культур, свеклы, картофеля, соломы, багассы, люцерны, сахарного тростника), является ценным продуктом, который находит самое широкое применение в различных отраслях народного хозяйства: в пищевой и химической, в кондитерской и вино-водочной промышленности. В то же время проблема снижения выпуска и удорожания процессов нефтедобычи позволяет рассматривать перспективность использования этанола, получаемого из растительного сырья, в качестве компонента топлива. Цикл превращения углекислого газа в злаковые культуры и зерно, а далее через ферментационный процесс и последующую ректификацию в этанол, топливо и снова в углекислый газ наглядно подтверждает экологическую целесообразность использования этанола как компонента топлива (рис. 1.1).

Получение этанола из возобновляемого растительного сырья, а также углеродсодержащих бытовых и промышленных отходов методом спиртового сбраживания становится реальной альтернативой химическому методу. При этом успехи микробиологии в отборе новых штаммов микроорганизмов, селекции и генной инженерии, а также использование эффективных ферментных препаратов для гидролиза исходного сырья позволяют получать этанол с высоким выходом из различных источников. Классическая схема спиртового брожения и превращения глюкозы в этанол приведена ниже:

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_6H_5OH + 2CO_2 + 56 \text{ ккал}$$

Реальный выход этанола из глюкозы составляет 46—47 %, при этом процесс протекает в нормальных условиях по температуре и давлению. При химическом методе получения этанола в процессе гидратации из этилена требуются повышенная температура и катализатор. Этилен, производимый каталитическим гидрированием ацетилена или крекингом нефти, — достаточно дешевый и широко производимый промышленным путем химический продукт. Однако повышение стоимости нефти и нефтепродуктов, а также расширение сферы промышленного использования этанола делают особенно актуальной задачу

дальнейшего совершенствования биотехнологии этанола и снижения его себестоимости.

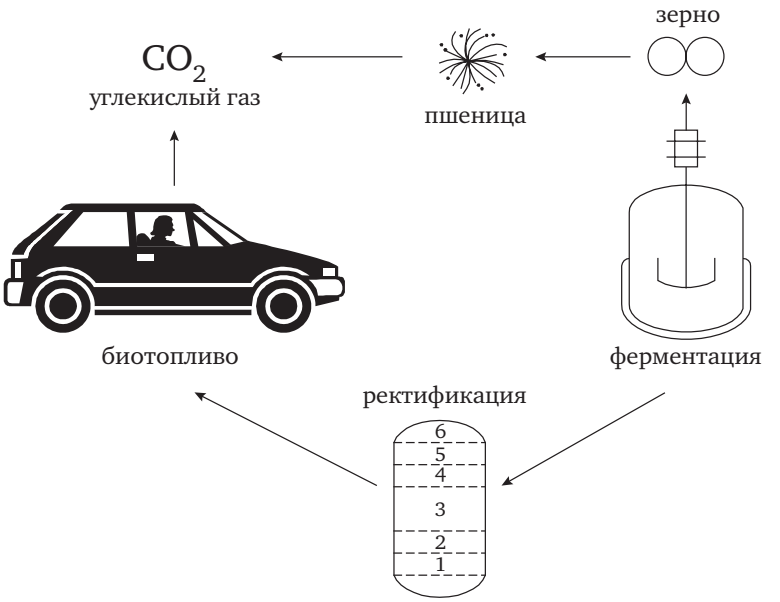

Рис. 1.1. **Цикл превращения углерода**

Именно возможность решения энергетической проблемы производством энергоносителей (в частности, этанола) из растительного сырья, включая первичные и вторичные сельскохозяйственные продукты и отходы, определила интенсивное развитие этанольной промышленности в таких странах, как США, Бразилия, Индия и т. п.

Анализ потребности в энергии для производства 1 кг этанола из зерна кукурузы и величины выхода энергии (в единицах бензинового эквивалента) показал, что при использовании жидкого горючего на всех стадиях процесса — производство зерна, ферментация микроорганизмов, дистилляция этанола, сушка вторичного продукта — каждый произведенный галлон этанола сократит поставки бензина на 0,725 кг [1]. Была исследована зависимость организации крупномасштабного производства спирта из биомассы от наличия сырьевых и трудовых ресурсов в регионе с помощью разработанного в ИИАСА подхода WELMM (вода — энергия — земля — людские ресурсы — материалы). Оценка двух стадий производства тростника и маниоки (сельскохозяйственной, связанной с выращиванием и уборкой урожая, и индустриальной, состоящей в переработке биомассы в этанол) показала, что энергия, потребляемая на сельскохозяйственной стадии, составляет в 17 ГДж/га, в том числе на топливо для механизмов и машин расходуется 55 %, на машины, азотные удобрения, различные материалы 45 %. При переработке маниоки энергии потребляется на 40 % меньше, что иллюстрирует табл. 1.1.

Таблица 1.1

Энергетический баланс производства этанола, МДж/л

Сырье	Производство чистой энергии			Внешние энергетические потребности	Отношение произведенной энергии к потребленной
	отходы	электроэнергия	этанол		
Сахарный тростник					
Без генерирования энергии	10—12	—	21	18	1,7—2,3
Традиционная схема генерирования	—	—	21	12	1,8
С производством дополнительной энергии	—	4	21	12	2,1
Без обработки органических отходов	—	—	21	25	0,8
Маниока					
С 50 %-й обработкой органических отходов	8	—	21	20	1,45
Со 100 %-й обработкой органических отходов	15	—	21	21	1,7

Таблица 1.2

Расходы на производство этанола для завода мощностью 120 м^3/сут

Наименование	Цена, 10^3, долл.
Погрузка и транспортировка тростника	510
Подготовка и помол	1230
Обработка сока	210
Бойлеры	715
Термогенераторы	155
Система распределения электроэнергии	715
Обработка воды	75
Испытания	50
Механизмы и машины	120
Оборудование	1280
Хранение спирта	330
Перегонка	285
Металлоконструкции	340
Транспорт	185
Сооружения	1360

Производство этилового спирта биотехнологическим методом из возобновляемого растительного сырья по сравнению с традиционными путями получения энергии требует больших людских ресурсов. Это объясняется в первую очередь слабой механизацией сбора и обработки сельскохозяйственной продукции. В табл. 1.2 приведены данные, характеризующие финансовые затраты на производство этанола из сахарного тростника для завода мощностью 120 $м^3$/сут, работающего 150 сут в году.

Отношение количества производимой и потребляемой энергии при производстве этанола из зерносырья (табл. 1.3), сахарного тростника и маниоки составляет от 1,1—1,4 (для зерна) до 2,1 (для сахарного тростника), что свидетельствует о целесообразности применения комплексной переработки субстратов.

Ведущие фирмы — производители автомобилей *Chrysler*, *Ford* и *General Motors* оценивали эффективность использования этанола в качестве топлива. На миллионах километров дорог было проверено новое топливо — оксидизель, состоящее из 15 % этанола, 80 % дизеля и 5 % присадок [2]. Рынок сбыта для оксидизеля покрывает 12 % бензинового рынка, при этом в результате частичной замены дизельного топлива этанолом снижается выделение в воздух углеводородов, оксидов азота, оксида углерода, уменьшается выброс ароматических углеводородов. В ходе испытаний было отмечено увеличение стабильности, экологичности и срока службы двигателей.

Таблица 1.3

Количество потребляемой и производимой энергии при производстве этанола

Наименование процесса, продукта	Энергия в бензиновом эквиваленте	
	потребляемая	производимая
Производство зерна	0,07—0,08	—
Производство этанола,	0,085—0,115	—
Этанол (1 кг)	—	0,18—0,21
Вторичные продукты	—	0,024—0,027
Отношение производимой энергии к потребляемой ~ 1,1—1,4		

Снижение потребности в бензине и улучшение экологической обстановки в городах в результате использования топлива на основе смеси дизеля, этанола, бензина и присадок предопределяет тенденцию развития спиртовой промышленности. В США и ведущих странах по производству этанола отмечается заметный рост его выпуска и использования (рис. 1.2). Сегодня, больше чем триллион машин работает на топливе смеси этанола и бензина, что составляет только в США 12 % от всех работающих моторных двигателей.

В России выпуск этанола несколько снизился за последние 15 лет, что иллюстрирует диаграмма на рис. 1.3. Однако в 2015—2017 гг. объем

реализации рос на 4,1—9,2 % в год. Основным монопольным производителем этанола в России становится госкомпания «Росспиртпром».

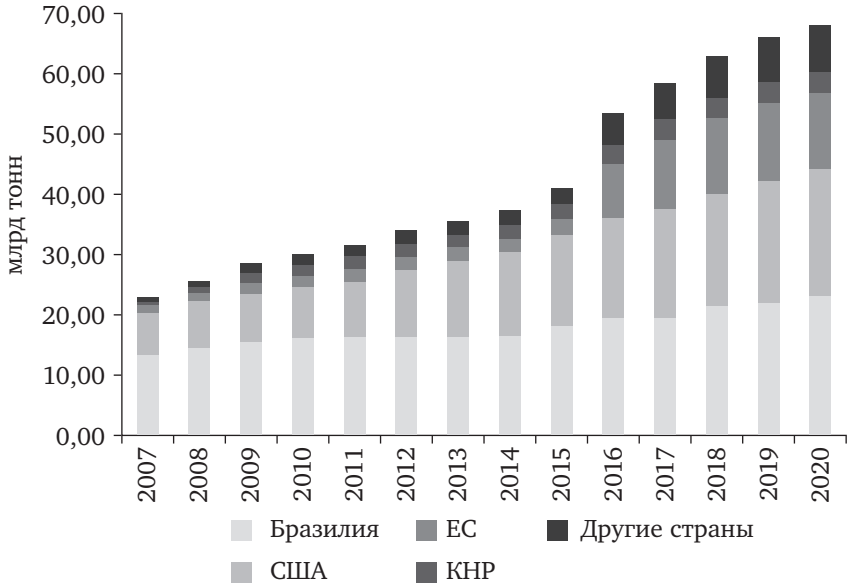

Рис. 1.2. **Динамика и прогноз роста выпуска этанола в США, Бразилии, КНР, ЕС**

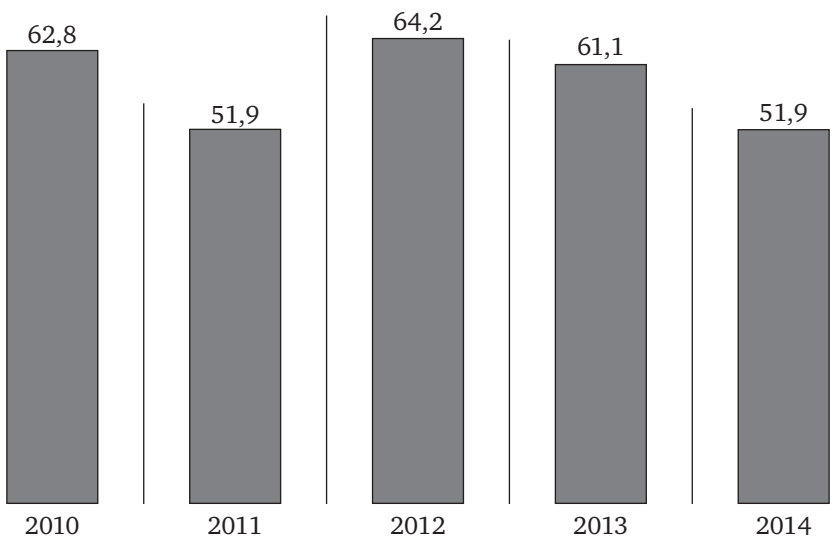

Рис. 1.3. **Изменение объема спирта, выпускаемого в России**

Тенденция развития промышленности показывает, что новые предприятия за последнее десятилетие практически не строились, происходила частичная модернизация действующих производств.

Проблеме получения этанола и использования его в качестве составной части горючего уделяют внимание также в Бразилии, Канаде, Индии, скандинавских странах. Проявляют интерес страны Западной Европы, Японии, ЮАР, однако, по существующим прогнозам, страны Западной Европы собираются импортировать этанол из тропических стран [3, 4].

Таким образом, отмечается существенный рост производства этилового спирта во многих странах мира: России, США, Латинской Америки и Азии.

1.1. Характеристика различных видов сырья для производства этилового спирта

Использование возобновляемого растительного сырья и постоянно образующихся углеводсодержащих отходов перерабатывающей промышленности позволяет считать, что сырьевая база для обеспечения существующего уровня и дальнейшего развития производства этанола достаточно надежна. В то же время задача снижения себестоимости получения этанола биотехнологическим методом требует анализа и выбора различных видов наиболее дешевого и доступного сырья. При этом, в частности, важно, чтобы сырье ежегодно воспроизводилось в необходимых количествах, собиралось концентрированно без протяженных транспортных перевозок, имело высокое содержание углеводов и хорошо сохранялось.

В качестве углеводсодержащего субстрата для производства этанола чаще всего используют зерно пшеницы, ржи и кукурузы, молочную сыворотку, томатную пасту, древесные отходы, сахарный тростник, багассу, газетную массу и т. п. [5].

В табл. 1.4 [6, 7] приведено соотношение отдельных компонентов для различных видов природного возобновляемого сырья, которые могут быть превращены в этанол в биотехнологическом процессе.

Каждый из перечисленных выше субстратов в своем составе содержит полисахариды: целлюлозу (1,0—62 %), крахмал (1—81 %), гемицеллюлозу (9—27 %), из которых синтезируется этанол. От соотношения перечисленных выше полисахаридов в сырье зависят особенности технологической схемы, себестоимость продукта, количество образующихся отходов производства и их состав. Исторически производство этанола было ограничено использованием растворимых форм источников сахара типа сахарозы, патоки, полученной в результате переработки сахарного тростника, или фруктозы. Поскольку эти растворимые сахара съедобны, их относительная ценность выше остальных компонентов растений — зеленой массы: листьев, стеблей, и т. п., являющихся несъедобными и обычно имеющих намного меньшую стоимость. Во многих случаях несъедобные части растений являются отходами производств чистых сахаров, их сжигают, отправляют на очистные соо-

ружения. Однако появление технологий по переработке лигноцеллюлозных материалов в этанол позволяет рассматривать лигноцеллюлозу как дешевое сырье для производство этанола. Это очень существенно, например, с одного акра сахарного тростника производится приблизительно 10 т съедобного сахара и 3 т патоки, а также около 2,5 т зеленой массы — листьев и стеблей.

Таблица 1.4

Компонентный состав углеводсодержащего сырья, % от абсолютно сухого вещества (а.с.в.)

Источник сырья	Сахар	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Лигнин	Крахмал
Багасса	3	38	27	20	12
Сахарный тростник	43	22	15	11	9
Отходы переработки сахарного тростника	—	36	21	16	27
Сорго	34	36	16	10	4
Эвкалипт	—	38	13	37	12
Люцерна	—	43	14	25	18
Муниципальные твердые отходы	—	33	9	17	41
Газеты	—	62	16	21	1
Отруби пшеницы	1,0	20	11	8	60
Отруби ржи	1,5	17	11,5	10	60
Дерть	5,5	8,5	20,0	6	60
Зерно пшеницы	6,5	7,5	21,0	5	60
Солома пшеничная	—	55	19	20	8
Банановые отходы	3	30	25	17	25
Зерно ржи	5	2,2	10,0	1,7	65
Картофельная мезга	3	12	28,5	4,5	52
Картофель	4,5	1,0	10	3,5	81

В соответствии с географическим положением и сложившейся структурой хозяйства в отдельных странах для производства спирта используют различные виды сельскохозяйственного сырья: во Франции сахарную свеклу и мелассу, в Германии картофель и зерно, В США зерно и фрукты, в странах Азии и Африки тростниковую мелассу. В России доля зерносырья, используемого для получения этанола, постоянно растет. Так, если в 1998 г. соотношение объемов спирта, полученного из зерна, и гидролизного спирта (в основном из древесной щепы) составило 2,8:1,0 при общем выпуске 500 тыс. т, то увеличение производства этанола до 600 тыс. т. в 1999 г. было обеспечено в основном увеличением доли зерна и соотношение достигло уже 3,8:1,0. Кроме

зерна в России используют мелассу — отходы при производстве сахара и картофель.

На рис. 1.4 показано соотношение этих источников сырья. Однако в настоящее время в связи с резким ростом объема производства этанола сырьевая база расширяется, активнее используются целлюлозосодержащие отходы: багасса, газетная масса, твердые муниципальные отходы.

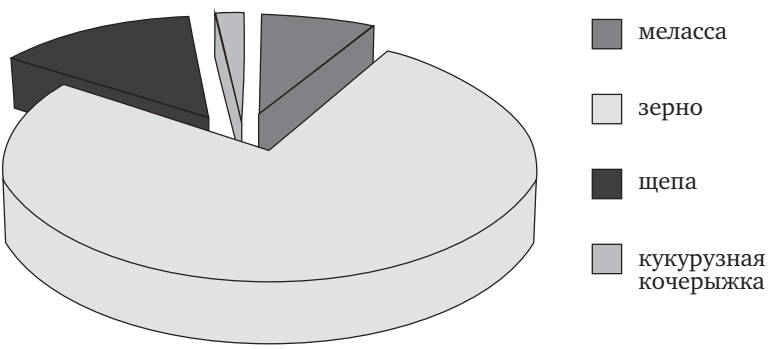

Рис. 1.4. **Доля различных источников возобновляемого сельскохозяйственного сырья при производстве этанола в России**

С точки зрения использования наиболее дешевых отходов большой интерес, особенно в странах Европы и США, вызывают так называемые муниципальные отходы.

Состав муниципальных твердых отходов изменяется существенно в зависимости от местоположения мегаполиса, численности населения (табл. 1.5) [8]. Бумага и отходы продовольствия, строительные отходы, листва и т. д. содержат существенные количества лигноцеллюлозного материала. В составе твердых муниципальных отходов содержится до 65 % углеродсодержащих материалов, которые могут перерабатываться в этанол.

Усредненный состав твердых муниципальных отходов представлен на рис. 1.5.

Таблица 1.5

Количество муниципальных твердых отходов в регионах с различной численностью населения

Наименование отхода, т/год	Численность населения, тыс. чел.	
	800	100
Картон	70,2	26,5
Старая газета	65,5	9,5
Смешанная бумага	140	35
Зеленые отходы	200,6	53,8
Стекло	61,9	12,3

Окончание табл. 1.5

Наименование отхода, т/год	Численность населения, тыс. чел.	
	800	**100**
Алюминий	15,9	2,5
Олово	5,0	1,4
Железо	153	11,2
Пластмасса	74	14
Отходы строительства	93.2	—

Рис. 1.5. **Композиционный состав твердых муниципальных отходов**

Состав бумажной массы, которая может быть переработана микробиологическим методом в этанол, представлен на рис. 1.6.

В состав отработанной бумажной массы входит до 77 % углеводсодержащих компонентов (целлюлоза и гемицеллюлоза) — источников углерода при производстве этанола. Бумажные отходы в основном сжигаются или вывозятся на свалки. Полагают, что при переработке 80 % мировых отходов в этанол ежегодно можно было бы получать 4 млрд т этанола [9].

В настоящее время разработаны технологии по переработке углеводородсодержащих субстратов с разным соотношением целлюлозы, крахмала, гемицеллюлозы и лигнина. Одним из критериев выбора субстрата является себестоимость получаемого этанола.

Себестоимость 1 т этанола в зависимости от вида используемого сырья приведены в табл. 1.6 [10].

Цена на субстрат не всегда определяет себестоимость продукта. Так, цена 1 т зерна — 140 долл., а цена 1 т сена — 97 долл., в то время как себестоимость 1 т этанола из зерна составляет 1,02 долл., а из сена — 1,45 долл. за галлон. Это обусловлено, прежде всего, сбалансирован-

ностью субстрата по сахарам, утилизируемым микроорганизмами и, как следствие, с выходом этанола от субстрата, а также с технологическими особенностями переработки субстрата. Использование отходов или побочных продуктов производств позволяет получать продукт с самой низкой стоимостью, при этом решается также проблема их утилизации. Однако количество этих отходов ограничено, и не всегда они могут находиться в сконцентрированном виде вблизи производств.

Рис. 1.6. **Состав бумажной массы — потенциального источника этанола**

Таблица 1.6

Себестоимость 1 т этанола в зависимости от вида используемого сырья

Сырье	Выход этанола, т/т сырья	Цена 1 т сухого сырья, долл.	Себестоимость 1 т этанола, долл. США
Сахарный тростник	0,33	127	377
Сено	0,19	97	493
Люцерна	0,23	152	676
Эвкалипт	0,22	106	469
Солома	0,17	35	82
Зерно	0,33	140	340
Картофель	0,32	160	350
Багасса	0,19	72	285
Твердые муниципальные отходы	0,17	25	143
Газеты	0,29	15	48

Другим фактором, определяющим выбор сырья для производства этилового спирта, является возможность его ежегодного воспроизводства в нужном объеме. Зависимость посевных площадей от вида сельскохозяйственных культур приведена в табл. 1.7 [11].

Таблица 1.7

Необходимые посевные площади под культуры, возделываемые для последующей переработки в этиловый спирт

Сырье	Выход этанола, кг/т сухого вещества	Выход этанола, кг/га	Посевная площадь, га на 50 тыс. т этанола	Количество сырья тыс. т на 50 тыс. т этанола
Сахарный тростник	318	8,12	27,5	156
Сено	187	10,1	30	266
Эвкалипт	212	5522	57,5	234
Люцерна	223	5132	60	224
Зерно пшеницы	330	660	75,7	151

Таким образом, если в России развито производство этанола из зерна, отходов переработки сахара и сахарной свеклы — мелассы, картофеля, то в США наряду с широким использованием зерна пшеницы, кукурузы наиболее перспективным считается развитие производства этанола на основе целлюлозосодержащих субстратов: кукурузной кочерыжки, опилок, отходов сахарного тростника, бумажной и древесной массы, газет, сена и т. д.

При утилизации целлюлозы экономически более выгодно перерабатывать сахарный тростник с учетом возможности его комплексной переработки с получением этилового спирта, чистого сахара и мелассы, а также дешевые отходы: опилки, солому злаковых культур, кукурузную кочерыжку.

Стремление использовать альтернативные источники энергии привело к тому, что некоторые импортирующие нефть страны, прежде всего Бразилия и США, организовали крупное промышленное производство топливного этанола из сельскохозяйственного растительного сырья на основе его биотехнологической переработки. Основными видами этого сырья остаются зерно кукурузы, сахарный тростник, зерно пшеницы. В целях повышения экономичности производства этанола, более полного использования сырья и создания экологически безопасных технологий проводятся интенсивные исследования и промышленные испытания по использованию новых более дешевых источников сырья (особенно древесных и сельскохозяйственных отходов), по совершенствованию процессов гидролиза, ферментации и обезвоживания спирта, разработки технологии утилизации отходов спиртового производства с получением целой гаммы новых продуктов [12].

1.2. Комплексная переработка сельскохозяйственной продукции в этанол

В настоящее время экономически целесообразным оказывается не только крупномасштабное производство этилового спирта, но и создание мелких производств на основе фермерских хозяйств. В США 56,8 % всего объема производства этилового спирта выпускается на мелких фермерских хозяйствах с производительностью 117 тыс. т в год, 29,3 % на средних предприятиях с производительностью 390 тыс. т в год, и всего 13,9 % на крупных предприятиях с производительностью по этанолу 550 тыс. т в год. Диаграммы на рис. 1.7 и 1.8 наглядно иллюстрируют соотношение числа производителей и количества вырабатываемого этанола предприятиями различной мощности.

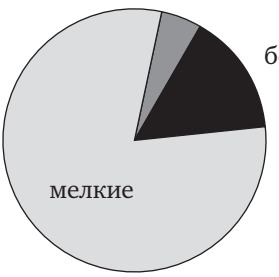

Рис. 1.7. **Соотношение числа больших, мелких и средних предприятий — производителей этанола в США [13]**

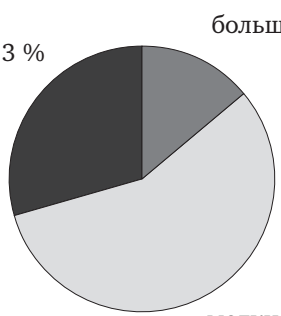

Рис. 1.8. **Количество этилового спирта, % общего объема производства в США, выпускаемого на больших (7), средних (2) и мелких (3) предприятиях [13]**

При этом важную роль играет возможность комплексного использования сырьевых источников этанола. Задача наиболее полного использования растительного сырья при производстве этанола имеет экономическое и экологическое обоснование. Так, комбинированная переработка кукурузы на глютен, крахмал и спирт, а картофеля

на крахмал и спирт позволяет увеличить коэффициент использования крахмала до 85 %, снизить себестоимость этилового спирта.

На схеме рис. 1.9 показана наиболее общая схема комплексной переработки растительного сырья химическими и микробиологическими методами с получением разнообразных продуктов: сахара, этанола, клеточной биомассы, углекислого газа, метана и метанола, электроэнергии, которая практически в полном объеме не реализуется. В зависимости от возможности предприятия и потребности в конечных продуктах исходное растительное сырье перерабатывают более направленно, что представлено на следующих структурных схемах производств.

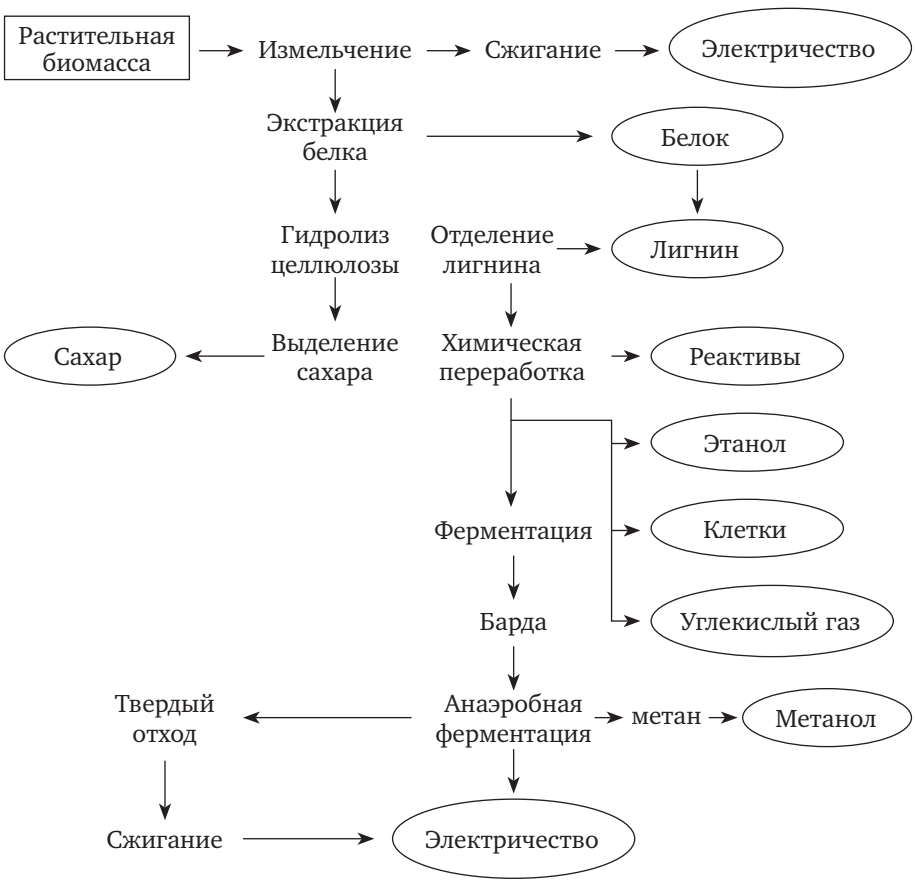

Рис. 1.9. **Комплексная биотехнология переработки растительной массы в этанол и другие продукты**

Применение в фермерских хозяйствах комплексной переработки производимой ими продукции позволяет значительно повысить доходную часть бюджета хозяйств в результате получения ценных продуктов и значительно уменьшить количество отходов. На рис. 1.10 представлена схема переработки растительного субстрата на примере сахарного тростника.

Переработка сахарного тростника обеспечивает получение из 140 т полевого сбора продукта до 12 т этанола, в качестве сопутствующих продуктов могут быть получены как чистые сахара (глюкоза, фруктоза, ксилоза), так и меласса.

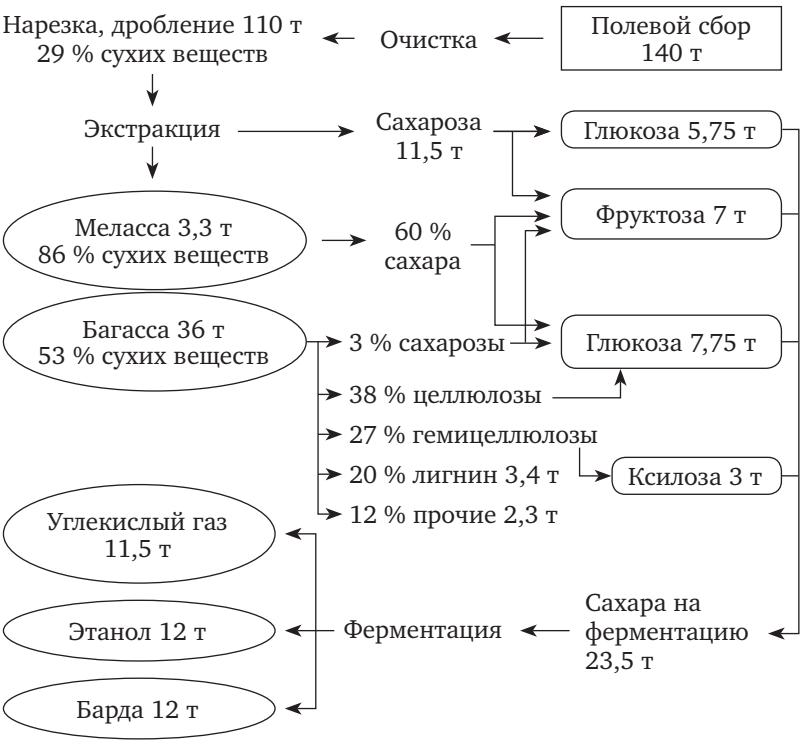

Рис. 1.10. **Комплексная переработка сахарного тростника на этанол и сахар**

При переработке картофеля на специализированных крахмальных заводах лишь 75—92 % крахмала извлекается в виде товарного продукта, а остальная переходит в отходы. Сахара и белковые вещества, содержащиеся в клеточном соке, а также часть крахмала теряются с промывными водами. Технологическая схема получения крахмала комбинированным способом упрощается, не требуется полного измельчения картофеля (рис. 1.11), коэффициент использования крахмала, содержащегося в картофеле, увеличивается до 95 %.

В качестве отхода производства этанола из картофеля получают барду, которая легче подвергается последующей микробиологической переработке по сравнению с картофельной мезгой.