

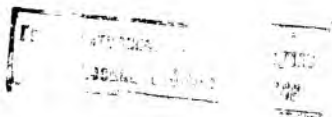
27-87  
25478

Бойлс Д. Биоэнергия: технологи, термодинамика, издержки / Пер. с англ. М. Ф. Пушкарева; Под ред. Е. А. Бирюковой. — М.: Агропромиздат, 1987. — 152 с.

Запасы ископаемых источников энергии на Земле ограничены. Поэтому во многих странах ведутся поиски альтернативных источников энергии. Получение дешевой биоэнергии — один из возможных путей решения проблемы. Биотопливо можно получить путем сжигания биомассы, ее сухой перегонки, гидролиза, ферментации, анаэробного разложения и т. п. В некоторых странах налажено производство моторного топлива из биомассы. В настоящее время пока нет крупных экономически выгодных установок для производства биотоплива, однако интенсивные исследования, ведущиеся в этом направлении, возможно, позволят превратить биотопливо в надежный и дешевый источник энергии.

Иллюстраций 22, таблиц 66, список литературы 164 названия.

287-86560a



Предлагаемая книга — результат анализа преимуществ и недостатков биоэнергии. Несмотря на то что биоэнергия — возможный конкурент нефти, вопрос успешного ее использования стал предметом самого пристального внимания со стороны сотрудников нефтяных компаний, что, в свою очередь, дало толчок к проведению широких исследований в этой области.

За последние сто лет не раз высказывалось мнение о возможности получения топлива на основе переработки биологических материалов. К этой проблеме возвращались неоднократно. В различные периоды высказывались опасения относительно истощения природных запасов жидких углеводородов. Возникла также проблема использования побочных продуктов сельского хозяйства. В течение 30-х годов прошлого столетия, а также на протяжении последнего десятилетия пропагандировалось использование этанола и растительных масел в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания. Однако попытки получения биоэнергии каждый раз прерывались относительным накоплением запасов нефти, что уменьшало значение таких экспериментов.

В настоящее время возникла необходимость беспристрастной и объективной оценки биоэнергетических процессов. Сторонники этого направления предсказывают наступление века изобилия дешевой энергии, производимой почти без ущерба для окружающей среды, а также с использованием безъядерной технологии. При этом они утверждают, что даже если эти процессы окажутся в настоящее время дорогостоящими, усовершенствование их и повышение цен на ископаемые источники энергии в конечном счете сделают их конкурентоспособными. Насколько эти утверждения справедливы? Можно ли дать количественное определение степени изобилия, дешевизны и чистоты биологической энергии, а также установить, когда ее производство станет рентабельным? Кроме того, нас постоянно волнует вопрос, действительно ли в наше распоряжение поступит больше первичной энергии или же биоэнергия просто будет переводить ископаемые материалы в другие виды топлива? В конечном итоге скрытые затраты энергии, возможно, явятся причиной нерационального расходования имеющихся видов ископаемого топлива.

В предлагаемой книге сделана попытка ответить на эти вопросы. Однако, несмотря на обилие литературы, появившейся за последние годы, объем материалов по данному вопросу незначителен. Промышленное значение биоэнергетических процессов тонет в массе технических деталей. И хотя существуют утверждения об экономичности некоторых видов биотоплива, удачных промышленных установок для его использования нет. Принятие на вооружение биоэнергетических процессов на практике часто имело место в результате государственного

3802000000 — 483  
Б 123—87  
035 (01) — 87

© 1984 D. T. Boyles/Ellis Harwood Limited  
© Перевод на русский язык, ВО "Агропромиздат", 1987

субсидирования, осуществлявшегося скорее по социально-политическим, чем по экономическим соображениям. Энергетические и экономические расчеты проводились различными специалистами по-разному, при этом часто решающую роль играло их отношение к данному вопросу.

Иногда неоправданно большое значение придается побочным продуктам биоэнергетических процессов. Такой подход по меньшей мере только усложняет понимание вопроса, оставляя читателя в недоумении относительно того, является ли биотопливо объектом широкомасштабной промышленной разработки или оно остается только предметом надежд противников использования ядерной энергии. При написании настоящей работы автор ставил своей задачей сформулировать по крайней мере вопросы, которые можно было бы задать при обсуждении предложений об использовании биоэнергии. Кроме квалифицированных технических описаний, необходима разбивка издержек по основным составляющим элементам, определение воздействия на них ряда факторов, а также социальных последствий и влияния биоэнергетики на окружающую среду в долгосрочном плане. Ответы должны быть представлены с точки зрения перспектив развития биоэнергии, а также состояния мировой экономики. Необходимы ссылки на существующие и применявшиеся в прошлом биоэнергетические процессы, протекающие на основе использования аналогичного исходного материала или характеризующиеся аналогичным ходом реакций. Необходимо знать, насколько эти процессы экономичны. Биоэнергия — это дисциплина, где представления о реально существующем и возможном часто подменяют друг друга.

Хотя в целом результаты настоящего исследования не являются оптимистичными, мы можем утверждать, что существуют некоторые факторы, способные изменить перспективы использования биоэнергии. Ниже дается анализ указанных факторов. Один из них — научно-исследовательские разработки. В книге рассматривается влияние технологических нововведений на полные издержки производства биоэнергии. В некоторых районах земного шара биоэнергия — единственно доступный вид энергии, и, подобно тому, как в прошлом мы могли удовлетворять наши потребности в энергии за счет биологических источников, развивающиеся страны в течение некоторого времени смогут также удовлетворять свои потребности за счет этого вида энергии. Высказывалось мнение, что для таких стран было бы предпочтительнее совершенствовать развитие производства биоэнергии, чем следовать путем, проторенным индустриальными странами в области производства ископаемого и ядерного топлива. Вопрос о том, согласятся ли с этим народы, полагающиеся на биологические источники энергии, является спорным.



## ГЛАВА

# ПОТРЕБНОСТЬ В БОЛЬШОМ КОЛИЧЕСТВЕ ДЕШЕВОЙ ЭНЕРГИИ

### 1.1. ЭНЕРГИЯ, ЭНТРОПИЯ И ПОЛЕЗНАЯ РАБОТА

**Роль энергии.** Ежегодное мировое потребление нефти для производства энергии составляет 7000 млн. т (с пересчетом на нефть других источников энергии). Торговля энергоносителями по объему превосходит все прочие статьи. Значение энергии не нуждается в комментариях, так как ни один вид человеческой деятельности не может осуществляться без использования тех или других форм энергии. Любая угроза перерыва в обеспечении энергией вызывает тревогу. За последнее время такие угрозы нашли свое выражение в росте цен, эмбарго, а также прогнозах относительно появления дефицита энергетического сырья в будущем. Ответной реакцией на эти угрозы явилось повышение интереса к разработке новых источников и форм энергии.

Перед тем как перейти к рассмотрению одной из новых форм энергии — биоэнергии, необходимо проанализировать роль энергии в жизни и деятельности человека. В сущности, энергия в форме топлива служит для установления и поддержания упорядоченности существующего материального мира. Транспорт, строительство, потребительские товары и т. д. представляют собой перераспределение (упорядочение) сырья и промышленных материалов, обеспечивая построение общества желаемой структуры. Конечные издержки определяются не энергией, которая не создается и не уничтожается (1-й закон термодинамики), а энтропией, которая неуклонно увеличивается по отношению ко всей системе (2-й закон термодинамики). В ходе многих процессов, способствующих повышению степени упорядоченности, происходит деградация высококалорийного (энергетического) топлива, а его энергия становится малоэффективной.

Как в природе, так и в процессе деятельности человека осуществление созидательных изменений требует энергетических затрат. Организация и рост как таковые — энтропически неблагоприятные процессы; они могут существовать только в сочетании с общей энтропией в процессе деградации энергии. Результатом такого сочетания является полезная работа, или создающая энергоемкие материалы, или распределяющая

материальные компоненты на благо организма, независимо от того, является ли этот организм живой или социальной формой. Как живой, так и социальные организмы требуют для своего построения и функционирования специфических видов топлива.

**Рост и сложность структуры и функций организмов.** Наиболее очевидное отличие живых организмов от других объектов физического мира — их сложность. Образование ископаемых отложений и история развития человеческого общества демонстрируют непрерывный характер усложнения организмов. Чем сложнее структура и функции организма, тем больше энергии требуется для его построения и жизнеобеспечения. Энергия обеспечения роста должна превышать минимальный уровень энергии, необходимый для поддержания жизнеспособности организма. Там, где обеспеченность энергией ниже минимального уровня, организм должен или адаптироваться, или погибнуть. Там, где обеспеченность энергией выше минимального уровня, но ниже избыточного, на скорость роста влияет ряд ограничений. Для максимального роста энергия и другие материалы должны находиться в избытке.

Эти ограничения можно продемонстрировать значительно более ярко на примере естественных организмов, чем на примере созданной человеком экономики. В последнем случае показать роль энергетических факторов в ограничении роста затруднительно. Существует много других неконтролируемых ограничивающих факторов. Кроме того, экономика человеческого общества не связана неизменными генетическими кодами; она обладает способностью к относительно быстрой адаптации. Тем не менее человеческая деятельность также зависит от количества доступной энергии, и угроза возможного ее дефицита вызывает некоторую обеспокоенность.

Характерной чертой даже самой мелкой микробной клетки является то, что основная доля энергии, обеспечивающей ее рост, идет не на синтез энергоемких продуктов, а на правильное размещение молекул в клетках организованных групп и структур [1]. В качестве примера можно привести процессы, происходящие в дрожжах (*Saccharomyces cerevisiae*) (табл. 1). Энтальпия метаболизма расходуется в основном на увеличение выхода энтропии и в очень малой степени — на

Таблица 1. Деградация энергии при анаэробном росте дрожжей

Вещество	Энтальпия катаболизма	Свободная энергия гидролиза АТФ (2 моль)	Энтальпия клеточного синтеза
Потребленная глюкоза, ккал/моль	-31	-14,6	+0,23

синтез калорийного клеточного материала. Энергообеспечение фактически достаточно для образования десятикратного количества растительного материала (даже с учетом потерь при регенерации АТФ). Определенная доля энергии необходима для клеточной организации.

В отношении человеческой деятельности характер использования энергии является аналогичным, т. е. основная доля энергии идет не на производство высококалорийных материалов или высокоэнергетических структур, а на наведение порядка (упорядочение) и на установление структуры и функций. Здесь принимают участие мириады необратимых процессов, вызывая громадный рост энтропии.

**Анализ чистой энергии.** Следствия этих простых наблюдений являются далеко идущими. Например, потребление энергии часто рассматривается с точки зрения использования высококалорийных видов топлива для целей обогрева и в сфере транспорта. В то время как значительные потери энергии происходят в процессе использования топлива, в немалой степени деградация энергии имеет место при очистке и транспортировке топлива, а также при строительстве установок для его сжигания. Даже такие виды деятельности, как предоставление услуг, на первый взгляд не требующие больших затрат энергии, предполагают определенные косвенные расходы энергии. Например, расходы на услуги идут в конечном счете на оплату энергоемких товаров и других услуг, требующих энергетических затрат.

За последние годы не раз задавался вопрос, какое количество энергии идет на производство различных товаров и оказание услуг. Ответ на этот вопрос найти трудно, поскольку он частично зависит от формулировки самой проблемы. Один из методов, описанный Райтом [2], заключается в проведении расчетов, основанных на данных официальной статистики; расчеты дают общий расход энергии при производстве различных товаров в ряде отраслей промышленности. Типы вводимых ресурсов, используемые различными авторами, достаточно ярко иллюстрируют преобладающую роль энергии в странах с развитой экономикой.

При анализе чистой энергии затраты всех топливных ресурсов при производстве какого-либо предмета или его компонентов прослеживаются вплоть до потребления первичной энергии. Можно также принимать в расчет исходные энергетические затраты при производстве импортируемых материалов, так как эти затраты представляют собой потребление первичной энергии. Капитал можно относить, а можно и не относить к затратам энергии; здесь, однако, существует простая зависимость. В расчеты могут быть включены (и иногда включают) формы энергии, представленные рабочей силой, прибылями и солнечной радиацией (например, в сельском хозяйстве). Затраты первичной энергии, необходимые для производства товаров и оказания услуг, получаемых человеком в качестве вознаграждения за свой труд, — не всегда компоненты энергетического анализа [3]. Некоторые виды сырья, используе-

мые для производства промышленной продукции, сами по себе высоко-энергоёмкие материалы. Эти виды сырья, обычно включаемые в расчёты, могут привести к необыкновенно высоким показателям энергетических затрат. В таблице 2 [2] приводятся типичные данные по затратам и выходу энергии; при этом энергетические затраты не включают капитальные, трудовые затраты, затраты солнечной энергии и прибыли. Для сравнения приводится теплотворная способность самих произведённых товаров. Как видно из таблицы, энергия, используемая для производства продукта, может быть значительно выше, чем теплота сгорания самого продукта.

Таблица 2. Затраты энергии на производство отдельных товаров и теплотворная способность этих товаров

Товар	Затраты энергии, ГДж/т	Теплотворная способность сухого вещества, ГДж/т
Сахар	21	16,5
Бумага	61	17,5
Древесная масса	28	17,5
Соевое масло	18	42
Хлопок	57	17,5
Удобрения (в среднем)	31	—
Синтетический каучук	129	40
Краска	144	40
Сталь	12	—
Медь	80	—

К вопросу энергетических затрат мы вернемся позднее, так как эти затраты необходимо учитывать при оценке эффективности процессов производства топлива. Если нас волнует вопрос итоговых запасов энергии, то эти процессы должны давать больше топлива, пригодного для использования, чем то количество, которое было потреблено для осуществления этих процессов, т. е. выход топлива должен превышать его потребление. Например, биоэнергетические процессы сложны и предполагают значительные затраты энергии; сюда могут входить скрытые затраты энергии, полученные за счет общих затрат энергии других энергопотребляющих производств национальной экономики. Это не означает истощение других источников энергии. Нашей целью должно быть получение экономически целесообразного максимального результата от использования имеющихся запасов топлива.

## 1.2. МАСШТАБЫ, ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПЛОТНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ

Использование энергии в определенных целях предполагает учет трех основных факторов: наличия достаточных запасов энергии, эффективности и нормы ее использования. Продуктивность представляет собой сочетание указанных трех факторов.

**Изобилие энергии.** Здесь снова можно провести аналогию между живыми клетками и экономическими системами. В качестве топлива клетки используют неорганические молекулы (хемодитотрофы), органические молекулы (гетеротрофы) или солнечную радиацию (фотоауто-трофы). Однако источник энергии — только один из многих факторов, ограничивающих рост организмов в биосфере: часто более важные лимитирующие факторы — температура, питательные вещества, вода и болезней. Попытки продемонстрировать годовые колебания выхода продуктов фотосинтеза в зависимости, например, от солнечной радиации обычно оказывались неудачными [4]. В природе успех в меньшей степени заключается в обнаружении скудных источников энергии, чем в адаптации к наличию избыточных ее запасов. До сих пор существуют виды окружающей среды, например море или пустыня, где адаптация организмов очень низкая, а использование значительной энергии светового потока очень слабое.

Таблица 3. Мировое потребление первичной энергии (1981 г.)

Источник энергии	Млрд. т нефтяного эквивалента	Млрд. ГДж
Нефть	2,9	131
Газ	1,3	60
Уголь	2,0	90
Вода	0,4	19
Ядерное горючее	0,2	8
В с е г о	6,8	308

Подобно этому человек всегда был окружен громадным числом различных форм энергии и лишь очень медленно учился их использовать. Сначала получение энергии шло путем биохимического окисления готовых углеродных соединений, содержащихся в животной и растительной пище. Затем энергию стали получать путем сжигания сухой растительной биомассы (древесины) на воздухе при высокой температуре. Позднее для получения энергии начали сжигать более концентрированные остатки отмерших клеток в форме угля и нефти. Наконец, человек научился использовать энергию уже не молекулярных, а атомных связей. Уровень

общей потенциальной энергии всегда был высоким, но способы ее использования отсутствовали.

Как видно из таблицы 3, мир в настоящее время потребляет огромное количество энергии [5]. Потребление энергии биомассы, т. е. древесины, навоза и т. д., в таблице не показано из-за отсутствия достоверных данных. Большое количество используемой биомассы собирается в частном порядке и не является предметом торговли. Тем не менее 10–25 % общего мирового потребления энергии приходится на биомассу. Производство и торговля энергетическим сырьем значительно превышают по объему производство сырой биомассы и продуктов фо-

Таблица 4. Мировое производство товаров и ископаемых видов топлива (1981 г.)

Источник энергии	Мировое производство, млрд. т/год
Древесина	1,5
Зерновые и картофель	1,6
Сахар	0,09
Семена масличных культур и фрукты	0,15
Целлюлоза	0,023
Натуральный каучук	0,004
Сырая нефть	2,9
Уголь	3,1

тосинтеза (табл. 4) [6]. Теплотворная способность нефти в 2–3 раза выше теплотворной способности сухой биомассы. В результате общая энергия одной только сырой нефти превышает энергию всей биомассы, получаемой промышленным путем в мировом масштабе. Для поддержания уровня жизни, существующего в настоящее время в развитых странах, и для достижения аналогичного уровня жизни в развивающихся странах потребуется использование разнообразных форм энергии. В главе 2 рассматривается вопрос возможностей получения достаточного количества биоэнергии из собранной биомассы.

**Эффективность использования энергии.** Эффективность использования химической энергии организмами для осуществления своего роста и жизнедеятельности высокая. Вероятно, это является результатом естественного отбора. Эффективность производства промышленных товаров человеком также возросла по истечении начального периода индустриализации [7]. В итоге национальные уровни эффективности использования энергии в промышленном секторе сближаются [8]. Разница в использовании энергии, которая действительно существует между странами, обусловлена не столько непроизводительными

потерями, сколько различиями в системе транспорта, характере развития промышленности, различиями в индивидуальном и промышленном использовании энергии, а также различиями в потерях при преобразовании энергии [9]. Теоретические возможности повышения эффективности промышленного использования энергии все еще значительные [10], так как различные виды топлива потенциально могут выполнить намного больше работы, чем это имеет место в настоящее время. Даже в периоды "изобилия" энергии энергосбережение стимулируется существованием оптимального уровня издержек. Для эффективного использования энергии часто требуются капиталовложения. Однако по иронии судьбы в период "нехватки" энергии наблюдается и недостаток свободного капитала [11]. При подорожании энергии в результате ее нехватки может иметь место переход к менее эффективным, но более дешевым методам ее использования.

**Плотность энергии.** При определении сроков, необходимых для завершения определенной программы, большую роль играет интенсивность использования имеющихся запасов топлива. Сложные системы требуют больше энергии, чем простые. При необходимости выращивания организмов в определенные сроки интенсивность подачи энергии должна быть высокой. Это требование предполагает необходимость наличия более энергоемких источников, в противном случае системы будут развиваться и функционировать крайне медленно. Сам по себе крупный источник энергии является недостаточным, он должен быть представлен в форме концентрированного топлива. Например, человек по характеру своего метаболизма не является фотоаутоτροφным организмом. Тип его питания – гетеротрофный; он использует концентрированную энергию животных и растений. Солнце – крупный источник энергии, однако вследствие большой удаленности оно может обеспечить только относительно небольшой поток энергии. Медленно растущие, неактивные, малоподвижные организмы, такие, как растения, могут жить за счет солнечной радиации, так как значительная площадь растения подвергается ее действию. Для своей жизнедеятельности человек нуждается в более плотных формах энергии. Подобно этому, по мере развития технологии, в промышленности наблюдалась тенденция к использованию все более концентрированных источников энергии. Как мы увидим, прежде чем использовать солнечное тепло, необходимо превратить солнечное тепло в энергоемкое топливо.

Энергетическая плотность различных источников энергии, используемых человеком, представлена в таблице 5. Урановая руда, несмотря на то что она может содержать менее 1 % урана, имеет энергетическую плотность примерно в 500 раз выше, чем сырая нефть. Уголь – более энергоемкий источник, чем нефть (в весовом отношении энергоемкость нефти составляет 45 ГДж/т, а угля – 29 ГДж/т). Дерево является менее энергоемким материалом, чем уголь или нефть. Далее, в порядке умень-

шения энергоёмкости следуют геотермическая энергия, текущая вода, солнечный свет и ветер.

Таблица 5. Энергоёмкость источников энергии

Источник энергии	Энергоёмкость, МДж/м <sup>3</sup>
Урановая руда	$20 \times 10^6$
Сырая нефть	$36 \times 10^3$
Уголь	$55 \times 10^3$
Древесина	$9 \times 10^3$
Геотермальная энергия	24
Текущая вода (5 м/с)	$1 \times 10^{-3}$
Солнечный свет	$2 \times 10^{-4}$ (МДж/м <sup>2</sup> /с)
Ветер (5 м/с)	$2 \times 10^{-5}$

Кроме энергоёмкости материалов, приведенных в таблице 5, существует еще один, менее осязаемый фактор, определяющий полезность этих материалов как видов топлива. Этим фактором является их физическое состояние. Так, нефть ценится больше, чем уголь, так как она представляет собой жидкость, что облегчает погрузку, разгрузку, транспортировку и хранение. Аналогично этому геотермальная энергия, энергия текущей воды и энергия ветра находят широкое применение, несмотря на их низкую энергоёмкость. Ценность топлива также сильно зависит от характера его использования. Например, топливо для транспорта ценится больше, чем топливо для систем обогрева.

Сказанное освещает только качественные аспекты оценки источников первичной энергии в отношении их пригодности для производства топлива. Второй закон термодинамики не позволяет количественно оценить эффективность перевода нетепловых источников энергии (например, солнечного света) в полезную работу. Однако он указывает на трудности, связанные с концентрацией и использованием таких "разбавленных" форм энергии, а также налагает определенные ограничения на полезную работу, которая может быть получена на основании тепла, высвобождаемого в результате окисления горючих материалов.

### 1.3. ИСТОРИЯ ВОПРОСА ПОТРЕБЛЕНИЯ И СТОИМОСТИ ЭНЕРГИИ

**Потребление энергии в Англии.** Потребление энергии и экономический рост находятся в тесной связи [9, 12, 13]. Индустриализация требует увеличения количества топлива с высокой теплотворной способностью. Энергия должна быть дешевой и доступной как с точки зрения стоимости, так и с точки зрения требующихся затрат труда. Тип используемой энергии может широко варьировать в зависимости от страны

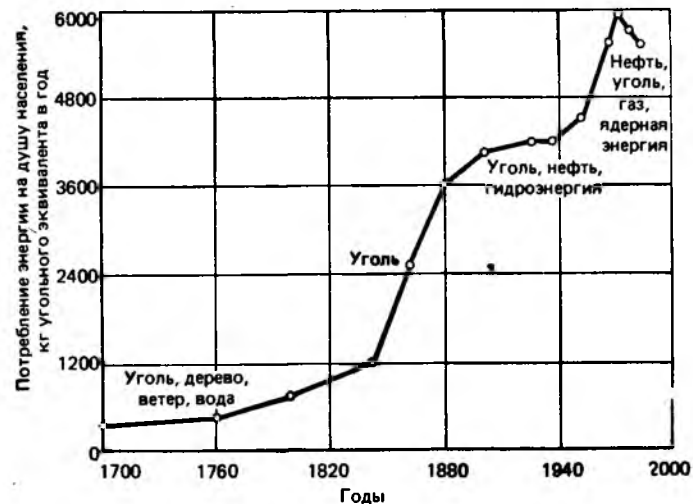


Рис. 1. Потребление энергии на душу населения в Великобритании в 1700–1981 гг.

и различных стадий экономического развития. Имеется достаточно данных по потреблению энергии в Англии начиная с 1700 г. [4]. Несмотря на некоторые неопределенности в отношении самих данных, а также их интерпретации, мы можем отметить существование ясно выраженных тенденций. Данные, опубликованные в работе [4], а также статистические данные за 1981 г. [14] приведены на рисунке 1.

Потребление энергии возрастало на протяжении всего периода до 70-х годов нашего столетия, при этом в конце XIX столетия, а также в 50-х и 60-х годах его рост был особенно интенсивным. На рисунке 1 показаны виды топлива, использовавшиеся в этот период. В начале периода основным топливом служила древесина (древесный уголь); при этом следует отметить, что уголь использовали в обиходе начиная с XII века. В этот период важную роль играли также такие источники энергии, как вода и ветер. В течение XVIII столетия древесина стала очень дорогой, была разработана технология использования угля в сталелитейной промышленности, и древесина уступила место углю. В XIX столетии стала использоваться нефть, сначала в качестве топлива для морского и наземного транспорта, а затем во все больших масштабах — для общих целей. В 60-х годах нефть вытеснила уголь, став основным источником энергии в Англии. Хотя водные источники энергии также существовали, они были незначительными и в 70-е годы уступили место природному газу и ядерной энергии. Характер потребления первичной энергии в Англии в настоящее время представлен в таблице 6.

Таблица 6. Потребление первичной энергии в Англии (1982 г.)

Источник энергии	Млрд. т нефтяного эквивалента	Млрд. ГДж
Нефть	65,4	3,4
Газ	42,2	1,9
Уголь	65,1	3,1
Вода	1,4	0,06
Ядерное горючее	9,4	0,4
Всего	183,5	8,8

Энергия и экономический результат. Зависимость между потреблением энергии и экономическим развитием Англии показана на рисунке 2 [6]. Потребление энергии на единицу выпускаемой продукции варьировало, при этом максимум приходится на период индустриализации конца XIX столетия. Затем наблюдалось уменьшение этого отношения, что говорит о повышении эффективности использования энергии. Вопрос об отношении энергии к валовому внутреннему продукту привлек значительное внимание, так как во многих странах с ростом благосостояния увеличивалось потребление энергии. Получила распространение концепция эластичности энергии, или изменения потребления энергии в зависимости от изменений экономической активности. После завершения индустриализации в большинстве стран, по-видимому, установилась постоянная и аналогичная степень эластичности энергии [15, 16]. Однако за последнее десятилетие в развитых странах рост цен на топливо, возможно, вызвал сокращение расходов энергии по наименее важным статьям [17]. В Великобритании за последние годы отношения "энергия/валовой внутренний продукт" и энергетические коэффициенты были неустойчивы [18]; это происходило, возможно, в результате отхода от энергоемкой промышленной технологии.

Современные стадии экономического развития отдельных стран характеризуются громадными различиями. В странах с низким доходом наблюдается небольшое потребление энергии (рис. 3). Что касается исторических тенденций, то страны, находящиеся на стадии индустриализации (т. е. страны со средним доходом и индустриальные страны с нерыночной экономикой\*), характеризуются меньшим выходом продукции на единицу использованной энергии, чем индустриальные страны с рыночной экономикой. На основании рисунка 3 можно сделать вывод, что в менее развитых странах стоимость энергии с точки зрения затра-

\*Под странами с нерыночной экономикой подразумеваются главным образом социалистические страны. — Прим. ред.

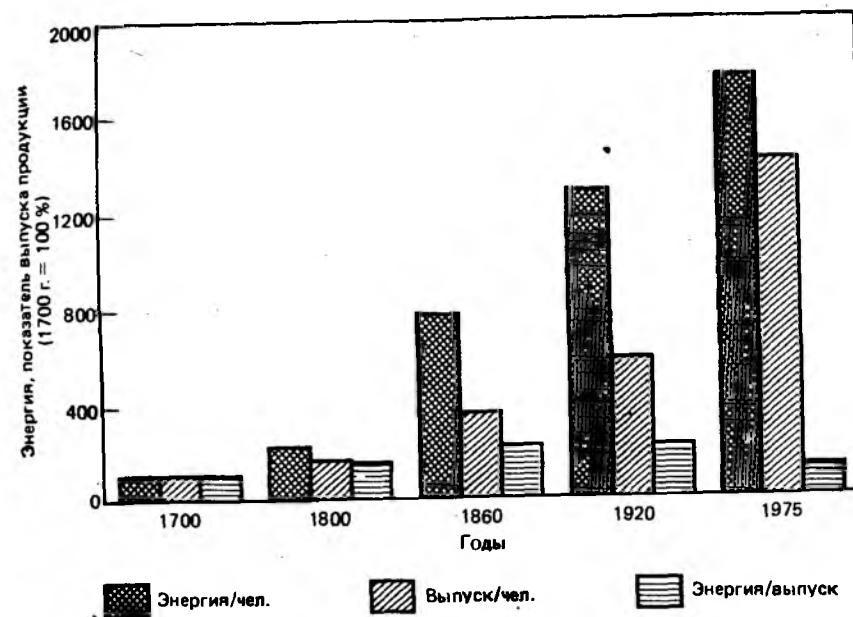


Рис. 2. Энергия и экономический результат.



Рис. 3. Благосостояние и потребление энергии.

ченного человеческого труда более высокая, чем в развитых странах. Хотя это более очевидно для таких видов топлива, как уголь и нефть, имеющих международное значение, это также верно для древесины, которую можно использовать не только как топливо. В таблице 7 дается примерный расчет среднего количества человеко-часов, необходимого для оплаты 1 ГДж энергии; расчеты даны по четырем типам стран. Для древесины, угля и нефти издержки приняты равными соответственно 0,9; 1,1 и 4,33 долл. на 1 ГДж.

Таблица 7. Среднее количество человеко-часов, необходимое для получения 1 ГДж энергии в странах с различными типами экономики

Источник энергии	Страны с патриархальным укладом	Страны – импортеры нефти со средним уровнем дохода	Индустриальные страны с рыночной экономикой	Индустриальные страны с рыночной экономикой
Нефть	46	32	8	4
Уголь	37	8	2	1
Древесина	30	6	2	1

**Стоимость энергии.** Мы теперь перешли к стоимости потребляемой энергии. В краткосрочном плане этот вопрос более острый, чем вопрос нехватки или избытка энергии. Если брать средние показатели за длительный период, т. е. за десятилетия или столетия, то можно сделать вывод, что энергия постепенно становилась дешевле. Для устранения влияния инфляции стоимость энергии может быть выражена в единицах эквивалентных товаров и услуг [12]. В период между 1920 и 1970 гг. цены на сырую нефть снизились в 7 раз (в пересчете на эквивалентные товары и услуги – рис. 4); фактическая же стоимость нефти в этот период составляла 1–3 долл. за баррель [19]. Издержки в угольной промышленности в течение XX столетия, несмотря на повышение эффективности производства, во многих районах не выдерживали конкуренции с издержками в нефтяной. В послевоенные годы как в США, так и в Великобритании нефть стала основным источником энергии. На рисунке 5 показан переход от использования угля к использованию нефти в Великобритании в 60-е годы. Предпочтение, отдаваемое нефти, было связано с ее более ценными, чем у угля, физическими свойствами, а также с относительно низкой ценой. Аналогичная картина наблюдалась в XVII веке в отношении цен на древесину и уголь [4]. История замены одного вида топлива другим представляет особый интерес, так как, возможно, мы живем в период, когда нефть будет заменена другой формой энергии. Будет ли это "возобновляемая" или ядерная энергия – зависит от таких

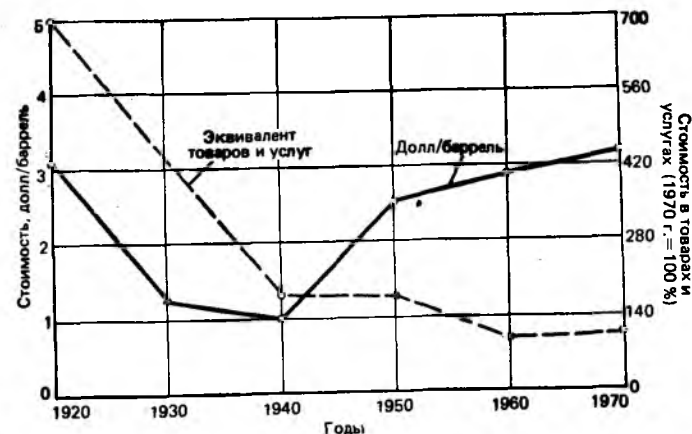


Рис. 4. Стоимость сырой нефти в 1920–1970 гг.

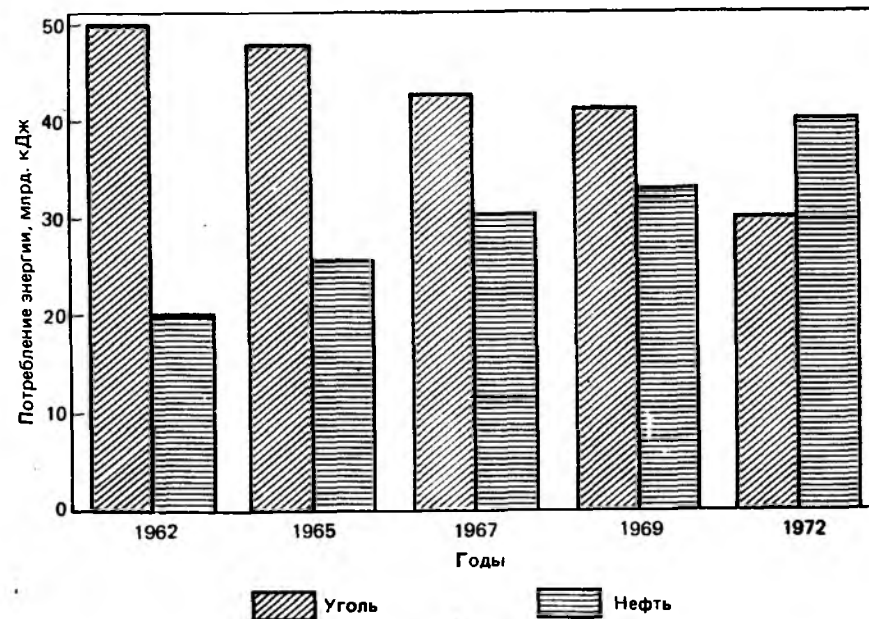


Рис. 5. Уголь и нефть в Великобритании.



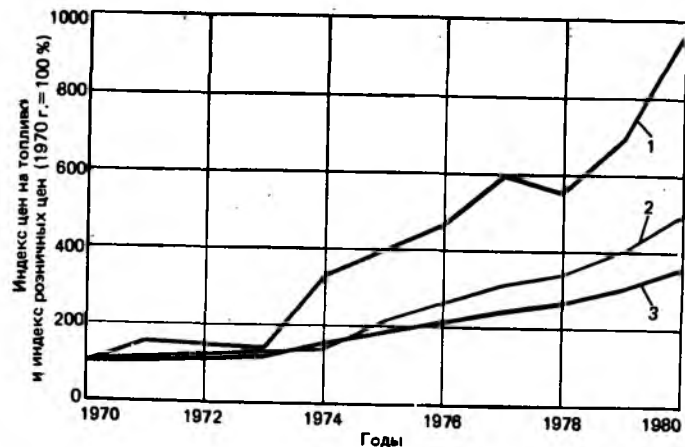


Рис. 6. Тенденции цен на топливо в 1970–1980 гг.:

1 – нефть как топливо для промышленности; 2 – уголь для промышленности; 3 – индекс розничных цен.

факторов, как цена и удобство использования, которые сыграли свою роль в прошлом.

**Нефтяной кризис.** История использования энергии и ее стоимости будет неполной, если не упомянуть события последних 10 лет. Хорошо известны два скачка цен на нефть, вызванных нефтяным картелем, с последующим спадом и избытком нефти. Цены на нефть в промышленности Великобритании в период 1970–1980 гг. представлены на рисунке 6. Хотя за этот период наблюдался рост всех цен, как это видно из динамики индекса розничных цен, рост цен на нефть и уголь был наиболее существенным. Именно в результате указанных повышений цен, а также прогнозов относительно дальнейшего роста цен и истощения углеводородных видов топлива в 90-х годах возник и продолжает расти интерес к использованию возобновляемых видов энергии.

Являются ли события последних 10 лет только временным отклонением в истории потребления энергии, или они предвещают фундаментальные изменения в ценах на энергоносители? Вопрос очень важный. Несмотря на то что в развитой стране доля валового национального продукта, приходящаяся на энергетические ресурсы, является небольшой (например, в США она составляет около 5% – экстрагирование, подготовка и переработка топлива [9]), обычно считается, что для экономического роста необходим избыток дешевой энергии. Если явления прошедшего десятилетия являются временными, то в итоге будет найден вариант замены подорожавших видов топлива более дешевыми. В ряде стран уже наблюдался отход от использования нефти. В Англии нефть

была частично заменена природным газом. Во Франции предпочтительным вариантом стала ядерная энергия. Однако, если доступность более дешевых видов топлива представляет собой только временное явление, мировая экономика может испытать серьезные затруднения [20, 21]. Биоэнергия может быть дешевым (а может, и не таким дешевым) видом топлива, конкурирующим с обычными видами, но может быть и дорогостоящим видом, конкурирующим с другими дорогостоящими видами топлива в условиях уменьшающегося объема валового национального продукта. Вероятно, первый вариант является более благоприятным для биоэнергии, так как уменьшение валового продукта означает снижение спроса на все виды энергии, включая биоэнергию. Это контрастирует с точкой зрения, высказываемой сторонниками биоэнергии, что век биоэнергии наступит благодаря все большему подорожанию ископаемых видов топлива.

#### 1.4. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЭНЕРГИИ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЗАТРАТ

**Экономика и термодинамика.** В целом топливо является более дешевой статьей, чем промышленные товары и услуги, определяющие национальное богатство. Например, стоимость угля составляет от 10 до нескольких десятков фунтов стерлингов за 1 т в зависимости от способа добычи. Стоимость добываемой нефти составляет от нескольких до, вероятно, 60 ф. ст. за 1 т, в то время как ее продажная цена может быть значительно более высокой. В сравнении с этим стоимость промышленных товаров может быть на несколько порядков выше. Несмотря на то что топливо необходимо при любых видах экономической деятельности, его стоимость представляет собой только незначительную часть общих затрат. Одно время существовала тенденция классифицировать проекты просто с точки зрения энергетических затрат [22], однако такой подход не нашел широкого распространения. В этой связи ставился вопрос о целесообразности проведения такого анализа до сих пор отстаетается его сторонниками [24].

С другой стороны, экономическое значение эффективного использования топлива являлось предметом изучения в течение столетий. Проблема получения максимально полезной работы на основании тепловой энергии привела к формулировке общих законов термодинамики. Эти законы формируют основу технических вопросов использования энергии, сохранения энергии и эффективности производства новых видов энергии. Однако суммирование показателей стоимости и продуктивности энергии не характеризует эффективность всего процесса использования топлива. Продуктивность рабочей силы, сырья (иного, чем энергия), а также земли сама по себе также не определяет степени жизнеспособности этого процесса.

**Общая факторная продуктивность.** Понятие "совокупная производительность факторов производства" было описано Берндтом [11]. Он представляет целый ряд выводов, касающихся стоимости и энергетической ценности биоэнергии. Эти выводы заключаются в следующем. Энергия является только одним из многочисленных дорогостоящих вводимых факторов производства. Общая энергия, которой обладает топливо, не равна энергии, которая может быть использована для практических целей. В основном максимизация продуктивности энергии не согласуется с минимизацией общих затрат. Раскладка использования энергии в обществе может способствовать пониманию вопроса конечного потребления энергии. Эта проблема не должна рассматриваться отдельно от необходимости максимизации продуктивности всех имеющихся ресурсов. Высокие цены на энергию могут привести к существенно повышению эффективности ее использования, а также к замещению затрат труда в энергетике. Сохранение энергии может также быть достигнуто путем использования капиталоемкого оборудования. Однако темпы роста вложений в основные средства снижаются, а экономический рост замедляется в результате повышения реальных цен на энергию.

Что все это означает для биоэнергии? Дело в том, что мы не судим о процессе только на основании энергетических балансов. Однако важно знать, является ли биоэнергия чистой добавкой к запасам первичной энергии, особенно когда возникает вопрос о крупных государственных субсидиях. Если нет, то из первичных источников энергии следует получить ценные виды топлива при издержках, сравнимых с издержками альтернативных методов. Субсидии иногда даются в надежде получения дополнительного источника топлива и сокращения его импорта. Несмотря на свою неэкономичность, биоэнергетические процессы протекают в течение длительного времени. Необходимо быть уверенным в обоснованности результатов с точки зрения термодинамики, а также в ожидаемой в перспективе отдаче. Экономия на импорте нефти может быть оправдана только в случае отсутствия соответствующего увеличения импорта капитала, оборудования и других важных статей, необходимых для осуществления возобновляемых энергетических процессов.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Forest, W. W., Entropy of microbial growth, *Nature*, 225, 1970, 1165–1166.
- [2] Wright, D. J., Energy budgets, Goods and services, an input – output analysis, *Energy Policy*, 2 Dec. 1974, 307–315.
- [3] Constanza, C., Embodied energy and economic evaluation, *Science*, 210, 1980, 1219–1224.
- [4] Monteith, J. L., Does light limit crop production, Chap. 2 in *Physiological Processes Limiting Plant Productivity*, Ed. C. B. Johnson, Butterworths, 1981.
- [5] *BP Statistical Review of World Energy*, The British Petroleum Company plc, London, 1981.
- [6] *FAO Production Yearbook 1981* (vol. 35), FAO, Rome, 1982.

- [7] Humphrey, W. S., Stanislaw, J., Economic growth and energy consumption in the UK, 1700–1975, *Energy Policy*, March 1979, 29–42.
- [8] Anon., Study explodes U. S. energy waste myth., *The Oil and Gas Journal*, Mar. 6, 1978, 30–31.
- [9] Darmstadter, J., Dunkerly, J., Alterman, J., *How Industrial Societies use Energy*, Johns Hopkins University Press, Baltimore, 1977.
- [10] Keenan, J. H., Gyftopoulos, E. P., Hatsopoulos, G. N., The fuel shortage and thermodynamics – The entropy crisis, Chap. 34 in *Energy: Demand, Conservation, and Industrial Problems*, Ed. M. S. Macrakis, MIT Press, 1974.
- [11] Berndt, E. R., Aggregate energy, efficiency, and productivity measurement, *Ann. Rev. Energy*, 3, 1978, 225–273.
- [12] Banks, F. E., *Scarcity, Energy and Economic Progress*, Lexington Books, Toronto, 1977.
- [13] Bradley, Askin, A., *How Energy Affects the Economy*, Lexington Books, Toronto, 1977.
- [14] *Annual Abstract of Statistics 1982*, HMSO, London.
- [15] Smil, V., Kuz, T., European energy elasticities, *Energy Policy*, June 1976, 171–175.
- [16] Brookes, L. G., Energy/GDP relationships – the elastic snaps, *Energy Policy*, June 1976, 162–164.
- [17] *Digest of UK Energy Statistics, 1980, 1982*, Dept. of Energy, HMSO.
- [18] Berndt, E. R., Wood, D. O., An economic interpretation of the energy – GDP ratio, Chap. 3 in *Energy: Demand, Conservation and Institutional Problems*, Ed. S. Macrakis, MIT Press, 1974.
- [19] *Twentieth Century Petroleum Statistics*, DeGolyer and MacNaughton, Texas, 1978.
- [20] Brookes, L. G., Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the UK, *Energy Policy*, June 1978, 94–106.
- [21] Srarr, C., Field, S., Economic growth, employment and energy, *Energy Policy*, March 1979, 2–22.
- [22] Energy analysis – a verdict awaited, Editorial in *Energy Policy*, Dec. 1975, 266–267.
- [23] Leach, G., Net energy analysis – is it any use?, *Energy Policy*, Dec. 1975, 322–344.
- [24] Slessor, M., NEA re-examined, *Energy Policy*, June 1976, 175–177.

## ПРОДУКТЫ ФОТОСИНТЕЗА — СЫРЬЕ ДЛЯ ТОПЛИВА?

### 2.1. СОЛНЕЧНАЯ РАДИАЦИЯ И НАЛИЧИЕ ЗЕМЕЛЬНЫХ УГОДИЙ

**Интенсивность солнечной радиации.** Солнечная радиация непосредственно за пределами земной атмосферы имеет энергетическую плотность около  $0,12 \text{ ГДж/м}^2$  в день [1]. В целом земля получает около  $5,4 \times 10^{15}$  ГДж радиации ежегодно. Однако минимум 30% падающей радиации теряется в результате отражения или поглощения ее земной атмосферой (даже при отсутствии облаков и загрязнения атмосферы). Облака могут отражать до 80% общей радиации, а степень покрытия облаками земной поверхности составляет почти 50% в любое время. Кроме того, энергия излучения у земной поверхности регулируется географическим положением, временем года, суток, а также степенью затенения поверхности почвы. Количество энергии, получаемой растениями, уменьшается в результате взаимного затенения.

Средняя интенсивность солнечной радиации в Великобритании составляет около  $0,009 \text{ ГДж/м}^2$  в день [2]. Этот показатель в таких странах, как Австралия и США, примерно в 2 раза выше. Общая энергия солнечной радиации, получаемая в Великобритании на площади  $229\,827 \text{ км}^2$ , составляет примерно  $7,6 \times 10^{11}$  ГДж в год. Потребление первичной энергии в Великобритании в тех же единицах составляет около  $8,8 \times 10^9$  ГДж. Энергетические потребности Великобритании были бы полностью удовлетворены, если бы солнечную радиацию можно было использовать в той же степени, что и существующие виды топлива.

Максимальная интенсивность потока солнечной радиации у земной поверхности, равная  $0,09 \text{ ГДж/м}^2$  в день, только немного выше интенсивности потока, испускаемого радиатором водяного отопления. Средняя годовая инсоляция значительно менее интенсивна, как об этом говорилось выше. И здесь возникает проблема. В соответствии с требованиями, предъявляемыми к современным видам топлива, плотность этой энергии очень низка. Например, нефтяной поток мощностью 30 млн. т в год в типичном 32-дюймовом морском нефтепроводе представляет собой энергетический поток интенсивностью  $7,4 \text{ млн. ГДж/м}^2$

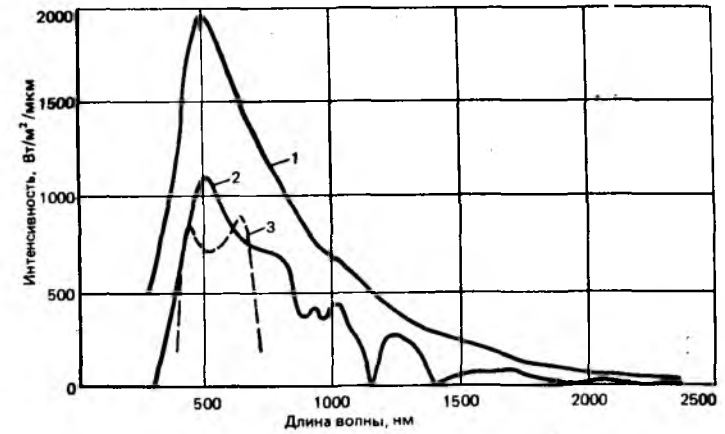


Рис. 7. Солнечный свет и спектр фотосинтетической активности:  
1 — солнечная радиация в космическом пространстве; 2 — солнечный свет; 3 — спектр фотосинтетической активности.

в день. Использование солнечной энергии противоречит сформировавшейся веками тенденции использования видов топлива с более высокой теплотворной способностью, увеличения тепловых потоков, плотности энерговыделения. Это не говорит о невозможности использования солнечной энергии, но свидетельствует о необходимости нововведений в связи с широким использованием солнечной энергии, которое может иметь место в развитых странах.

**Солнечный спектр.** Состав спектра общего излучения за пределами атмосферы аналогичен составу спектра излучения, испускаемого черным телом при температуре около  $5800 \text{ К}$  ( $5526^\circ \text{C}$ ). Некоторые длины волн поглощаются земной атмосферой (рис. 7). Кроме того, в Великобритании более половины общей солнечной радиации поступает в виде рассеянного излучения. Однако спектр рассеянного излучения аналогичен спектру прямого излучения с точки зрения энергии.

Растения способны использовать только четверть общего спектра излучения. Пик используемого спектра (см. рис. 7) находится в области видимого голубого и красного света ( $450\text{--}650 \text{ мкм}$ ). Неиспользуемая солнечная радиация идет на нагревание поверхности почвы и испарение влаги. Косвенным образом эта энергия способствует обеспечению растений необходимым теплом и влагой. Небольшая часть энергии излучения, усвоенная растениями, уходит в атмосферу в виде теплового излучения.

**Использование земельных ресурсов на земном шаре.** Как мы увидим позднее, энергетический эквивалент 5 млн. т в год продукции нефтеперерабатывающего завода можно получить на площади выращивания

типичных "биоэнергетических" культур 1 млн. га. В проектах по производству биотоплива обычно предусматривается технология интенсивного возделывания и уборки культур на больших площадях с последующей централизованной переработкой их. Таким образом, для фиксации относительно слабых потоков солнечного излучения с целью получения большого выхода энергии необходимы значительные земельные площади. Поверхность суши на земном шаре составляет примерно 14,6 млрд. га, а площадь водной поверхности — 35,9 млрд. га. Достаточно ли эти площади для удовлетворения будущих потребностей человечества в энергии?

Площадь земельных угодий, пригодных для выращивания культур, составляет на земном шаре около 13 млрд. га [3]. Использование этих земель в настоящее время показано на рисунке 8. Как видно из диаграммы, характер землепользования в Европе является аналогичным характеру землепользования в мире, за исключением того, что Европа имеет большую долю пахотных земель и меньшую долю земель, входящих в категорию "другие" площади. Последняя категория включает площади, не производящие биомассу и являющиеся в этом отношении непродуктивными (например, застроенные площади, парки, дороги и т. д.). Веками увеличение выхода сельскохозяйственной продукции обеспечивалось увеличением обрабатываемой площади и совершенствованием технологии обработки почвы. Однако за последние два десятилетия увеличение выхода сельскохозяйственной продукции в развивающихся странах только на  $\frac{1}{5}$  произошло за счет увеличения обрабатываемых площадей; в развитых странах эта доля является еще более низкой [4]. В основном увеличение выхода сельскохозяйственной продукции произошло за счет улучшения культур, использования удобрений и пести-

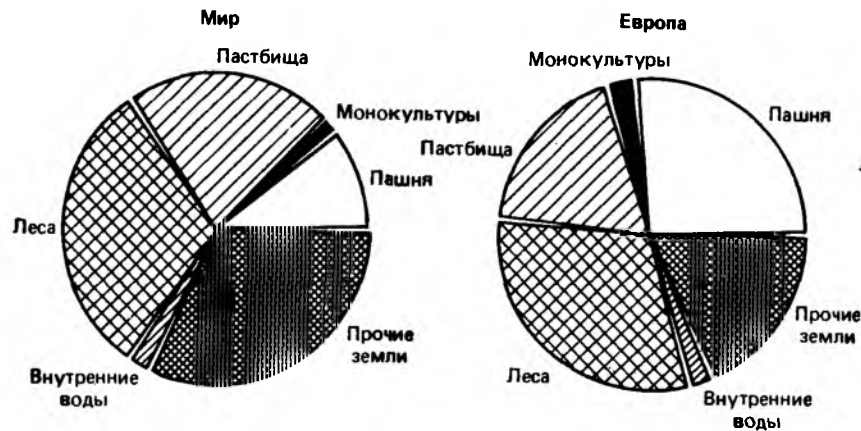


Рис. 8. Землепользование в мире и в Европе.

цидов, а также интенсификации сельского хозяйства. Однако размеры неиспользованных площадей являются все еще значительными (0,5—1,4 млрд. га) по сравнению с используемыми в настоящее время (0,8 млрд. га). По расчетам ФАО, к 2000 г. площади, находящиеся в землепользовании, могут увеличиться только на 10—15% (по сравнению с 1980 г.), в основном вследствие неудобного расположения земель.

**Наличие земельных угодий.** По ряду причин использование как обрабатываемых, так и не обрабатываемых земель на земном шаре для целей производства биотоплива не всегда возможно. Первая и, возможно, наиболее важная причина — это получение более высокой нормы прибыли, чем при производстве биотоплива. Как уже говорилось, твердые виды топлива стоят максимум несколько десятков фунтов стерлингов за 1 т (в расчете на сухую массу). Зерновые, бобовые, сахар и растительные масла стоят намного больше. Если не учитывать продукты питания, производство биотоплива должно конкурировать с отраслями промышленности, использующими биомассу для производства кормов, строительных материалов и одежды. Отходы сельскохозяйственного производства и лесной промышленности могут в первую очередь рассматриваться как сырье для получения биоэнергии. Производство биотоплива может быть осуществлено одновременно с другими видами использования земли. Однако даже эти отходы имеют ценность при использовании их в качестве топлива. Наличие этих отходов будет также зависеть от продуктивности угодий и от трудностей, связанных со сбором достаточного количества материала для производства биотоплива.

Значительная часть площадей, которые на первый взгляд могут служить в качестве биоэнергетических "плантаций", на самом деле не в состоянии обеспечить достаточно высокие урожаи биомассы. Они или слишком сухие, или слишком влажные, слишком холодные, или подвержены слишком сильным ветрам, чтобы выращивать на них запланированные культуры. Кроме того, почва может быть неплодородной, засоленной или солонцеватой, а склоны могут быть слишком крутыми для эффективного возделывания культур. Влияние этих факторов на урожай рассматривается ниже.

Характер землепользования в Великобритании показан в таблице 8 [2]. Так как 75% территории уже отведено под пахотные и пастбищные угодья, очень небольшое число крупных участков может быть использовано для получения биоэнергии. В проектах по производству биотоплива в Великобритании предлагалось использовать отходы или разрозненные участки земли, убедив при этом владельцев участков производить на них биомассу для продажи на центральные перерабатывающие заводы. Если бы в Великобритании или какой-либо другой стране использование биоэнергии было высокоэкономичным, другие категории землепользования могли бы быть принесены в жертву, однако в настоящее время такое маловероятно.

Таблица 8. Землепользование в Великобритании

Показатели	Пахотные земли	Малопродуктивные и постоянные пастбища	Леса	Застройки	Горы и др.
Доля общей площади, %	28	47	8,5	6,5	10

Стоимость земельных угодий. Хотя теоретически мы располагаем земельными угодьями для проведения в жизнь идей получения биоэнергии, на практике использование этих площадей ограничивается рядом экономических и юридических факторов. Земля для производства биомассы должна быть куплена или арендована. Это является существенным лимитирующим фактором в землепользовании. Кроме того, могут существовать положения, регулирующие землепользование и предусматривающие принятие мер по охране окружающей среды и прав местных жителей.

Таблица 9. Средние цены на землю и размеры ренты в Великобритании в 1978 г.

Показатели	Англия	Уэльс	Шотландия
Средняя земельная рента, ф. ст/га	40	21	26
Средняя цена на землю, ф. ст/га	2062	1788	1090

В Великобритании можно свободно получить информацию о ценах на землю и об арендной плате [5]; средние цены и арендная плата за 1978 г. показаны в таблице 9. Размеры ренты периодически устанавливаются трибуналом и обычно составляют величину порядка 1—2% стоимости земли. Хотя эти показатели не характеризуют норму прибыли на вложенный капитал, земля, в противоположность промышленному предприятию, не падает, а растет в цене. В Англии примерно 60% общей площади сельскохозяйственных угодий находится в частном владении. Процесс получения биоэнергии, по крайней мере, в Великобритании предполагает громадные капитальные затраты на приобретение земли. В некоторых развивающихся странах проблема может быть не такой острой. Цены на землю и размеры ренты определяются рядом фак-

торов, среди которых следует назвать использование земли для различных целей, а также желание владельца земли принять участие в сотрудничестве.

Ренту выплачивают, предполагая в будущем некоторый доход. Его размер может колебаться от прожиточного минимума до уровня, дающего возможность осуществления капиталовложений. В Великобритании ежегодный доход от земельных угодий составляет более 1000 ф. ст/га для зерновых и около 50 ф. ст/га в лесном хозяйстве. Расходы в первом случае, конечно, более высокие, но и сама отрасль прибыльная; лесоводство является нерентабельным. В таблице 10 дается анализ среднего дохода и издержек в лесоводстве [6]. Приводимые факты имеют отношение ко многим предложениям по использованию и получению биотоплива, так как в Великобритании лесное хозяйство субсидируется,

Таблица 10. Средние показатели доходов и издержек в частном лесоводстве Великобритании (1977 г.)

Показатели	Продажа основной продукции	Перевозки в пределах владения	Продажа второстепенной продукции	Субсидии и другие поступления	Всего
Доход, ф. ст/га в год	30,5	9,4	6,6	2,6	49,1
Показатели	Рабочая сила	Машины, топливо и транспорт	Материалы	Рента, местные сборы и другие расходы	Всего
Издержки, ф. ст/га в год	40,2	8,7	3,7	3,5	56,1

а лесная промышленность является низкорентабельной. Частное лесное хозяйство в Великобритании также субсидируется путем отсрочки наследственных пошлин на растущий лес до его созревания, валки и последующей реализации.

Морское хозяйство. Площади, теоретически пригодные для производства биотоплива, включают мировую акваторию и прибрежные водные пространства. На первый взгляд море имеет ряд преимуществ. Только небольшая часть морской среды используется в настоящее время для выращивания моллюсков, морских растений и т. д. Вопрос о том, какую роль здесь может сыграть частная собственность, остается

спорным. За территориальными водами лежат обширные водные пространства, которые можно использовать для производства биотоплива. Средняя стоимость продуктов, собранных за пределами территориальных вод, в настоящее время низкая, так что здесь в меньшей степени стоит проблема конкуренции. Слабо развитой остается технология выращивания. Эта технология должна обеспечить достаточное закрепление растений в грунте и обеспечение их питательными веществами.

Несмотря на явный интерес к морскому хозяйству со стороны специалистов, мы не можем с уверенностью утверждать, что море может быть включено в категорию площадей, пригодных для производства фотосинтетического топлива. Потенциальные возможности являются большими, однако мы сталкиваемся с неменьшими проблемами. За исключением прибрежных и устьевых областей, где продуктивность биомассы очень высокая (60 т сухой массы с 1 га в год), общая продуктивность морской среды очень низка (1–2 т/га в год), что эквивалентно продуктивности пустыни. Причины низкой продуктивности не всегда понятны; их чаще всего относят за счет недостатка макро- и микроэлементов. Было предложено промышленное производство бурых водорослей в открытом океане вблизи берегов США [7]. По расчетам, урожай бурых водорослей должны быть высокими (38 т/га в год), однако стоимость производства бурых водорослей по сравнению с производством других форм биомассы на биотопливо будет также высокой (100 долл. на 1 т сухой обеззоленной массы) [8]. Высокая стоимость продукта в сочетании с высокой стоимостью процесса переработки (озоление в анаэробных условиях) едва ли позволяет метану, полученному из бурых водорослей, стать новым источником топлива:

## 2.2. УРОЖАЙ КУЛЬТУР И ФАКТОРЫ, ЛИМИТИРУЮЩИЕ УРОЖАЙ

Производство первичной биомассы. Общее количество биомассы (в пересчете на сухое вещество), производимой в биосфере, составляет по расчетам около 110 млрд. т в год, из которых около 4 млн. т производится на обрабатываемой площади. Категории биомассы представлены в таблице 11 [3, 9]; основная ее доля приходится на леса и океаны. Если принять среднюю теплотворную способность биомассы равной 18 ГДж/т (сухое вещество), то общая энергетическая характеристика мировой биомассы выразится величиной 2000 млрд. ГДж в год.

Средняя эффективность превращения падающей радиации равна примерно 0,04%. Малая доля этой энергии, получаемая человеком от лесного и сельского хозяйства, эквивалентна примерно 70 млрд. ГДж; это количество энергии значительно меньше общей энергии, используемой человеком в форме топлива (около 300 млрд. ГДж). Однако лесное и сельское хозяйство представляют основную часть человеческой деятельности. С точки зрения производства энергии, результат незначитель-

Таблица 11. Чистое производство первичной биомассы в различных условиях окружающей среды

Источник биомассы	10 <sup>9</sup> т сухого вещества в год
Леса	31,4
Залесенные территории, саванны и луга	8,9
Тундры, пустыни, скалы, льды и т. д.	1,1
Культивируемые площади	4,1
Болота, марши, озера и т. д.	2,8
Океаны	Примерно 62

ный, но с точки зрения производства продуктов питания и кормов для животных, он значителен.

Производство материалов с содержанием энергии, аналогичным содержанию энергии в ископаемом топливе, означало бы революцию в мировом сельском и лесном хозяйстве. Сравнение показателей содержания энергии в обычных видах топлива и в различных формах биомассы представлено в главе 1.

Урожай с 1 га. Низкая эффективность превращения энергии излучения биосферой является результатом низких урожаев растительной массы с гектара. В таблице 12 показаны урожаи, составляющие от 5 до 80 т сухого вещества с 1 га в год на площадях, покрытых раститель-

Таблица 12. Урожай фотосинтетической биомассы (включая корни) в различных условиях окружающей среды

Источник биомассы	Урожай, т сухого вещества в год с 1 га
Тропический лес	10–25
Тропическое сельское хозяйство	20–80
Лес умеренной зоны	5–20
Сельское хозяйство умеренной зоны	10–30
Пустыня	0,01–0,02
Океан	1–2,5
Саванны и луга	4–16
Тундра	0,05–2,0

ностью, в сравнении с урожаями от 0,01 до 2,5 т в год в океанах, пустынях и тундре [9]. Даже урожай 10 т в год дает только около 180 ГДж/га в год энергии.

Максимальное количество углеводов, полученных в результате фотосинтеза в лаборатории при красном свете, соответствует эффективности энергии превращения 27% (10 квантов/моль фиксированной CO<sub>2</sub>). В сельском хозяйстве максимальные урожаи за короткие периоды эквивалентны только примерно 10% общей видимой радиации. В течение вегетационного периода эффективность превращения энергии может упасть до 0,9–1,6% для культур умеренного климата и до 5% для тропических культур [9]. В условиях резкого недостатка влаги в пустынях или недостатка питательных веществ в океанах указанные значения могут снизиться в 20 раз. Растительные сообщества умеренных зон, несмотря на среднюю эффективность превращения солнечной энергии, равную примерно 1%, в условиях интенсивного возделывания могут иметь значительно более высокий показатель эффективности.

Общая продукция фотосинтеза целиком в условиях сельского и лесного хозяйства обычно не собирается. Значительная ее часть остается на месте, перегнивает и возвращается в почву в виде питательных веществ и углерода. Продукция фотосинтеза, используемая человеком, зависит от культуры: у деревьев – стволы, у зерновых культур – зерно, у картофеля – клубни. Остальные части растений могут найти менее выгодное применение (например, солома или силос), но ценность растения определяется урожаем наиболее ценных его частей. В таблице 13

Таблица 13. Рекордные и средние урожаи основных культур в США

Культура	Рекордный урожай сырой массы, т/га	Рекордный сбор сухого вещества, т/га	Средний урожай сухой массы, т/га
Кукуруза	19,3	18	4,4
Пшеница	14,5	14	1,8
Соя	7,4	6,4	1,4
Картофель	94,1	19	5,7
Сахарная свекла	121	29	10

показаны рекордные и средние урожаи основных культур в США [10]. В таблице также показан сбор сухого вещества [11]. В других странах урожаи часто ниже, чем те, которые считаются допустимыми в США. Средние урожаи пшеницы и кукурузы в основных странах-производителях приведены в таблицах 14 и 15 [12].

Порядок показателей урожайности по обеим культурам является аналогичным, а энергосодержание собранной продукции составляет от

Таблица 14. Средний урожай пшеницы в основных странах-производителях

Страна	Средний урожай пшеницы, т/га
Нидерланды	4,4
Великобритания	4,0
Франция	3,0
США	1,7
Аргентина	1,6
Австралия	1,2
Турция	1,1

Таблица 15. Средний урожай кукурузы в основных странах-производителях

Страна	Средний урожай кукурузы, т/га
Канада	4,7
США	4,3
Румыния	1,9
Бразилия	1,3
Южная Африка	1,2
Индия	1,0

18 до 80 ГДж/га (несоответствие данным таблицы 13 объясняется использованием иных источников информации). Средние урожаи ствольной древесины и сельскохозяйственных культур в США аналогичны и составляют от 3 до 4 т/га в год [13]. Однако деревья обычно выращивают на более бедных почвах, чем те, которые отводятся под сельскохозяйственные культуры.

**Лимитирующие факторы.** Большинство растений растет в среде, являющейся в какой-то степени неблагоприятной для их развития [8]. Хотя адаптация и позволяет растениям выживать в более неблагоприятных условиях, процесс ее может происходить за счет потери урожая биомассы. Считается, что растения, произрастающие в естественных условиях, обладают скорее высокой способностью к воспроизводству, чем способностью давать высокий урожай. В течение столетий человек отбирал растения, дававшие высокий урожай тех частей растения, в которых он был заинтересован. Урожай как в естественных условиях, так и в условиях, созданных человеком, связан с генетическим строением растения, а также со степенью удовлетворения его потребностей. Физи-

ческие потребности растения — это потребности в свете, тепле и субстрате для закрепления стебля и корней (желательно, чтобы субстрат обладал ионообменными свойствами для связывания питательных веществ). Химические потребности — это потребности в воде, диоксиде углерода, кислороде и минеральных элементах питания. Факторы, ведущие к замедлению роста в благоприятных условиях окружающей среды, — это сорняки, болезни, вредители, сильные ветры, засоленность и щелочность почвы, присутствие токсических соединений. В США была разработана классификация площадей [10] в соответствии с наличием лимитирующих факторов (табл. 16). Только 12 % почв свободны от влияния факторов, лимитирующих беспрепятственное пополнение питательных веществ, вынесенных с урожаем.

Таблица 16. Факторы, лимитирующие урожайность в США

Лимитирующий фактор	Площади, находящиеся под воздействием лимитирующего фактора, %
Засуха	25
Малоплодородные почвы	20
Низкие температуры	17
Высокая влажность	16
Засоленность, щелочность	7

Ослабление действия лимитирующих факторов. Во всем мире вода считается фактором, наиболее часто ограничивающим рост растений, и орошение в значительной мере способствует повышению урожайности культур. Однако орошение стоит дорого, а грунтовые и поверхностные воды, необходимые для орошения, во многих частях мира не могут удовлетворить существующих потребностей ввиду их малых запасов. Обеспечение водой требует затрат энергии. При неблагоприятных условиях дренажа орошение вызывает серьезные проблемы, связанные с засолением; это, в свою очередь, ограничивает размеры площадей, где может проводиться орошение.

Там, где лимитирующим фактором является климат, трудно обойтись без создания дорогостоящих инфраструктур. В условиях умеренных зим могут быть использованы теплицы для выращивания ценных теплолюбивых культур. В условиях чрезмерно жаркого климата для производства тех же культур используются теплицы, оборудованные охлаждающими устройствами с использованием специальных испарителей [14]. Оба варианта требуют больших затрат энергии и не годятся для производства биотоплива.

Развитие технологии за последние годы облегчило до некоторой степени борьбу с сорняками, вредителями и болезнями. Тем не менее мы стоим перед необходимостью постоянной разработки новых методов. Их использование также требует расходов дополнительных количеств энергии.

Для постоянного получения высоких урожаев необходимо систематическое внесение удобрений. Основными минеральными питательными веществами являются азот, фосфор и калий. Внесение этих элементов в почву в сочетании с орошением, селекцией растений и механизацией явилось основной причиной резкого повышения урожайности культур в текущем столетии. Производство удобрений требует затрат больших количеств энергии (восстановление атмосферного азота или переработка минералов, содержащих фосфор и калий). Было внесено предложение использовать остатки фосфатных руд только для нужд сельского хозяйства, так как ресурсы фосфатов являются даже более ограниченными, чем энергетические ресурсы [15].

Кроме факторов окружающей среды, лимитирующих урожай, существуют также человеческие факторы. Одним из наиболее важных человеческих факторов является болезнь. Существенным препятствием развитию сельского хозяйства в тропиках и основным лимитирующим фактором заселения значительных территорий тропической зоны являются такие болезни, как эндемическая речная слепота и трипаносомиаз [4].

Как указывалось выше, действие факторов, лимитирующих получение высоких урожаев, может почти всегда быть смягчено при определенных затратах. Растения можно обеспечить водой, питательными веществами, теплом, диоксидом углерода и т. д. и получить высокий урожай. Издержки оправдываются стоимостью продукции. Однако издержки могут измеряться с точки зрения энергетических затрат; к этой теме мы вернемся позднее при полной оценке энергетических затрат в сельском и лесном хозяйстве.

### 2.3. СТОИМОСТЬ ПРОДУКТОВ ФОТОСИНТЕЗА

Цены на биомассу. За последние годы трудности с топливом были практически связаны больше с его стоимостью, чем с фактическим наличием. В странах, производящих нефть, запасы последней исчерпаны не были, но эти страны ограничили поступление нефти на мировые рынки и повысили цены на нефть. Стоимость биомассы как источника топлива до сих пор не получила должного внимания, несмотря на попытки совершенствования самих процессов переработки биомассы. Предполагается, что сырье имеет низкую или "нулевую" стоимость, когда оно является побочным продуктом других сфер производства. Перед тем как решить, какая может быть или какая должна быть эта стоимость в



Таблица 17. Примерные цены и издержки производства биомассы в Европе

Материалы или товары	Ф. ст. за 1 т сырой массы	Ф. ст. за 1 т сухой массы	Ф. ст./ГДж
<b>Цены (1982 – 1983)</b>			
Кукуруза	149	180	8,7
Пшеница	123	130	7,2
Сахарная свекла	28	110	6,2
Хвойный лес	50	100	5,6
Небольшие круглые лесоматериалы (сырые)	15	30	1,7
Сахар (на месте)	143	143	7,9
Сахар (продажи, осуществляемые ЕЭС)	406	406	22,6
Соевое масло	300	300	7,1
Солома	25	30	1,6
Картофель	77	390	21,4
Бумага (отходы)	30	33	1,8
<b>Издержки (1979 – 1980)</b>			
Силос	10	35,5	2,0
Морские водоросли	5 – 10	40	2,2

будущем, интересно знать, какова текущая цена биомассы. Какую цену должны мы платить за продукцию лесного и сельского хозяйства?

В таблице 17 приводятся только некоторые показатели по Европе. Издержки и цены приводятся в расчете на сырую массу, сухую массу и на энергетические затраты. Стоимость производства указанной продукции (в отличие от цены) установить не всегда просто. В некоторых

Таблица 18. Средние цены, выплачиваемые за топливо отраслями Великобритании, производящими газ и электроэнергию

Год	Уголь		Нефть		Природный газ		Топливо для двигателей	
	ф. ст/т	ф. ст/ГДж	ф. ст/т	ф. ст/ГДж	ф. ст/100 000 БТЕ	ф. ст/ГДж	ф. ст/т	ф. ст/ГДж
1978	25,3	0,87	56,9	1,26	0,054	0,5	81	1,8
1981	37,4	1,28	108	2,4	0,083	0,71	139	3,1

случаях цена искусственная, так как она складывается с учетом субсидий и тарифов, существующих в системе ЕЭС. Однако если мы покупаем зерновые и т. д. для производства биотоплива, эти цены становятся стоимостью сырья. До сих пор ЕЭС мало шло на уступки потребителям этих материалов [16]. Стоимость энергии продуктов или равна, или выше стоимости энергии угля, нефти или газа (табл. 18), поставляемых в отрасли энергетики Великобритании [17]. Кроме того, энергия биомассы находится в форме, не пригодной к промышленному использованию.

Стоимость производства биомассы. Издержки производства травяного силоса показательны, так как этот процесс является, пожалуй, простейшим типом производства биомассы, ее уборки и хранения. Разбивка издержек производства дана в таблице 19. По заявлению сельско-

Таблица 19. Полные издержки производства силоса (1979 г.)

Статьи	Ф. ст/т сухой массы
Рабочая сила	2,98
Амортизация машин	7,05
Топливо	0,79
Семена	1,55
Удобрения	11,52
Силосные добавки	2,19
Строения, другие материалы	2,65
Рента 60 ф. ст/га в год	6,81
Всего (за исключением накладных расходов)	35,54

хозяйственной службы Великобритании анализ издержек, на основании которого были выведены эти цифры, является одним из наиболее точных (анализ проводился по данным фермерских хозяйств). По мнению фермеров, издержки не были чрезмерно высокими. Основная доля издержек приходится на удобрения, машины и земельную ренту.

Показательными являются также данные по морским водорослям (см. табл. 17), так как этот материал считается "общедоступным" и не предполагает издержек, связанных с возделыванием и внесением удобрений. Сбор морских водорослей в водах, прилегающих к европейскому побережью, частично механизирован. Однако сырая биомасса сильно насыщена водой, занимает большой объем, что затрудняет ее погрузку и транспортировку. Если издержки так велики при отсутствии специального возделывания и внесения удобрений, что произойдет, когда эти работы будут выполняться, как это имеет место в некоторых предложениях по ведению морского хозяйства?

**Стоимость отходов.** Заявление о возможности использования отходов при производстве биотоплива, в некотором смысле, является противоречивым, так как коль скоро мы начинаем использовать отходы или побочные продукты, последние перестают быть отходами и дают возможность владельцу говорить о назначении цены. Если мы располагаем отходами нашего собственного производства, возможность использования их в качестве источника топлива сводится к общей оптимизации издержек и зависит от многих факторов, включая объем этих отходов в сравнении с текущими потребностями в энергии, стоимость оборудования, необходимого для переработки этих отходов, а также влияние последних на окружающую среду.

В качестве примера отходов, существующих в значительных количествах, можно привести такие отходы, как бумага и солома. Оба вида отходов можно приобрести по цене 20–30 ф. ст. за 1 т, и оба вида являлись предметом широких исследований, проводимых с целью изыскания надежного процесса их переработки. С помощью физических и химических способов эти материалы могут быть превращены в широкий набор различных продуктов, потенциально более ценных, чем энергия, например бумага, сахар, спирт, фурфурол и т. д. Однако стоимость исходного материала бывает часто слишком высока для осуществления таких процессов. Экономическая проблема превращения указанных материалов в энергию стоит еще более остро. Даже такие отходы, как навоз, могут иметь цену. В рамках 20-летнего контракта цены на навоз с откормочных площадок в США составляли около 1 долл. за 1 т. Стоимость "отходов" биомассы (для производства биотоплива) составляла 6–8 долл. за 1 т при включении расходов на транспортировку [19].

Возможно, отчаявшись извлечь выгоду из "отходов", требующих оплаты, внимание было сконцентрировано на категории отходов, удаление которых может быть оплачено, например отбросы, нечистоты, промышленные стоки. Эффективное удаление этих отходов может явиться своего рода субсидированием процессов их переработки. Утилизация отходов необходима в первую очередь с точки зрения охраны окружающей среды, а получаемое при этом топливо может быть побочным продуктом. Экономика процессов удаления отходов и выработки энергии является сложной. Вопрос удаления отбросов и нечистот часто находится в ведении правительства, и его решение не всегда бывает основано на тех же критериях, что и решение о создании коммерческого предприятия. Кредиты компаниям, занимающимся удалением отходов, не всегда соответствуют издержкам, связанным с их удалением.

#### 2.4. ОТ ПЕРВИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ФОТОСИНТЕЗА К ЦЕННЫМ ВИДАМ ТОПЛИВА

**Проблемы использования биомассы.** Растительная биомасса представляет собой проблему с точки зрения использования ее как топли-

ва. Она объемиста, обладает высокой влажностью и даже в высушенном состоянии характеризуется низкой теплотворной способностью. Ценность биомассы как топлива по сравнению с углем является низкой (табл. 20). Биомасса, содержащая более  $\frac{2}{3}$  воды, не будет гореть; на практике топливо, используемое для непосредственного сжигания, должно содержать менее 30 % воды (по массе). Кроме того, биомасса находится в твердом состоянии, что исключает возможность получения надбавок к ценам, которые устанавливаются для жидких видов топлива.

Таблица 20. Теплотворная ценность биомассы и угля

Свойства	Биомасса	Уголь
Содержание влаги, %	30–90	0,5–20
Содержание кислорода в сухом веществе, %	30–40	2–20
Теплотворная способность сухой массы, ГДж/т	16–24	29–37
Содержание золы в сухом веществе, %	1–13	5–25
Энергетическая плотность сырого материала, ГДж/м <sup>3</sup>	< 1–15	43

С учетом этих фактов был сделан ряд предложений, направленных на повышение теплоты сгорания биомассы. Более горючие компоненты могут быть отделены или превращены химическим или биохимическим путем в ценные виды топлива.

В таблице 21 представлен типичный состав сухого растительного материала. Растения представляют собой сложную смесь различных соединений. Одни из них обладают высокой теплотворной способностью, например жиры и масла, другие занимают промежуточное положение

Таблица 21. Типичный состав растений

Компоненты	% в сухом веществе
Водорастворимые соединения (сахара, крахмал, аминокислоты, мочевины, соли аммония)	5–30
Протеин	5–40
Целлюлоза и гемицеллюлоза	25–90
Лигнин	5–30
Зола	1–13
Содержание влаги	30–90 % в сырой биомассе

по содержанию энергии, например сахара, полисахариды и белки. В состав растения входят также остатки неорганических солей (или зола), не обладающие топливной ценностью. Теплотворная способность компонентов растительного материала может быть повышена; в таблице 22 приводятся некоторые растительные компоненты и соединения, которые могут быть получены на основании переработки биомассы, а также их теплотворная способность. Процессы, используемые для осуществления этих преобразований, кратко описаны ниже.

Таблица 22. Теплотворная способность растительных компонентов и полученных на их основании видов топлива

Виды сырья и топлива	Теплота сгорания, ГДж/т
<b>Растительные компоненты</b>	
Общая биомасса	16 – 24
Углеводы	16 – 17,5
Масла	~40
<b>Полученные виды топлива</b>	
Оксид углерода	10,1
Метано́л	22,4
Эта́нол	29,8
Углерод	32,8
Углеводороды	~47
Метан	55,7
Водород	143

**Древесина.** Древесина как тип биомассы стоит особняком вследствие высокой плотности и низкого содержания влаги (даже в сырой массе). Тысячелетиями древесина служила человеку в качестве топлива и до сих пор играет существенную роль в удовлетворении потребностей человека в энергии (хотя в количественном отношении охарактеризовать потребление древесины как топлива в мировом масштабе затруднительно). Древесина часто может использоваться в качестве горючего материала без повышения его теплотворной способности; во многих

Таблица 23. Состав сухой древесины и коры лжетсуги тисолистной, %

Топливо	Водород	Углерод	Азот	Кислород	Зола
Древесина	6,3	52,3	0,1	40,5	0,8
Кора	5,8	51,2	0,1	39,2	3,7

процессах она также является предпочтительным видом сырья. В таблице 23 [20] дается состав сухой древесины и коры. Содержание золы является низким по сравнению с некоторыми типами угля, но содержание кислорода высокое (около 40%). Содержание серы незначительно. Различные виды древесины характеризуются аналогичным составом. Свежесрубленная древесина имеет содержание влаги 30–60%.

**Физические процессы.** Первый и традиционно наиболее важный метод подготовки растений и других биологических остатков для использования их в качестве топлива – удаление влаги. Наиболее дешевый способ удаления влаги – высушивание на солнце или на открытом воздухе. Высушенная древесина, солома, навоз до сих пор служат топливом во многих частях земного шара. Искусственная сушка, даже при использовании части материала в качестве топлива, является слишком дорогостоящей и может быть оправданной только для высокоценных продуктов, таких, как зерно.

Высококалорийные растительные масла извлекают способами перегонки, экстрагирования и механического давления. Все растения содержат соединения, подобные углеводородам, которые могут быть экстрагированы и использованы в качестве непосредственных заменителей нефти. Растительные масла в течение долгого времени используются в пищевых целях, как топливо и для других целей. Одно время большая часть лампадного масла в Европе производилась из культур масличных семян, например рапса.

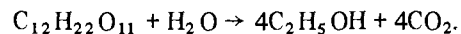
В ходе всех процессов повышения качества материала биомассу необходимо довести до объема, способного обеспечить приемлемые скорости горения. Объем полученных твердых материалов должен также быть пригодным для их окончательного использования.

**Термохимические методы повышения качества материала.** Традиционным методом повышения теплотворной способности биомассы является перевод ее в древесный уголь; при этом сжигание в ограниченном объеме воздуха вызывает карбонизацию биомассы. В результате получается продукт с высоким содержанием углерода и теплотворной способностью, приближающейся к теплотворной способности углерода (33 ГДж/т). Существуют более сложные современные варианты, такие, как сухая перегонка и газификация. Различные сочетания тепла, кислорода и пара (кроме восстановления углеродсодержащих молекул до углерода) также дают легковоспламеняющиеся газы и жидкости в зависимости от температуры, давления и присутствия катализаторов. При высоких температурах (свыше 600 °C) продукты представляют собой в основном легковоспламеняющиеся восстановительные газы, оксид углерода и водород.

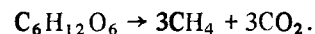
Другим химическим процессом превращения биологических материалов в полезные виды топлива является восстановление. Целью восстановления является удаление кислорода и азота и увеличение содер-

жания углерода и водорода в полученном топливе. Однако все восстановители являются энергоемкими и очень дорогостоящими соединениями. При производстве биотоплива обычно используют оксид углерода и водород, образовавшиеся в ходе предварительной газификации биомассы. В итоге происходит сжигание материала с образованием продукта, схожего с сырой нефтью, но содержащего высокий процент кислорода.

**Биохимические процессы.** В результате этих процессов происходит перераспределение энергии в биомассе с образованием молекул высокого и низкого энергетического уровня. В отличие от химических и физических процессов эти процессы протекают в водных суспензиях биологического материала с образованием летучих видов топлива, относительно легко выделяемых из смеси. В ходе ферментации сахар (16 ГДж/т) превращается в спирт (29 ГДж/т) и диоксид углерода (0,0 ГДж/т):



В анаэробных условиях сахара, например, превращаются в метан (55 ГДж/т) и диоксид углерода:



В обоих случаях сахара получают или непосредственно из растений, или путем химического или биохимического гидролиза природных полисахаридов.

Восстановление воды до составляющих ее элементов в ходе фотосинтеза считается биохимическим путем образования топлива. Обычно конечным результатом этого процесса является образование никотинамиднуклеотидов и аденозинтрифосфата, играющего важную роль в фиксации  $CO_2$ . Может, однако, представиться возможность добиться выделения элементарного водорода из клеток или их компонентов с использованием его в качестве топлива.

#### ЛИТЕРАТУРА

#### REFERENCES

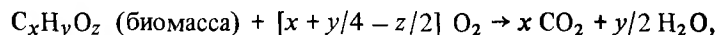
- [1] Solar Energy Research in Australia, Australian Academy of Science Report no. 17, 1973.
- [2] Solar Energy: its potential contribution within the United Kingdom. Energy paper No. 17, HMSO, London, 1976.
- [3] *Handbook of Solar Resources*, Vol. 1, part 2, Ed. O. R. Zaborsky, CRC Press, Florida, 1982.
- [4] *World Development Report*, World Bank/Oxford University Press, 1982.
- [5] Lund, P. J., Slater, J. M., Agricultural land: its ownership, price and rent, *Economic Trends*, Dec. 1979, 97–110.
- [6] Economic Survey of Private Forestry, Income and Expenditure England and Wales Dept. Forestry, University of Oxford, 1977.

- [7] Wilcox, H. A., Leese, T. M., Converting seaweed to SNG, *Hydrocarbon Processing*, April 1976, 86–89.
- [8] Jones, J. L., Methane from kelp, Stanford Research Institute Datalog File No. 79–366, 1979.
- [9] *Photosynthesis and Productivity in Different Environments*, Ed. J. P. Cooper, Cambridge University Press Cambridge, 1975.
- [10] Boyer, J. S., Plant productivity and the environment, *Science*, 218, 1982, 443–448.
- [11] *Crop Physiology*, Ed. L. T. Evans, Cambridge University Press, 1975.
- [12] *Oxford Economic Atlas*, 4th edition, Oxford University Press, 1978.
- [13] Jarvis, P. G., Production efficiency of coniferous forest in the UK, Chap. 5 in *Physiological Processes Limiting Plant Productivity*, Ed. C. B. Johnson, Butterworths, 1981.
- [14] Annual Report 1972–1973 Environmental Research Laboratory, University of Arizona/Arid Lands Research Center, Abu Dhabi.
- [15] Povich, M. J., Fuel Farming – Water and nutrient limitations, Symposium 'Renewable Sources of Energy and Chemical Feedstocks', AIChE, Symposium no. 181.
- [16] Sargeant, K., Scope for increased industrial feedstock production from European agriculture, Symposium 'Economic Aspects of Fermentation Processes: Political and Economic Aspects of Raw Materials Markets' Society of Chemical Industry, London, 1982.
- [17] *Digest of UK Energy Statistics 1982*, Dept. of Energy, HMSO, London.
- [18] Purdy, J., Silage costs under the microscope, *Farmers Weekly*, June 1, 1979, 83–87.
- [19] Varani, F. T., Materials handling in anaerobic digestion systems, pp. 140–142 in *Proceedings of the Symposium 'Bio-energy 80'*, April 21–24, Atlanta, Georgia.
- [20] Cheremisinoff, N. P., *Wood for Energy Production*, Ann Arbor Science, Michigan, 1980.

## ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОТОПЛИВА

### 3.1. СЖИГАНИЕ

Простейшим методом получения полезной энергии из сухой биомассы является ее сжигание на воздухе. Химическая реакция полного окисления материалов, содержащих в основном углерод, кислород и водород, описывается следующим уравнением:



где  $x, y, z$  — основные элементы, входящие в состав биомассы.

Теплота реакции составляет от 16 до 24 ГДж/т абсолютно сухой биомассы, в зависимости от ее типа. Если количество кислорода недостаточно для полного окисления горючего материала, тогда происходит образование углерода, оксида углерода, углеводородов и других газов, а теплота реакции снижается. Азот и другие элементы, присутствующие в биомассе, превращаются в газообразные продукты и золу.

Присутствие воды в биомассе не снижает термодинамического выхода тепла, однако практическая эффективность реакции снижается вследствие необходимости нагрева воды и ее испарения при температуре сжигания. Вода также снижает температуру пламени и скорость сжигания. Содержание воды более 30 % не дает возможности прямого сжигания биомассы, поэтому материал должен быть высушен или же к нему следует добавить топливо. Однако использование печей с псевдосжиженным слоем материала позволяет проводить сжигание при содержании воды до 55 %. Были предложены регенеративные печи, повторно использующие тепло испарившейся воды и газообразных продуктов сгорания; в этих условиях теоретически возможно сжигание материалов, насыщенных влагой. Сжигание в соответствующих камерах сгорания может явиться одним из наиболее эффективных методов использования энергетического потенциала биомассы. В печах прямого нагрева и паровых котлах использование тепла составляет 85 %, однако многие установки на практике являются значительно менее эффективными.

**Подготовка биомассы.** Перед сжиганием тем или иным способом большинство типов биомасс необходимо определенным образом под-

готовить. Типы биомасс могут варьировать от плотных, относительно сухих материалов, таких, как древесина, до очень влажных, обладающих низкой теплотворной способностью, таких, как канализационные стоки и морские водоросли. Другие материалы, такие, как солома, обладая низкой влажностью, имеют малую плотность, и поэтому работа с ними является затруднительной. Наиболее важными этапами подготовки биомассы являются измельчение, сортировка по размерам частиц, сушка и хранение.

Необходимые размеры древесины получают путем распила, раскола и измельчения. Предварительная сушка на воздухе проводится не всегда, в зависимости от техники сжигания. Используют и другой метод подготовки древесины, называемый "уплотнением". В ходе этого процесса древесину сушат, измельчают, сортируют по размерам частиц и добавляют связующие агенты. Полученный материал брикетируют или прессуют в более плотную массу с содержанием влаги около 7 % [1]. В литературе поднимался вопрос относительно целесообразности такой технологии [2], однако в целом эта технология способствует улучшению свойств биомассы как топлива, приближая их к свойствам угля. Этот процесс является дорогостоящим и может более чем вдвое повысить цену топлива, но он тем не менее обеспечивает получение материала, способного заменить обычные виды топлива; в некоторых районах потребители готовы оплачивать эти лишние издержки.

Для транспортировки к месту использования солому прессуют в кипы. Кипы имеют низкую плотность (62–200 кг/м<sup>3</sup> в зависимости от типа пресс-подборщика); они должны быть небольшими для облегчения погрузочно-разгрузочных работ вручную, что ведет к высоким транспортным расходам [3]. Кроме того, кипы соломы неудобны для автоматической подачи в печи для сжигания. Делались предложения относительно измельчения соломы перед использованием, но это еще больше увеличивало издержки по подготовке биомассы [4].

Твердые отходы животноводства содержат обычно 70–85 % воды. Перед сжиганием необходима предварительная сушка, которую также можно осуществить путем использования топочных газов [5]. Аналогичные методы применимы к другим материалам с высокой влажностью. При этом количество получаемого тепла в значительной мере снижается вследствие использования его части для высушивания топлива.

Хранение биологического сырья представляет особую проблему вследствие его большого объема, зачастую сезонного его поступления, а также склонности к биологическому разложению. Обычные виды топлива не имеют подобного рода недостатков. В некоторых случаях невозможно обеспечить подачу топлива в соответствии с необходимым выделением тепла, поэтому необходима установка печей (бойлеров); способных работать как на обычном топливе, так и на биомассе.

**Мелкомасштабные методы сжигания.** Самый простой метод сжигания биомассы — это сжигание на открытом огне. В этих случаях эффективность сжигания очень низка. При сжигании топлива в традиционных печах отношение выделившейся энергии к энергии подведенной может быть менее 10% [61]. В последние годы были сконструированы эффективные дровяные печи и бойлеры [7]. Значительная потеря тепла в простых топках происходит из-за чрезмерной тяги в дымоходе; простое ограждение для огня и ограничение тяги повышают эффективность сгорания до 25%. В настоящее время имеются значительно более эффективные дровяные печи; комната, где установлена такая печь, получает до 70% энергии сгорания топлива или в результате излучения, или в результате конвекции. Однако средняя эффективность дровяных печей составляет все еще около 50%.

Была разработана система центрального отопления с использованием дров в качестве топлива, дающая до 0,4 ГДж/ч. Технология и эффективность нагрева, обеспечиваемая обычными и усовершенствованными системами, достаточно полно описаны в литературе [8]. Основным недостатком многих систем является трудность обеспечения автоматической подачи топлива и необходимость постоянного внимания со стороны пользователей. В целях частичного решения проблемы были созданы системы, предназначенные для использования многих видов топлива; при желании работа в автоматическом режиме достигается путем переключения на ископаемые виды топлива.

Основной проблемой небольших систем сжигания биомассы является накопление агрессивных масел и смол в более холодных частях дымохода. Эти скопления необходимо периодически удалять; дымоход можно очищать также путем пропускания через него горячих газов (однако наряду с удалением нежелательных соединений теряется и полезное тепло).

**Промышленная технология сжигания.** Биомасса обычно используется в промышленности в качестве топлива только в тех случаях, когда она представляет собой остатки от переработки биологических материалов в другие, более ценные, продукты. Это имеет частичное значение с точки зрения охраны окружающей среды, так как удаление остатков является часто затруднительным. Два вида топлива биологического происхождения уже используются в промышленности, и методы сжигания их являются документально обоснованными: один вид топлива — солома, получаемая в сельском хозяйстве, другой — древесные отходы деревообрабатывающей промышленности. Ниже даются некоторые комментарии по используемой технологии.

Сжигание соломы на фермах практикуется в некоторых районах, а печи для сжигания соломы производятся в Дании в широком масштабе [9]. Однако, по крайней мере в Великобритании, после закупки в 70-х годах тысяч небольших бойлеров интерес к последним упал, и, по имеющимся данным, в настоящее время используется менее половины

закупленного оборудования [4]. Причина тому, по-видимому, неудобство работы с этим оборудованием, сгорание неустойчивое и неэффективное, а дым и сажа вызывают загрязнение окружающей среды. Выход тепла был ниже, чем это было гарантировано производителем. Появились усовершенствованные варианты с непрерывным сжиганием и разделением печи и бойлера (для повышения полноты сгорания), однако эти устройства стали более дорогостоящими, и они вышли из употребления.

Отрасли деревообрабатывающей промышленности используют древесные остатки для парообразования на месте производства. Пар используется для поддержания температурных условий процесса и для выработки электроэнергии [10]. Горячие продукты сгорания могут использоваться для сушки. Общие отходы деревообрабатывающей промышленности могут составлять до 50% от массы сырья. Содержание влаги в отходах составляет 30–50%. Паровые установки, использующие эти отходы, сжигают до 250 000 кг/ч. Используются несколько типов бойлеров и печей — например датские печи, печи с механической загрузкой, печи с наклонной решеткой. Сжигается как влажная (до 30% влаги), так и сухая древесина. Эффективность может быть такой же высокой, как и при сжигании других видов твердого топлива. Однако оборудование для сжигания часто включает высокоэффективные газовые и масляные установки (на случай отсутствия отходов).

Сжигание широко используется в целях утилизации городских и промышленных отходов. Несмотря на существование множества проектов по использованию полученного тепла для обогрева жилых домов, в большинстве случаев это тепло не используется. Стоимость сжигания может быть неожиданно высокой, но здесь первостепенное значение имеет борьба с загрязнением окружающей среды, а для некоторых отходов сжигание является единственно приемлемым способом их утилизации. Сжигание сортированных городских отходов и процессы регенерации энергии описаны в литературе [11].

### 3.2. СУХАЯ ПЕРЕГОНКА, ГАЗИФИКАЦИЯ И СЖИЖЕНИЕ

**Термическое повышение качества биомассы.** Основной целью всех процессов повышения качества биомассы является превращение ее в стабильное транспортабельное топливо, способное заменить ископаемые виды топлива без использования специального оборудования для погрузочно-разгрузочных работ. Путем сочетания нагрева и частичного сжигания биологических материалов можно получить твердые, жидкие и газообразные соединения, обладающие, по крайней мере, некоторыми свойствами угля, нефти и природного газа. В литературе описано много различных процессов, широко использовавшихся в прошлом; производство газа для использования его в качестве топлива путем сухой перегонки и газификации угля и биомассы было начато почти 200 лет назад. Различные термические процессы повышения качества биомассы, пред-

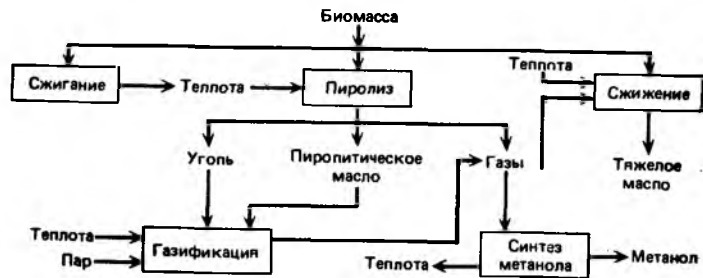


Рис. 9. Термическое обогащение биомассы.

лагаемые в настоящее время и использовавшиеся в прошлом, имеют много общих черт. Схематически используемые процессы представлены на рисунке 9.

При нагревании биомассы происходит распад углеродсодержащих молекул с образованием ряда газообразных, жидких и твердых продуктов. Специфические продукты реакции определяются температурой реакции, тепловой мощностью, степенью измельчения и типом биомассы, а также присутствием неорганических примесей и катализатора. Тепло, необходимое для осуществления этих изменений, носящих эндотермический характер, подводится или из внешнего источника, или путем введения воздуха или кислорода в реактор и сжигания части биологического материала.

Термины "сухая перегонка", "газификация" и "сжижение" не имеют точного значения в литературе. Газификация и сжижение биомассы происходят как в присутствии, так и в отсутствие окислительных ( $O_2$ , воздух) и восстановительных ( $CO$ ,  $H_2$ ) газов, обычно связанных с этими процессами. В настоящем исследовании сухая перегонка рассматривается отдельно как анаэробный процесс. Превращение биомассы в газы при сжигании на месте рассматривается как газификация. Понятие "сжижение" охватывает восстановление биомассы до масел под действием восстановительных газов, полученных также из биомассы.

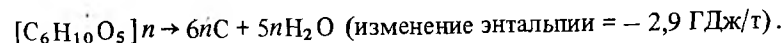
**Подготовка биомассы.** Высокая влажность биомассы представляет собой непосредственную проблему при осуществлении всех процессов повышения качества биотоплива вследствие затрат энергии на испарение воды и разбавления продуктов реакции непрореагировавшим паром. Большинство методов включают стадию высушивания при использовании уже частично высушенных материалов; однако в материале допускается определенное количество воды, которое необходимо для образования синтез-газа (паровая газификация). Биомасса, содержащая более 30% воды, потребует, очевидно, сушки перед осуществлением любых процессов.

Для облегчения процесса сушки, а также достижения требуемой скорости реакции в процессе тепловой обработки биомасса должна быть измельчена с получением соответствующих размеров частиц. Технологическая схема включает дробильные, измельчительные и размалывающие установки. Если биологический материал представляет часть общих отходов, необходим предварительный отсев негорючих и других примесей. "Уплотненная биомасса", о которой говорилось выше, может быть использована для процессов обогащения без дальнейших обработок [14].

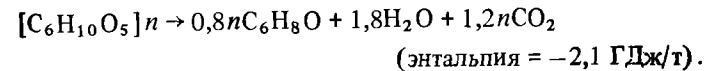
**Сухая перегонка.** Нагрев биомассы приводит к удалению влаги (ярко выраженный эндотермический процесс). При температуре выше  $100^\circ C$  биомасса начинает разлагаться, а между  $250$  и  $600^\circ C$  основными продуктами являются уголь и маслянистая кислая смесь дегтя и различных количеств метанола, уксусной кислоты, ацетона и следы других органических веществ. До развития нефтехимической промышленности источником этих соединений была перегонка древесины.

На рисунке 10 [12] показан в качестве примера пиролиз целлюлозы. При температуре свыше  $600^\circ C$  жидкие продукты пиролиза могут быть газифицированы, а свыше  $800^\circ C$  газифицируется также и уголь в результате эндотермической реакции углеродсодержащих молекул с водой с образованием синтез-газа, смеси оксида углерода и водорода.

Какие химические реакции протекают в процессе тепловой обработки биомассы, точно определить трудно вследствие очень сложной химической природы биомассы. Правда, основными компонентами многих типов растительного материала являются целлюлоза и крахмал, и нам известны некоторые реакции сухой перегонки этих продуктов и их термодинамика [14]. Сначала происходит карбонизация или обугливание:



Реакция является в некоторой степени экзотермической, т. е. такой же, как и получение пиролитического масла (в качестве средней молекулярной формулы пиролитического масла принимается формула  $C_6H_8O$ ):



Образование синтез-газа является в высшей степени эндотермической реакцией:

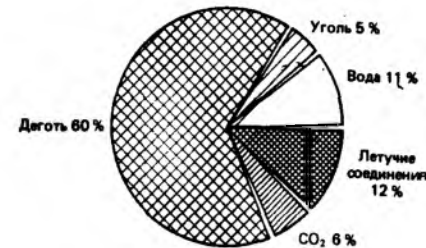
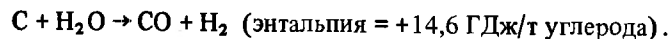
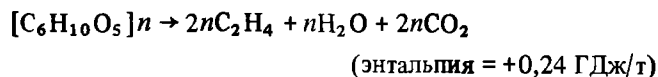


Рис. 10. Пиролиз целлюлозы.



При быстром нагревании целлюлозы, как при "мгновенном" пиролизе, может образоваться некоторое количество олефинов в ходе другой эндотермической реакции:



Несмотря на некоторые утверждения относительно автотермального характера (или близкого к автотермальному) процесса сухой перегонки биомассы, термическое обогащение биомассы обычно требует затрат теплоты, составляющих до 10 % теплоты сжигания сухой биомассы (примерно до 2 ГДж/т). Эта доля может быть значительно выше, например, при производстве угля, где происходит потеря летучих продуктов.

**Технология сухой перегонки.** За исключением производства высокоценного древесного угля, используемого как в качестве топлива, так и для других целей, сухая перегонка биомассы в промышленном масштабе не используется в развитых странах. Древесный уголь обычно получают путем нагревания древесины до 350 °С в пиролитическом реакторе. Выход составляет около 35 % топлива с энергоемкостью примерно 29 ГДж/т, т. е. сохраняется около 50 % энергии древесины.

Ниже даются комментарии по другим предложенным процессам. В одном из процессов используется пиролиз при 500–600 °С с повторным использованием газа для превращения углеродсодержащих материалов в уголь и вязкую, сильно окисленную топливную нефть. В другом процессе сильно влажная биомасса газифицируется с использованием пара при 600 °С и давлении 20 бар с получением синтез-газа. Наконец, быстрый пиролиз сухой биомассы при 800 °С ведет к образованию олефинов, которые могут быть полимеризованы в автомобильный бензин (его заменитель).

В "западном" процессе (ранее процесс Гарретта) [15] сырье должно быть высушено и тонко размолото. Теплота, необходимая для осуществления пиролиза, получается в результате сжигания газов и части угля, образовавшихся в результате реакции. Газы удаляются из угля в циклонном сепараторе до очистки от жидкостей и остающихся твердых частиц, а затем уголь и газы возвращаются в пиролизатор. Схематическая диаграмма этого процесса показана на рисунке 11. В целях максимизации выхода жидкости время пиролиза сокращается до нескольких секунд. Типичные свойства пиролитического масла, выход которого составляет около 40 % в расчете на сухое сырье, показаны в таблице 24. Пиролитическое масло не смешивается с топливной нефтью, имеет коррозионные свойства, аналогичные свойствам уксусной кислоты, и может храниться только в течение примерно двух недель вследствие продолжающихся

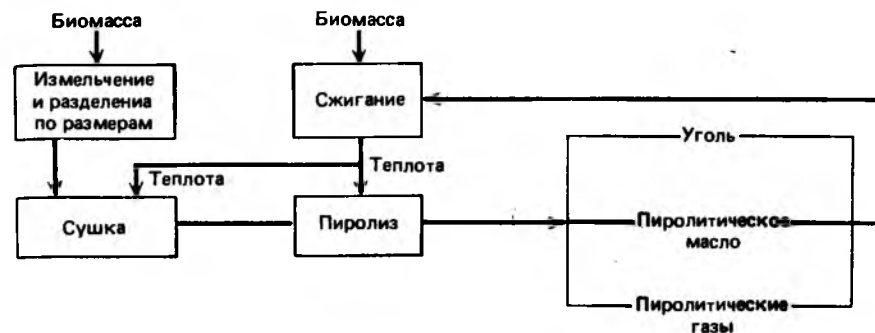


Рис. 11. Пиролиз биомассы.

химических реакций. Для использования этого масла в качестве топлива необходимо специальное оборудование. Теплотворная способность пиролитического масла составляет около 53 % теплотворной способности топливной нефти (по массе). Выход угля составляет от 20 до 50 %, содержание золы в угле до 50 %. Газы имеют низкую теплотворную способность и содержат до 65 % двуокиси углерода и до 8 % сероводорода.

Таблица 24. Свойства пиролитического масла

Углерод, %	57,5
Водород, %	7,6
Кислород, %	33,4
ГДж/т	24
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,3

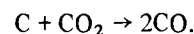
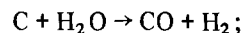
В ходе процесса Райта–Мальта [16] древесные стружки проходят через печь с продуктами реакции. В качестве катализатора добавляется древесная зола. Газы, жидкости и уголь газифицируются с помощью пара, присутствующего в древесине. Этот процесс считается автотермическим вследствие экзотермического характера разложения древесины и переноса тепла от горячих продуктов в систему.

Третий процесс, разработанный в Центре военно-морского вооружения, включает быструю паровую газификацию биомассы с образованием смеси олефиновых углеводородов [17]. Высушенную биомассу размалывают в муку, насыщают паром и остаточными газами полимеризационного реактора и нагревают до 800 °С. Эндотермическая реакция поддерживается путем сжигания пиролитического угля (побочного продукта) и отходящих газов. Образовавшиеся газы содержат около 4 % по массе



этилена, полимеризующегося до высших углеводородов при давлении около  $56 \text{ кг/см}^2$  и температуре  $500^\circ\text{C}$ . Однако побочные продукты не обеспечивают достаточного количества теплоты для протекания процесса, что вызывает необходимость сжигания дополнительного количества древесины. Выход автомобильного бензина и масла определяется термической эффективностью  $11,9\%$  в расчете на сухое древесное сырье.

**Окислительная газификация.** Газификация биомассы кислородом дает газ средней энергоемкости, содержащий в основном оксид углерода и водород. Аналогичная реакция происходит на воздухе, но образующиеся газы разбавляются азотом, снижающим теплотворную способность. Химический процесс газификации представляет собой сочетание химического процесса сжигания с некоторыми реакциями пиролиза, описанными в предыдущем разделе. Уголь, полученный в результате пиролиза, реагирует с паром или диоксидом углерода с образованием синтез-газа:



Пиролитические масла претерпевают аналогичные реакции. При температуре выше  $1000^\circ\text{C}$  единственно стабильными молекулами топливного газа являются молекулы  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$ . При более низких температурах стабильны молекулы этилена, метана и другие молекулы с небольшим весом.

Газификаторы классифицируют [13] следующим образом: газификаторы восходящего тока, нисходящего тока, кипящего слоя и взвешенного потока. Схематические диаграммы газификаторов восходящего и нисходящего токов показаны на рисунке 12. Последний тип широко использовался в период второй мировой войны на транспортных средствах, трейлерах и небольших силовых установках. Недавно газификаторы, работающие на угле, использовались на Филиппинах для различных форм транспорта [14]. Такие газификаторы нуждаются в постоянном уходе и внимательном отношении при запуске, регулировании и техническом обслуживании. Воздушные газификаторы представляются

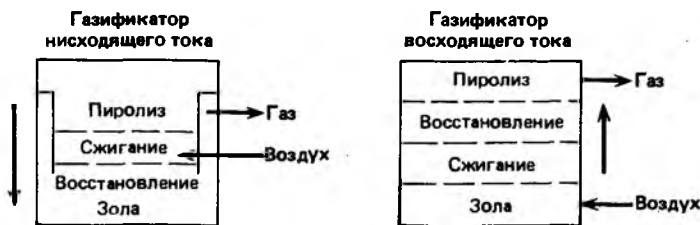


Рис. 12. Газификация способом нисходящего и восходящего токов.

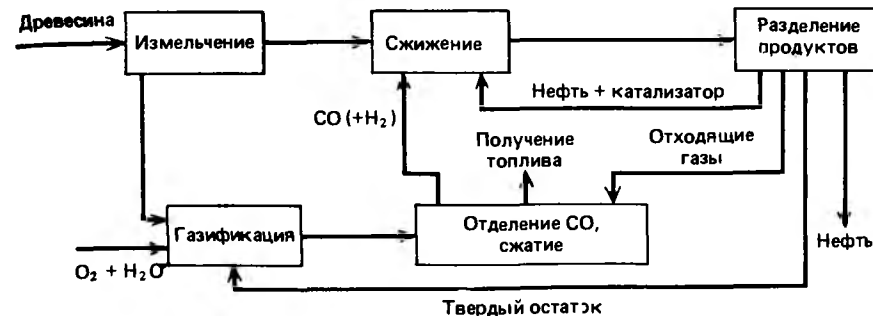
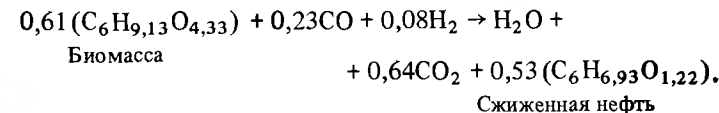


Рис. 13. Сжигание древесины.

как первые биотопливные системы будущего для замены существующих бойлеров и для обеспечения процессов необходимой теплотой с использованием отходов отраслей промышленности, перерабатывающих биомассу, например продовольствие и бумагу. Состав типичных газов, полученных с использованием кислородного газификатора, дает возможность химического их превращения, например, в метанол и аммиак.

**Сжигание/восстановление.** Были разработаны предложения по превращению биомассы в жидкость, напоминающую тяжелую топливную нефть, путем реакции ее с восстановительными газами (оксид углерода и водород) в присутствии катализатора. Обычно необходимо давление  $250 \text{ бар}$  и температура  $600-700^\circ\text{C}$ . Процессы сжигания обычно предполагают подготовку восстановительных газов путем пиролиза или окислительной газификации большого количества биомассы. В редких случаях можно получить дешевый водород из других источников, например при электролизе воды на гидроэлектрических установках.

По данным Питтсбургского энергетического центра [17], типичный процесс сжигания древесины выражается следующей реакцией:



Древесину высушивают до влажности  $4\%$ , размалывают в муку и смешивают с частью продуцированной нефти. В качестве катализатора добавляют карбонат натрия в количестве  $5\%$  по массе. Смесь древесины, нефти, пара и катализатора подвергают первоначальному давлению  $29 \text{ бар}$  и нагревают до  $300^\circ\text{C}$  в течение часа для обеспечения  $99\%$ -ного превращения древесины и выхода нефти  $56\%$ . Схематически процесс показан на рисунке 13, а состав сжиженной нефти дан в таблице 25. Нефть рекомендована для использования в качестве бойлерного топлива.

Таблица 25. Состав и свойства сжиженной нефти

Углерод, %	76,1
Водород, %	7,3
Кислород, %	16,6
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,1
ГДж/т	31,4

### 3.3. ГИДРОЛИЗ И ФЕРМЕНТАЦИЯ

Сахара биомассы. Все виды растительной биомассы содержат моно- и полисахариды, служащие как для аккумуляции энергии и углерода, так и в качестве структурного компонента. Хотя простые сахара встречаются в соке всех растений, только экстрагирование их из сахарного тростника и сахарной свеклы носит промышленный характер. Тем не менее эти растения являются основным источником производства сахара в мире. Полимерные сахара являются основными компонентами растительной биомассы и служат главными продуктами питания человека, животных, используются в качестве материалов для строительства, производства одежды, а также в целом ряде других отраслей экономики.

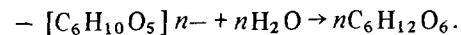
Углеводы можно экстрагировать из сырой биомассы путем использования целого ряда химических и механических методов — от применения простого давления при переработке сахарного тростника до химического экстрагирования с высокими затратами энергии и сульфатной варки древесины. В таблице 26 представлены некоторые виды сахаров (мономеры, олигомеры и полимеры), полученные из различных видов растений и отходов биомасс. Выход углеводов колеблется в широком диапазоне (в расчете на сухую биомассу) и может составлять

Таблица 26. Углеводы и источники их получения

Источник	Углевод
<b>Моносахариды и олигосахариды</b>	
Сахарный тростник и сахарная свекла	Сахароза
Меласса	Сахароза, глюкоза, фруктоза
Отходы молочной промышленности	Лактоза, галактоза
Сорго сахарное	Сахароза, глюкоза
<b>Полисахариды</b>	
Древесные и пожнивные остатки	Целлюлоза, гемицеллюлоза
Городские и бумажные отходы	Целлюлоза
Кукуруза и другие зерновые	Крахмал
Маниок и картофель	Крахмал

до 60% (целлюлоза) в древесине и около 15–20% (сахароза) в сахарном тростнике и сахарной свекле.

Гидролиз. Перед ферментацией олигосахариды и полисахариды обычно следует гидролизовать до моносахаридов в отдельном реакторе. Гидролиз целлюлозы и крахмала идет следующим образом:



Гидролизуемость материалов (легкость, с которой происходит гидролиз) в значительной степени варьирует. Крахмал и пентозаны (гемицеллюлозы) требуют относительно мягких условий. При их гидролизе используют разбавленные кислоты и невысокие температуры; гидролиз целлюлозы проходит при более высоких температурах, с использованием более сильных кислот и реакторов под давлением. Все полисахариды также разлагаются до некоторой степени под действием ферментов. Крахмал гидролизуется относительно легко под действием как кислоты, так и ферментов, в то время как целлюлоза обычно требует предварительной обработки для высвобождения связанного лигнина перед тем, как она будет подвержена ферментативному гидролизу. Скорость гидролиза целлюлозы при участии ферментов низка. Наиболее часто встречающиеся моносахариды в гидролизованной растительной биомассе — это глюкоза, фруктоза и ксилоза. Практически все природные сахара имеют в своей основе пять (пентоза) или шесть (гексоза) атомных углеродных групп. Технология гидролиза крахмала является хорошо обоснованной. Обычным промышленным сырьем являются кукуруза и другие зерновые, а также картофель, переработка которых проходит в одну или две стадии (двойная кислота, кислота/фермент или двойной фермент). Крахмал растворяется при нагревании в воде, что вызывает "разжижение" полисахаридов с расщеплением полимерных цепей кислотой или альфа-амилазой. Гидролиз до моносахаров (сахарификация) осуществляется снова кислотой или амилоглюкозидазой. Продуктивность ферментативного процесса является низкой по сравнению с химическими методами, и для осуществления максимальной сахарификации необходимо не менее трех дней. Хотя в прошлом специфичность реакции была хуже для кислого гидролиза, ферментируемые сахара получают теперь в пределах минут, а не часов, и сейчас фактически возможно получение большого выхода моносахаридов [18].

В настоящее время промышленный гидролиз целлюлозы в странах свободного рынка не осуществляется, так как разработанные ранее технологии, такие, как процессы Сколлера и Мэдисона, по имеющимся данным, являются неэкономичными [19]. В настоящее время в литературе появились описания усовершенствованных процессов кислого гидролиза целлюлозы, а также новейших ферментативных процессов, включающих многофазовые реакции при различных температурах, предварительную обработку целлюлозы и использование новых видов ферментов.

**Ферментация.** В анаэробных условиях моносахариды могут быть превращены в спирт с помощью различных микроорганизмов. Выход спирта при превращении гексоз с участием дрожжей рода *Saccharomyces* составляет при благоприятных условиях до 90 % от теоретической стехиометрии реакции:  $C_6H_{12}O_6 \rightarrow 2C_2H_5OH + 2CO_2$ .

Однако здесь может образовываться ряд других продуктов [20], особенно при высоких значениях pH, как это показано в таблице 27.

Таблица 27. Продукты ферментации глюкозы

Продукт	Ферментировано углерода (глюкозы), %	
	pH 3,0	pH 7,6
Этанол	57,3	43,3
Двуокись углерода	30,2	24,8
Глицерол	3,1	16,0
2,3-Бутандиол	0,5	0,5
Молочная кислота	0,4	0,7
Янтарная кислота	0,3	0,5
Уксусная кислота	0,2	5,0
Муравьиная кислота	0,1	0,1
Клетки	Примерно 4	

Если реакция доходит до конца, превращение ферментируемых сахаров может быть 100 %-ным. Если концентрация спирта достигает ингибиторного уровня (8–10 %), превращение может быть неполным. Рост дрожжей становится ограниченным вследствие низкого обеспечения энергией в ходе реакции; таким образом, образовавшийся спирт препятствует увеличению калорийности субстрата. Многие другие организмы, включая другие виды грибов, бактерий и зеленых растений, могут в анаэробных условиях превращать сахара в спирт, причем некоторые организмы осуществляют эти превращения с высокой эффективностью, например бактерии *Zymomonas mobilis* [21]. Однако выход спирта часто бывает значительно меньше, чем при участии дрожжей, при этом происходит образование большого количества других продуктов, таких, как ацетаты, лактаты и глицерол.

Некоторые микроорганизмы, например виды *Clostridium*, разлагающие целлюлозу, могут сочетать оба процесса гидролиза и ферментации. Такие реакции протекают медленно, и выход спирта является низким.

Продуктивность спиртового брожения является высокой по сравнению с продуктивностью многих биологических реакций, но низкой по сравнению с продуктивностью реакций, протекающих в среде синтез-газа, используемых для получения больших объемов химических про-

Таблица 28. Продуктивность химических и биологических реакций

Продуктивность реактора	кг/м <sup>3</sup> /ч
Этанол при периодической ферментации	1
Метанол из синтез-газа	400–650
Специфическая активность катализатора	кг/кг/г
Ферментация с применением дрожжей	0,6
Получение метанола из синтез-газа	1000

дуктов (табл. 28). Биологические катализаторы (дрожжи) также менее эффективны, чем химические. Эти наблюдения важны при сравнении стоимости химических и биологических процессов.

В своей простейшей форме ферментация осуществляется партиями в сосудах вместимостью от 200 до 2000 м<sup>3</sup>. Микробная "закваска" готовится заранее в неполных аэробных условиях с использованием того же субстрата, что и для ферментации. Реакция ферментации в разбавленном растворе сахара заканчивается через несколько дней; образовавшаяся жидкость содержит 5–10 % спирта, в зависимости от источника сахара. За последние годы был использован ряд новых типов ферментаторов, включая ферментаторы непрерывного действия и типа клеточной рециркуляции. Некоторые из этих ферментаторов используются в промышленности, особенно для производства этилового спирта. Периодическая ферментация предпочтительна при производстве спиртных напитков, а также в большинстве случаев производства этилового спирта, так как технология периодического производства этилового спирта, не требует тщательного контроля, как при непрерывном типе производства.

**Перегонка.** Цель начального этапа перегонки – отделение жидкости от твердых частиц в сбраживаемой массе. Фракционирование дистиллята дает раствор, содержащий 50–70 % спирта, а при последующих (водных) перегонках концентрация спирта может быть 90–94 %. Более высокие концентрации обычно невозможны вследствие образования азеотропной смеси спирт – вода при концентрации этанола около 95 %; таким образом, в последующих перегонках используют азеотропобразователь (например, бензол, циклогексан) с получением 99,9 %-ного этанола.

Кроме спирта, процессы брожения и перегонки дают остатки и стоки, которые следует удалять. Остаток от перегонки имеет высокую способность к поглощению кислорода вследствие наличия несброженных сахаров и других компонентов биомассы. Объем этих остатков в 15 раз

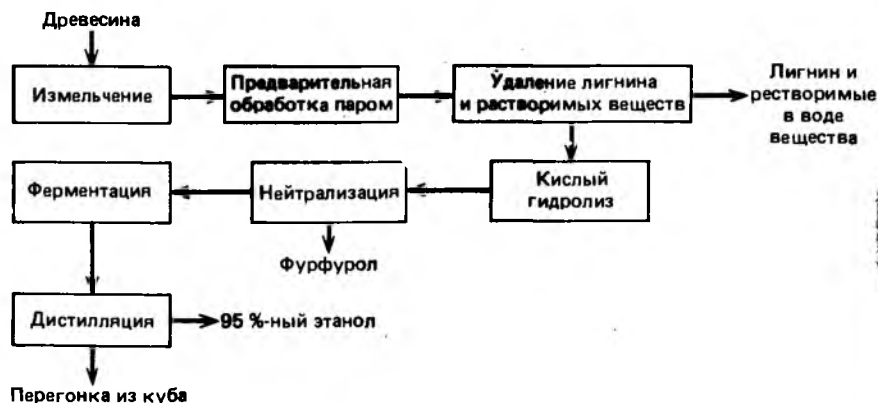


Рис. 14. Превращение древесины в спирт.

больше объема произведенного спирта. Остатки обычно сбрасывают в реки и моря, а также вносят в почву.

На рисунке 14 схематически показан типичный процесс получения топливного спирта из древесины [22]. В литературе описано много других вариантов с использованием иных источников углеводов, начиная от соломы и отходов бумажной промышленности и кончая городским мусором [23].

**Спирт как топливо.** Спирт может быть использован в качестве бойлерного топлива при высокой термической эффективности (75–80%), но по сравнению с топливной нефтью его теплотворная способность составляет только 66% по массе, или 57% по объему. Смесь спирта с водой, полученная в результате водной перегонки, может быть использована непосредственно в качестве заменителя бензина в двигателях внутреннего сгорания, правда, они должны быть соответствующим образом приспособлены для этой цели. Основными показателями топлива являются его потребление и рабочие характеристики. Газохол представляет собой смесь 99,9%-ного этанола с автомобильным бензином, которая может содержать до 20% спирта. Хотя спирт повышает октановое число (антидетонационные свойства) бензина, улучшение рабочих характеристик смеси не доказано; автомобили, однако, могут использовать газохол как после небольших переделок, так и без них.

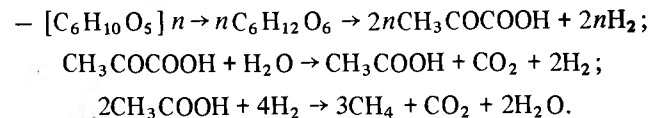
#### 3.4. АНАЭРОБНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ

Некоторые органические молекулы биомассы могут подвергаться анаэробному разложению в результате деятельности микроорганизмов. Основные продукты распада — диоксид углерода, метан и большое число микробных клеток. В природе этот процесс протекает в гнилойной

среде. С прошлого века его использовали для обработки больших количеств шлама (осадка сточных вод). Главное преимущество этого метода — сокращение числа и обезвреживание твердых частиц стока, а также снижение количества твердых частиц вторичного отстоя очистительных установок. Только крупные канализационно-очистные сооружения используют выделившийся метан как источник энергии; небольшие очистные сооружения, имеющие реакторы, могут сжигать газ или использовать его для подогрева самих реакторов. Из 5000 канализационно-очистных сооружений в Великобритании только около 300 имеют реакторы [24]; с появлением фирм, поставляющих готовые реакторы, это число стало увеличиваться. За последние годы была предложена технология удаления навоза на крупных предприятиях интенсивного животноводства; удаления стоков с предприятий, занимающихся переработкой биологических продуктов, например переработкой продуктов питания; превращения биомассы в энергию. Эта технология — одна из наиболее простых среди технологий получения топлива из биомассы. В результате эта технология особенно пропагандировалась для использования в странах третьего мира, где устанавливается большое число реакторов.

**Химия.** Среди различных категорий углеродсодержащих соединений биомассы разложение углеводов наиболее важно, и этот процесс в достаточной мере исследован. Липиды и жиры, белки, а также другие азотистые соединения также катаболизируются. Биомассу могут разлагать различные микроорганизмы. Организмы, участвующие в разложении полисахаридов, делятся на две группы. В первую группу входят организмы, осуществляющие гидролиз и превращение биомассы в низкомолекулярные карбоновые кислоты и водород. Вторая группа превращает продукты первой реакции в метан и диоксид углерода.

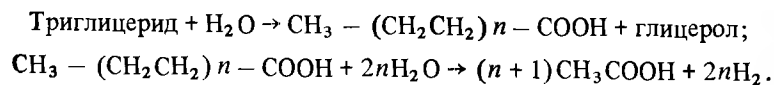
Скорость гидролиза полисахаридов зависит от их типа. Как было показано в предыдущем разделе, крахмал гидролизует относительно легко, в то время как целлюлоза в сочетании с лигнином может разлагаться очень медленно или не разлагаться совсем. Образовавшиеся моносахариды, например глюкоза, подвергаются дальнейшему разложению под действием ферментов до пируватов, а затем — до различных продуктов, основными из которых являются уксусная кислота и водород. Затем под действием других микроорганизмов происходит превращение этих продуктов в диоксид углерода и метан:



Метаногенные организмы очень легко подвергаются самоотравлению, в результате чего прекращается рост и происходит накопление диоксида углерода, водорода, ацетатов и пропионатов.

Белки разлагаются в реакторах до аминокислот и олигопептидов, которые могут дезаминироваться до аммиака или войти в состав живой биомассы. Может также произойти расщепление небелковых азотистых соединений до кислот, диоксида углерода и аммиака.

Жиры, по-видимому, расщепляются вследствие гидролиза на глицерол и жирные кислоты. Уксусная кислота и водород, образовавшиеся в результате разложения жирных кислот, превращаются в метан под действием метаногенных бактерий:



**Технология.** Современная очистная установка может быть вместимостью от 500 до 4500 м<sup>3</sup>. Крупные емкости строятся из бетона и стали. Стальные емкости покрывают изоляционным материалом, а поверхность, находящуюся в контакте с содержимым реактора, — эпоксидной смолой или аналогичным материалом. Содержимое перемешивают с помощью крыльчатки или винтового насоса, расположенных в емкости, а также путем прокачки жидкости через внешний обводной трубопровод или путем повторной циркуляции отходящих газов. Перемешивание и нагрев часто чередуются или осуществляются одновременно; перемешивание служит в основном для предотвращения образования поверхностных корок, особенно при обработке сельскохозяйственных отходов. Нагревание необходимо потому, что при умеренной температуре окружающей среды реакция протекает слишком медленно; нагрев до 30–35 °С одновременно обеспечивает высокую скорость реакции и в то же время позволяет избежать чрезмерных расходов. Реактор должен работать по возможности непрерывно, так как прерывистая работа малоэффективна. Для обеспечения непрерывной подачи материала устанавливается специальная емкость, а для отвода используется уровень. Небольшие очистные сооружения часто имеют систему загрузки партиями (при наличии первичных и вторичных сточных осадков). Время нахождения жидкости в реакторе обычно составляет от 10 до 30 дней; в случае труднообрабатываемых материалов и при температурах, ниже оптимальных, эти сроки могут увеличиваться до нескольких месяцев. Реакторы для навоза, других органических отходов и растительных остатков мало отличаются от систем, описанных выше. Поскольку стоимость реакторов для отбросов и сточных вод при проектировании их только для производства биотоплива крайне высокая, был предложен ряд более дешевых вариантов, например резинопластиковые надувные емкости, емкости, вырытые в земле и выстланные специальными материалами, и т. д. Такие варианты должны рассматриваться как экспериментальные, так как их срок службы значительно короче, чем срок службы более прочных и надежных систем, описанных выше.

Таблица 29. Параметры процессов при анаэробном разложении

Материал	Продуктивность, кг СН <sub>4</sub> / (м <sup>3</sup> · ч)	Выход, кг СН <sub>4</sub> / кг летучих твердых частиц	Превращение, %
Свиной навоз	0,01 – 0,025	0,25 – 0,5	40 – 90
Растительные остатки и т. д.	0,001 – 0,01	0,03 – 0,2	10 – 50

В таблице 29 показаны выход, продуктивность и степень превращения сырья при анаэробном разложении биомассы. Цифры представляют собой типичные значения, взятые из литературы; совершенно ясно, что все три параметра невысоки по сравнению с другими методами обогащения биомассы. Наиболее легко превращаемым материалом является навоз нежвачных животных, а также легкогидролизуемый крахмал, белки и моносахариды. Растительные остатки, отходы целлюлозы и навоз жвачных трудно разлагаются и требуют длительного нахождения в реакторе. Загрузка реактора зависит от типа материала; обычно поступающий материал содержит 3 % твердых частиц при максимальном их содержании 5 %. Были сконструированы реакторы для более концентрированного материала, однако здесь возникает проблема с перекачкой. Разлагаемая часть отходов (летучие твердые частицы) может составлять до 90 % общего количества твердых частиц, но обычно их доля составляет около 70 %.

Были предложены и испытаны другие типы реакторов (автоклавов) — клеточно-рециркуляционный (контактный) реактор, анаэробные фильтры, реакторы с псевдосжиженным слоем и с восходящим взвешенным слоем осадков. Последний тип получил распространение, так как флокулированная биомасса остается в реакторе, сток является сравнительно чистым, а закачка сырья, служащего пищей микроорганизмам, проводится в основание реактора. При такой конструкции время нахождения жидкости в реакторе значительно короче, однако эта конструкция пригодна только для обработки растворов и суспензий с низким содержанием органического вещества. Такая технология больше подходит для очистки сточных вод, чем для производства биотоплива.

Хранение биогаза обычно считается крайне дорогостоящим. Стоимость газометров может в 4 раза превышать капитальные затраты на строительство самого реактора, поэтому газ должен быть или немедленно использован, или удален. Газ используется прежде всего для нагревания реактора до рабочей температуры. В Великобритании это требуется делать круглый год, и зимой часто возникает необходимость дополни-

тельного подогрева с использованием природного или сжиженного нефтяного газа. При наличии излишков биогаза последний может быть использован в силовых установках или в качестве топлива для двигателей. Для нагрева автоклавов могут также быть использованы вода, охлаждающая генераторы, или выделившаяся теплота. Состав биогаза (табл. 30) делает его малоприспособленным для подобного использования, так как он высокоагрессивен и приводит к разрушению большинства обычных насосов и трубопроводов. Сероводород способствует коррозии двигателя и должен быть удален; диоксид углерода и влага, содержащаяся в газе, снижают ценность топлива для двигателей внутреннего сгорания, которые не будут работать на смесях, содержащих более

Таблица 30. Состав газа, выделяющегося при анаэробном разложении

Состав	%
Метан	20–80
Двуокись углерода	15–16
Вода	2–3
Азот	0,5–1
Сероводород	До 1

45 %  $\text{CO}_2$ . Однако теплотворная способность биогаза обычно достаточна для использования его в модифицированных бойлерах, дизельных и карбюраторных двигателях, устанавливаемых, в частности, на крупных очистных сооружениях. Для транспортных средств необходимы компрессоры для снижения объема газа до приемлемого уровня.

**Опасности, связанные с использованием биогаза.** Следует упомянуть о двух важных обстоятельствах, связанных с подготовкой и использованием биогаза при самостоятельном его изготовлении. Во-первых, смесь метана с воздухом взрывоопасна, и, во-вторых, что более серьезно, сероводород, присутствующий в биогазе, крайне токсичен. В промышленных условиях принимаются соответствующие меры безопасности, однако недостаточно осторожное обращение с этим газом может оказаться роковым.

**Удаление сброженного осадка.** Заключительной проблемой, связанной как с использованием энергии, так и с охраной окружающей среды, является удаление осадка из автоклава, объем которого может достигать 50–60 % исходного количества твердых частиц; что касается коммунальных отходов, то этот объем составляет 10–15 %. Там, где возможно, эти осадки вносят в почву как удобрения, правда, использовать их на тяжелых глинах и заболоченных почвах не рекомендуется. Возможно, возникнет необходимость транспортировки сброженных осад-

ков в места отсыпки грунта и к морю. Для сокращения транспортных расходов используется отстаивание, коагуляция и другие методы обезвреживания. Содержание меди, цинка и других токсичных металлов в сброженном осадке затрудняет его использование в качестве удобрения. Имеются предложения по переработке осадка в корма для животных; технически это осуществимо. Были проведены некоторые эксперименты по включению осадка в корма, однако сомнительно, чтобы это соответствовало критериям, определяющим требования к здоровью животных и вкусовым качествам корма. Экстрагирование и очистка белкового компонента осадка, по-видимому, нерентабельны.

**Места отсыпки грунта.** Основная масса городских отходов в развитых странах удаляется путем их транспортировки в места отсыпки грунта, где находятся свалки мусора. Эти свалки представляют собой гигантский биореактор, загруженный сырьем при фактически нулевой стоимости. Метан, медленно образующийся в биомассе, может быть собран и использован аналогично тому, как это имеет место в обычных реакторах. Экономика этого процесса будет рассмотрена позднее; по имеющимся данным, она значительно более благоприятна, чем при использовании реакторов интенсивного типа.

### 3.5. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА

Масла, парафин, смолы и другие растворимые в растворителях соединения встречаются во всех растениях. Маслянистые соединения могут составлять до 40–50 % биомассы, и они относительно легко экстрагируются. Эти соединения – сырье для многих отраслей мировой промышленности (табл. 31). Они используются человеком в пищу, в качестве корма для животных, пищевых добавок, душистых веществ, а также как сырье для производства широкого ассортимента товаров. Однако объем этой продукции и ее энергоемкость малы по сравнению с продукцией минеральных масел. Растениеводческая наука оказала значительное

Таблица 31. Продукция отраслей промышленности, производящих растительные масла, парафин и смолы

Продукт	Примерное производство, млн. т в год
Растительные масла	60
Природный каучук	4
Талловое масло	1
Медицинские и лаковые смолы	Незначительное, на отдельных предприятиях
Эфирные масла	На отдельных предприятиях до 4000 т в год

влияние на географическое распределение, урожайность и стойкость культур многих видов, дающих маслоподобные вещества. В качестве примера можно привести такие достижения нашего столетия, как получение соевого, сурепного, таллового масла и каучука. Процесс экстрагирования высококалорийных растительных компонентов относительно прост и находит широкое применение.

**Химия.** Масла, парафины и смолы в растениях характеризуются почти таким же сложным химическим составом, как и состав сырой нефти. Типичные молекулы масляно-растворимой фракции биомассы показаны в таблице 32. Алканы, изоалканы, нафтены и сложные эфиры характеризуются различной степенью ненасыщенности и замещения в различных ядрах полициклического соединения. Сильно насыщенные высокомолекулярные соединения могут находиться в твердом состоянии (например, парафины), в то время как полимеризованные углеводороды могут быть эластичными (например, природный каучук, или гуттаперча). Включение кислорода в углеводородный скелет ведет к увеличению растворимости соединения в воде и появлению смолоподобных свойств (например, смолы). Наиболее полезными соединениями с точки зрения использования их как топлива являются, однако, смеси жидких углеводородов. В значительной мере эти соединения представлены триглицеридами со средней длиной цепи ( $C_8 - C_{20}$ ), а также насыщенными и ненасыщенными жирными кислотами.

Таблица 32. Типичные соединения липидной фракции биомассы

Природные липиды	Присутствующие химические типы
Растительные масла	Триглицериды
Парафины	Алканы и жирные сложные эфиры
Природный каучук	Полиизопрен
Талловое масло	Альфа-пинен, абиетиновая кислота, олеиновая кислота
Эфирные масла	Гераниол, L-ментол и т. д.
Смолы	Неизвестен, по-видимому, аналогичен абиетиновой кислоте

**Типы масел.** Ресурсы сырой биомассы как сырья для производства растительного масла можно разделить на две широкие группы: сельскохозяйственные культуры, например соя, подсолнечник, рапс, и древесные культуры, например масличная и кокосовая пальмы. Возделывание последних в основном ограничено жарким климатом и является трудоемким, так как урожай убирают вручную, а выращивание и сбор семян масличных культур проводятся при высоком уровне механизации. В таблице 33 суммировано годовое производство масла в результате

Таблица 33. Мировое производство растительных масел

Древесные культуры	Примерное мировое производство, млн. т в год
Масличная пальма	4,1
Кокосовая пальма	2,7
Тунг	1,1
Маслина	1,5
Сельскохозяйственные культуры	Примерное мировое производство, млн. т в год
Соя	10,0
Арахис	3,5
Хлопчатник	3,0
Подсолнечник	3,7
Рапс	2,6
Другие	2,3

возделывания древесных и сельскохозяйственных культур. В условиях умеренного климата наиболее важной культурой является соя, а в тропиках — пальма; в северных районах умеренной зоны рапс — часто единственная масличная культура, возделывание которой оказывается экономичным.

Талловое масло, скипидар и канифоль получают в значительных размерах из мягкой древесины в процессе варки целлюлозы. Производство сконцентрировано в странах, перерабатывающих большие количества древесины, например США.

Большую часть природного каучука получают из одного вида (*Hevea brasiliensis*), выращиваемого в основном в Малайзии. Другие растения, использованные в прошлом, представлены различными видами диких каучуконосов, гваюлой серебристой и одуванчиками. Другими каучукоподобными веществами, распространенными в прошлом, были гуттаперча, балата и чикл.

Эфирные масла и смолы получают из громадного разнообразия видов растений, многие из которых произрастают в тропиках. Установлено около 3000 видов эфирных масел, из которых примерно 150 находят промышленное применение. Наиболее важные из них — хвойное, цитронелловое, лемонграссовое, лавандовое, цитрусовое и мятное. Однако в противоположность растительным маслам большинство эфирных масел и смол встречаются в растениях в концентрациях всего до несколь-

ких процентов. По этой причине они дорогостоящи и добываются из-за своих уникальных свойств.

Повсеместное распространение углеводов и им подобных соединений в биомассе дало основание сторонникам биоэнергии заглянуть дальше, чем это позволяет современное состояние отраслей промышленности по производству жиров и масел. Так, латексы, получаемые из растений рода *Euphorbia*, являются основными продуктами "нефтяных плантаций" [25]. Жиры и масла, обнаруженные в микроорганизмах, по прогнозам, должны конкурировать с жирами и маслами высших растений [26]. В частности, углеводороды, содержащиеся в водорослях *Botryococcus braunii*, были подвергнуты расщеплению с получением жидких видов топлива, а в будущем они могут быть использованы как заменители масла [27]. Существует утверждение, что половина органического вещества, синтезируемого первичными производителями в морской среде, со временем превращается в парафин [28]. Эти возможные пути получения топлива находятся на самых ранних стадиях разработки и должны рассматриваться в плане современного производства масел и жиров.

**Технология экстрагирования.** Для получения растительных масел исходные материалы подвергаются целому ряду предварительных процессов для удаления инородных веществ, раковин, зародышей с последующим размолом. Затем мука нагревается, и масло извлекается при низком или высоком давлении и (или) путем экстрагирования с использованием трихлорэтилена или гексана. Жмых по возможности скормливают скоту, а при содержании ядовитых веществ в семенах (клещевина, тунг) он идет на удобрение. Полученное масло очищают путем нейтрализации, этиолирования, дезодорации и удаления составных частей с высокой точкой плавления; из масла также удаляют растительный клей путем фильтрации через соответствующие адсорбенты.

Масла и смолы извлекали из хвойных деревьев путем подсочки или экстрагирования растворителем, однако сейчас этот метод утратил свое былое значение, так как эти вещества производятся теперь в больших количествах при периодической и непрерывной сульфатной варке древесины хвойных пород. Скипидар получают путем конденсирования паров при сухой перегонке древесной стружки и из таллового масла путем механического сбора подкисленной жидкости при варке. Талловое масло содержит 40–60 % смоляных кислот, 40–50 % жирных кислот и 5–10 % нейтральных веществ. Выход экстрактивных веществ составляет до 25 % от массы древесины. Выход таллового масла при сульфатной варке составляет 10–100 кг на 1 т пульпы, при этом при варке сосновой древесины выход выше. Ель и твердые породы дают небольшой выход таллового масла.

Эфирные масла экстрагируют путем перегонки с водяным паром под давлением в контакте с абсорбентом, а также способом экстрагирования с растворителем и прессованием. Иногда для разложения биомас-

сы и высвобождения масел применяют процесс брожения. Для получения масел широко используют перегонные кубы, особенно в странах третьего мира. Смолы собирают большей частью с поврежденных участков поверхности растений. Приготовлению лаков и медицинских препаратов предшествует ряд обогатительных процессов.

Мука, получаемая при производстве растительного масла, является важным побочным продуктом, ценность которой, например у сои, составляет 60 % ценности самой сои. Кукурузное масло является второстепенным продуктом процесса переработки кукурузы. Таким образом, производство масла можно рассматривать просто как неотъемлемую часть процесса фракционирования культур.

**Растительные масла как топливо.** Масла, обычно предлагаемые для использования в качестве топлива, являются относительно дешевыми продуктами, полученными из семян таких масличных культур, как соя, подсолнечник и рапс, а также некоторых древесных культур. Благодаря высокой теплотворной способности они могут использоваться в отопительных системах и в двигателях внутреннего сгорания, главным образом в дизельных. При удалении растительного клея и влаги они могут использоваться непосредственно без модификации двигателей. Удаление воды является важным, так как растительные масла представляют собой главным образом сложные эфиры, относительно легко гидролизующиеся с образованием глицерола и жирных кислот. Последние при повышенных температурах очень агрессивны по отношению к металлам. Растительные масла были использованы в прототипе двигателя, разработанного Рудольфом Дизелем, и с тех пор периодически предлагаются для использования в качестве дизельного топлива [29]. Это отчасти объясняется крайней неустойчивостью цен на натуральные масла, которые за один сезон могут удвоиться или снизиться вдвое [30]. Перепроизводство — обычное явление, и, весьма вероятно, оно снова будет иметь место через несколько десятилетий [31].

В таблице 34 представлены свойства рапсового масла и дизельного топлива. Главной проблемой, связанной с натуральными маслами и не указываемой в обычных технических условиях на топливо, является

Таблица 34. Свойства рапсового масла и дизельного топлива

Свойство	Рапсовое масло	Дизельное топливо
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,92	0,82
Теплотворная способность, ГДж/м <sup>3</sup>	36,2	37,2
Кинематическая вязкость, сантистоксы	97,7	2–8
Температура воспламе- ния, °С	317	55



их термическая нестабильность. Многие краткосрочные опыты по использованию растительных масел в качестве топлива дали приемлемые результаты [32, 33]. Кривые "мощность/скорость", полученные на основании динамометрических испытаний, были аналогичными для рапсового масла и дизельного топлива, а также для их смеси 50:50. Однако в камере сгорания происходит быстрое накопление осадка, забивание форсунок, закоксовывание поршневых колец и застуднение смазочного масла. В результате ухудшаются рабочие характеристики двигателя и падает его мощность. Другая проблема связана с высокой вязкостью растительного масла (например, рапсового), в результате чего снижается степень распыла масла и при низких температурах забиваются фильтры. Возможно, потребуется предварительное нагревание топлива.

Может оказаться затруднительным пуск двигателя на растительном масле, и для этой цели рекомендуется использовать дизельное топливо. Эмиссия двигателя выше при использовании растительного масла, чем дизельного топлива [34].

Таблица 35. Относительная ненасыщенность растительных масел

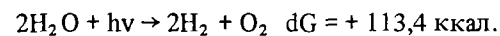
Растительное масло	Иодное число
Кокосовое	14 – 24
Пальмовое	48 – 58
Рапсовое	94 – 106
Кукурузное	116 – 130
Подсолнечное	122 – 136
Соевое	124 – 136

Термическая стабильность растительных масел обычно связана со степенью их ненасыщенности, выражаемой количественно иодным числом (табл. 35). Относительно насыщенные масла, такие, как кокосовое масло, имеют лучшие рабочие характеристики, чем ненасыщенные, например подсолнечное масло; однако насыщенные масла более вязки и имеют более высокую точку плавления, чем ненасыщенные. Одним из возможных решений проблемы является частичная гидрогенизация последних; другим решением может быть химическое превращение масел в этиловые и метиловые эфиры составляющих жирных кислот, использование которых более предпочтительно, чем использование триглицеридов. Хотя полученные соединения имеют более низкую молекулярную массу и более стабильны, чем исходные масла, этот процесс заметно повысит стоимость топлива.

### 3.6. ПРОИЗВОДСТВО БИОЛОГИЧЕСКОГО ВОДОРОДА

**Химия.** Образование водорода происходит в живых клетках в процессе фотосинтетического расщепления воды в ходе фотохимических светочувствительных реакций с использованием водородных доноров, иных, чем вода (например, соли или эфиры яблочной кислоты, ацетаты), а также в ходе различных других катаболических реакций, таких, как анаэробное разложение. Мы рассмотрим только первый тип реакции, так как второй тип предполагает использование уже готовых органических молекул, а третий тип частично затронут в разделе, описывающем разложение, где образование водорода представлено как нарушение хода процесса.

В идеале биофотолитиз представлен следующим уравнением:



Одновременное выделение кислорода и водорода усложняет дело, так как получаемая смесь является взрывоопасной, а также вследствие необходимости разделения двух газов.

В микроорганизмах образование водорода происходит при участии гидрогеназы. Высшие растения не имеют этого фермента в своем фотосинтетическом аппарате и не образуют водорода; однако внутриклеточный экстракт из высших растений при добавлении активного препарата гидрогеназы выделяет водород. Обычно фотолитическое образование водорода в природе не происходит, но оно может быть вызвано, например, азотным голоданием сине-зеленых водорослей и манипулированием с бесклеточными системами. По литературным источникам, получение водорода предполагает использование клеток или экстрактов высших растений, сине-зеленых водорослей, зеленых и других водорослей, а также фотосинтетических бактерий.

**Технология.** Даже на лабораторном уровне не удалось продемонстрировать практического метода получения чистого водорода на основе биофотолитиза. Сине-зеленые водоросли выделяют смесь водорода и кислорода с эффективностью около 1%, а внутриклеточные экстракты высших растений – с еще более низкой эффективностью [35]. Все системы характеризуются недостатком стабильности, так как в целых клетках необходимое условие азотного голодания ослабляет организмы и происходит потеря фотосинтетического пигмента. Период жизни внутриклеточных систем недолог вследствие воздействия ферментов на структурные липиды и белки, а также вследствие повреждения, вызываемого действием света и свободных радикалов. Сама гидрогеназа также нестабильна.

Все целые клеточные системы характеризуются необходимостью сохранения физиологического состояния всего клеточного аппарата; это ведет к чрезмерному потреблению энергии, в результате чего наблю-

дается падение эффективности фотолитической реакции. Здесь необходим поиск очень тонкого и точного равновесного состояния. В настоящее время изолирование внутриклеточных систем представляется затруднительным, и в долгосрочном плане они менее стабильны, чем целые клеточные системы; современные исследования посвящены поискам методов стабилизации этих систем. Как системы целых клеток, так и однофазные внутриклеточные системы, испытанные до настоящего времени, образуют смесь водорода и кислорода. Разделение реакций выделения водорода и кислорода теоретически возможно путем использования промежуточного носителя окислительно-восстановительного потенциала, регенерирующего водород с использованием гидрогеназы, однако такой носитель до сих пор не найден.

В заключение следует сказать, что биологические методы производства водорода на свету применяются только пока в лабораториях. Практическая технология может появиться только через несколько десятилетий после проведения фундаментальных исследований в этой области.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jones, D., Jones, J., Wood chips versus densified biomass: An economic comparison, 4th Symposium on Energy from Biomass and Wastes, Lake Buena Vista, Florida, January, 1980.
- [2] Junge, D. C., The state of the art of producing synthetic fuels from biomass, pp. 251–330 in *Alternative Energy Sources*, Part A, Ed. J. T. Manassah, Academic Press, 1981.
- [3] Bull, D. A., Towards denser bales – commercial developments, ADAS Straw Utilisation Conference, Oxford, Nov./Dec., 1978.
- [4] Wilton, B., The development of furnace/heat exchanger systems in which chopped cereal straw is the fuel, Energy from Biomass Proceedings of the EEC Contractors Meeting, Brussels, May 1982.
- [5] Pedersen, T. T., Heat energy from animal waste by combined drying, combustion and heat recovery, As for [4].
- [6] Pyle, D. L., Energy and fuel from biomass, National Energy Symposium, National Council for Science and Technology, Nairobi, Kenya, November 1978.
- [7] Cheremisinoff, N. P., *Wood for Energy Production*, Chapter 4, Ann Arbor Science, 1980.
- [8] Brandon, R. J., Residual wood fired furnaces: A demonstration of advanced systems, pp. 199–221 in [1].
- [9] Rexen, F. P., Straw utilisation in Denmark, ADAS Straw Utilisation Conference, Oxford, Nov./Dec. 1978.
- [10] Chapter 3 in [7].
- [11] Tillman, D. A., Energy from wastes: An overview of present technologies and programs, Chapter 2, in *Fuels from Waste*, Eds. L. L. Anderson and D. A. Tillman, Academic Press, 1977.
- [12] Shafizadeh, F., Fuels from wood waste, Chapter 9 in [11].
- [13] Reed, T. B., Biomass gasification: Yesterday, today and tomorrow, Symposium 'Bio-Energy' '80', Atlanta, Georgia, April 1980.
- [14] Miles, T. R., Densification of biomass for energy uses, pp. 197–198 in [13].
- [15] Pober, K. W., Bauer, H. F., The Nature of pyrolytic oil from municipal solid waste, Chapter 5 in [13].

- [16] Coffman, J. A., Steam gasification of biomass, 3rd Annual Biomass Energy Systems Conference Proceedings, Golden, Colorado, June 1979.
- [17] Kam, A. Y., Hydrocarbon liquids and heavy oil from biomass, pp. 589–615 in [1].
- [18] Kevin, C. R., Technology and economics of fermentation alcohol – an update, *Enzyme Microb. Technol.*, 5, 1983, 103–114;
- [19] Villet, R., Hydrolysis of biomass, pp. 156–157 in [13].
- [20] Reed, G., Pepler, H. J., *Yeast Technology*, p. 35, AVI Publishing Co., 1973.
- [21] Rogers, P. L., Leek, K. J., Skolniki, M. L., Tribe, D. E., Ethanol production by *Zymomonas mobilis*, *Adv Biochem Eng.*, 23, 1982, 37–84.
- [22] Robers, R. S. Economics of ethanol from wood using the GIT process, pp. 671–688 in [1].
- [23] Emert, G. H., Chemicals from biomass by improved enzyme technology, pp. 488–499, in Am. Chem. Soc. Div. Pet. Chem., Symposium on 'Biomass as a Non-Fossil Fuel Source, Honolulu, April 1979.
- [24] Hobson, P. N., Bousfield, S., Summers, R., *Methane Production from Agricultural and Domestic Wastes*, Applied Science Publishers, 1981.
- [25] Calvin, M., Petroleum plantations for fuel and materials, *Bioscience*, 29, 1979, 533–538.
- [26] Whitworth, D. A., Ratledge, C., Microorganisms as a potential source of oils and fats, *Process Biochemistry*, Nov. 1974, 14, 22.
- [27] Hillen, L. W., Pollard, G., Wake, L. V., White, N., Hydrocracking of the oils of *Botryococcus braunii* to transport fuels, *Biotechnol Bioeng*, 24, 1982, 193–205.
- [28] Benson, A. A., Lee, R. F., The role of wax in oceanic food chains, *Scientific American*, 232, 77–86.
- [29] Stern, R., Guibert, J.–C., Les huiles vegetales et leurs derives: Carburant de substitution, *Revue de l'Institut Francais du Pétrole*, 38, 1983, 121–136.
- [30] Doak, T. E., Commodity oil markets and how they work, *J Am Oil Chemists Soc*, 55, 1978, 601A–604A.
- [31] Lysons, A., Natural oils and fats – Prospects for the 1980's. *J Am Oil Chemists Soc*, 55, 1978, 25–27.
- [32] O'Callaghan, C., Vegetable oil as a diesel fuel, *Energy World*, May 1982, 6–7.
- [33] Goodier, B. G., Heilman, M. D., Nixon, P. R., Schwiesow, W. F., Sunflower oil – An emergency farm fuel? *Agric Eng*, 61, 1980, 20–21.
- [34] Elsbett, L. E., Elsbett, G., Elsbett, K., Behrens, M., Alternative fuels on a small high speed turbocharged diesel engine, Paper 830556 SAE Int Congress, Detroit, April 1983.
- [35] Plaskett, L. G., The generation of hydrogen gas using the photosynthetic mechanism of green plants and solar energy (biophotolysis), ETSU Publication CR/20, March 1979.

## СТОИМОСТЬ БИОЭНЕРГИИ

## 4.1. ПОДХОД К РАСЧЕТАМ СТОИМОСТИ БИОЭНЕРГИИ

Цель экономической оценки предложений по использованию биотоплива — сравнение стоимости ресурсов и необходимых усилий по их освоению с ценностью предполагаемых результатов. Методы расчетов достаточно хорошо разработаны [1, 2], что дает возможность с определенной точностью прогнозировать издержки в отношении хорошо известных процессов. Для новых процессов и продуктов, где приходится сталкиваться со значительной долей неопределенности как в отношении технологии, так и рынка сбыта продуктов, прогнозирование издержек характеризуется низкой точностью, и при строительстве заводов может возникнуть значительный перерасход средств [3]. В литературе имеется целый ряд вариантов расчетов путей производства биотоплива, при этом предполагаемый экономический эффект сильно варьирует. В коротком исследовании невозможно охватить все детали расчетов; сформулируем только основные принципы, применимые к большинству предложений. Такие принципы помогут определить основные компоненты издержек и прибыли, помогут оценить характерные черты новых предложений, а также их влияние на общую сумму издержек. Тщательный анализ издержек по производству биотоплива часто выявляет необычную зависимость от некоторых факторов, таких, как налоговые льготы или кредиты на побочные продукты.

**Разбивка издержек.** Издержки обычно раскладываются на такие компоненты, как сырье, эксплуатационные затраты и капитальные затраты. Материалы и некоторые эксплуатационные затраты варьируют в зависимости от хода производственного процесса. Капитальные и эксплуатационные затраты являются постоянными, не зависящими от того, производится продукт или нет. Совершенно очевидно, что для минимизации затрат завод должен работать по возможности ближе к полной мощности. В таблице 36 представлены различные компоненты материальных, производственных и капитальных затрат при производстве биотоплива.

Относительный размер каждой из основных категорий важен во многих отношениях. Привлечь капитал бывает трудно, причем затруд-

Таблица 36. Структура издержек производства

Сырье	Биомасса Вода Катализатор Другие ингредиенты	
Эксплуатационные затраты	Коммунальные сооружения Технический уход Заработная плата Накладные расходы Лицензионная плата	
Капитальные затраты	Амортизационные отчисления Прибыль на инвестированный капитал	} капитал, требуемый: на землю; установку с ограниченной емкостью батарей; установку, удаленную от места сбора биомассы; оборотный капитал.
Кредиты на побочные продукты		

нения возникают по мере увеличения риска и неопределенностей, связанных с осуществлением проекта. В развивающихся странах может возникнуть необходимость привлечения иностранного капитала и закупки иностранной валюты для погашения долга из получаемой прибыли. Как уже отмечалось, внедрение капиталоемких процессов бывает особенно затруднено в периоды роста цен на энергоносители и недостатка капитала. Исследования обычно приводят к решениям, предполагающим использование более совершенных технологий, требующих больших капитальных затрат. Примитивные, менее капиталоемкие, но более трудоемкие процессы были бы иногда желательны, но они не всегда оказываются приемлемыми для развитых и развивающихся стран.

Во многих процессах по производству биотоплива сырье, биомасса, является наиболее крупным компонентом издержек производства. Это вызывает значительные трудности, так как обычно сложно сделать что-либо для уменьшения затрат по этой категории. Необходима дешевая биомасса, не используемая при производстве более ценных продуктов. Конкуренция со стороны этих более ценных продуктов (продукты питания, корма, лесоматериалы и т. д.) может лишить сырья процесс производства биотоплива. Топливная промышленность очень крупная по сравнению с отраслями, производящими продукты питания, корма и другие товары, и дешевая биомасса, используемая в широком масштабе, радикально изменят судьбу последних. И наоборот, субсидирование производства биологического топлива повысит цену на биомассу, используемую как сырье для производства продуктов питания и т. д.

Эксплуатационные расходы бывают часто малы по сравнению с капитальными затратами и затратами на сырье. Однако были предприняты значительные усилия по сокращению этих издержек благодаря возможностям использования новых технологий, применяемых в других областях, например энергосберегающие технологии, новые типы ферментов, разработанных в области биотехнологии, новые процессы сепарирования. Трудно понять причину таких интенсивных усилий по проведению исследований, направленных на изыскание путей сокращения эксплуатационных расходов, не сопровождающихся аналогичными усилиями по сокращению общих капитальных затрат и затрат на сырье.

Воздействие различных факторов на издержки. Основным вопросом при оценке процессов является вопрос об изменении общих издержек на 1 т биотоплива в зависимости от колебаний одной или более переменных, определяющих издержки, включая издержки на сырье, производительность реактора, выход продукта и т. д. Например, цены на сырье могут варьировать как по срокам, так и по районам. Моделирование издержек дает возможность определения условий, способствующих благоприятному протеканию процесса; однако было установлено, что в некоторых случаях экстраполяция компонента издержек до нуля все же не дает возможности определения благоприятных условий протекания процесса. Анализ издержек позволяет провести оценку предложенных. "Гибкость" некоторых параметров, необходимая для снижения общих расходов до приемлемого уровня, с технической точки зрения может быть не всегда возможна.

Чувствительность общих издержек к значениям переменных процесса может носить линейный и нелинейный характер. Всесторонний расчет затрат для данного процесса может оказаться крайне сложным, требующим большого числа вводимых данных. Но так как многие виды топлива не имеют промышленного значения, часто достаточно бывает дать общую картину и продемонстрировать экономические проблемы, связанные с осуществлением процесса, с помощью простых моделей.

Биологические и химические процессы производства топлива. В литературе имеются многочисленные данные [4, 5] относительно потенциальных возможностей биотехнологии в плане производства топлива, объемных химических продуктов и широкого диапазона высокоценных продуктов. И только в редких случаях [6] упоминается более высокая стоимость биологических процессов по сравнению с химическими. Преимущества биологических процессов очевидны (табл. 37), однако они сопровождаются более значимыми недостатками (табл. 38). Как уже говорилось, стоимость сырья и эксплуатационные расходы при осуществлении биологических процессов в 3 раза выше, чем соответствующие показатели при протекании химических процессов. Некоторыми причинами этих повышенных затрат являются низкая продуктивность процессов (тонн продукта на 1 м<sup>3</sup>/ч), потребность в реакторах, устойчивых к коррозии и нетоксичных, чувствительных биологических

Таблица 37. Преимущества биологических производственных процессов

---

Низкая энергия активации.  
 Возможность осуществления многоступенчатых превращений в одном реакторе  
 Высокий выход продукта  
 Универсальность в отношении использования различных видов сырья  
 Структурная специфичность  
 Получение хиральных продуктов (т. е. возможность получения продуктов, не совмещаемых со своим зеркальным изображением)  
 Разбавление сырья  
 Превращение комплексных молекул  
 Получение пищевых продуктов, кормов и лекарственных препаратов

---

Таблица 38. Недостатки биологических производственных процессов

---

Медленное протекание реакций  
 Извлечение продукта из разбавленной водной фазы  
 Сложные условия реакции  
 Требования стерильности  
 Предпочтительное циклическое производство  
 Высокая стоимость регенерации катализатора (клеток)

---

реакций к физическим условиям и необходимость больших количеств воды для осуществления процесса. В результате было установлено, что биологические процессы, за редкими исключениями, больше пригодны для производства высокоценных продуктов, а также продуктов, которые невозможно или трудно получить при использовании ископаемого углеродного сырья. Однако такие продукты, как пищевые, этиловый спирт и уксусная кислота, предназначенные для потребления человеком, по эстетическим и политическим соображениям производятся биологическим путем даже в тех случаях, когда синтетический продукт дешевле и выше по качеству.

Биологические клетки могут осуществлять многие преобразования, лежащие в основе современной химической промышленности; однако эти реакции не используются вследствие их относительно низкой скорости, сложности и дороговизны. Эти утверждения приводятся здесь не с целью снижения энтузиазма по поводу развития биотехнологии; использование биологических процессов только тогда будет правомерным, когда их универсальность, специфичность и сложность будут иметь максимальную отдачу. Биологические процессы дополняют химические процессы, при этом каждый процесс имеет свою собственную область применения.

Издержки, инфляция и растущие цены на энергию. Хотя мы еще вернемся к вопросу будущих тенденций в случае дефицита нефти, возможно, здесь имеет смысл сделать несколько замечаний. В настоящее время

используются методы расчета, учитывающие существующую стоимость денег, инфляцию и различное воздействие инфляции на компоненты издержек. Обычно считается, что стоимость предложений по источникам возобновляемой энергии становится относительно меньше в условиях инфляции и растущих цен на энергию. Даже элементы капитальных затрат не увеличиваются вслед за ростом цен. Считается, что инфляция усиливает интерес к возобновляемым источникам энергии. Этот аргумент обычно используется торговыми агентами, которые, продавая устройства, обеспечивающие экономию энергии, утверждают, что, установив эти устройства теперь, можно сэкономить деньги в будущем. Все капитальное оборудование имеет ограниченный срок службы, и издержки на техническое обслуживание и текущий ремонт сведут на нет любые преимущества, полученные во время инфляции. В период инфляции и растущих цен на энергоносители при растущих процентных ставках предложение капитала снижается. Стремительно развивающаяся инфляция фактически явилась следствием растущих расходов по импорту нефти. Инфляция непостоянна, и падение темпов инфляции, сопровождаемая незначительным ростом цен на энергоносители, создает условия для выдачи ссуд под высокие ссудные проценты. Инфляция также повышает риск при предоставлении ссуд, при этом соответственно предполагается получение более высоких процентов. Прибыли от многих биоэнергетических процессов являются неясными и уже представляют риск для вкладчиков.

#### 4.2. НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ СЖИГАНИЕ

Реальную стоимость мелкомасштабного использования биомассы, например дерева и навоза, используемых в качестве топлива, определить трудно. Огромные усилия по заготовке дров, имеющие место, например, в странах третьего мира [7], не могут быть выражены в экономических издержках. Даже в развитых странах заготовка дров на землях общего пользования является добровольным делом энтузиастов. Как уже отмечалось в главе 2, сжигание соломы на фермах стало менее распространенным. Это происходит вследствие необходимости наблюдения за процессом сжигания, а также выполнения целого ряда функций, которые невозможно выразить в рамках экономических понятий. Тем не менее проведение расчетов возможно в тех случаях, когда биомасса подлежит оплате или при наличии большого количества отходов или остатков протекания процессов. Ниже приводятся примеры таких расчетов.

Сравнительная стоимость дров и ископаемых видов топлива. В двух источниках [8, 9] даются интересные расчеты издержек по заготовке дров и их использованию для отопления. Прежде всего там дается сравнение стоимости заготовки, распределения, хранения, а также погрузки, разгрузки и транспортировки. Авторы делают вывод, что

древесина при стоимости 2,2 долл/ГДж может быть превращена в удобный вид топлива стоимостью 2,9–4,9 долл/ГДж. Наиболее дешевый продукт – сухие щепки, а наиболее дорогостоящий – прессованные брикеты. Продукция биомассы сравнивается со стоимостью импортируемой нефти в Канаде (4,9 долл/ГДж); сравнений с углем и газом не дается. Необходимо проведение крупномасштабных процессов (например, с продуктивностью 18 т/ч), при этом производство более дорогих брикетов, а не дешевых щепок обеспечило круглогодичную работу предприятия. На основании проведенных расчетов авторы приходят к выводу, что для мелких и средних потребителей энергии экономически более выгодна покупка переработанной древесины (сухие щепки и стружки или прессованная древесина), чем использование сырой древесины или самостоятельная ее переработка.

Таблица 39. Сравнительная стоимость дров и нефти при обогреве жилых помещений (1980)

Показатели	Дрова	Нефть
Стоимость топлива, долл/ГДж	2,9–4,9	4,9
Темп инфляции, %	10	12
Стоимость бойлера/печи, долл.	1545–5500	1050
Стоимость установки, долл.	395–900	300
Технический уход, долл. в год	40	25

В другом источнике [9] проводилось сравнение ряда дровяных бойлеров со стоимостью установки от 1545 до 5500 долл. При расчетах стоимости использования нефти и различных видов древесины делалось допущение о том, что темп инфляционного роста цен на нефть был на 2% выше, чем на древесину. Результаты расчетов приведены в таблице 39. Затраты на установку и эксплуатацию дровяного бойлера или печи (при топке их дровами стоимостью 4 долл/ГДж) составили 2604 долл., что соответствовало затратам на нефть за двадцатилетний период. Авторы делают вывод, что в большинстве случаев использование дров домовладельцами является малоэффективным. Выказывалось предложение о предоставлении субсидий группам населения с низким доходом на покупку дров. Авторы отмечали отсутствие современных дровяных отопительных систем, а также преобладание на рынке (1980) конструкций, обеспечивающих бескреозотное и эффективное сгорание.

Устройства для сжигания больших объемов биомассы. Усиленно пропагандируется использование биомассы, полученной или с "энергетических плантаций", или из промышленных отходов. Например, существует утверждение, что площадь 350 кв. миль достаточна для обеспечения дровяным топливом генератора мощностью 400 МВт [10]. Другие авторы менее оптимистичны; они считают, что для этих целей нужна

площадь в 2 раза больше [11]. В последнем исследовании указывается на широкое использование лесной промышленностью своих отходов для выработки пара и электричества, несмотря на то что промышленные печи с дровяным отоплением в 3–4 раза дороже печей с газовым нагревом. Экономическое обоснование установки систем с дровяным отоплением определяется наличием дешевого либо бесплатного топлива. Положение меняется, когда за дрова приходится платить по рыночным ценам. Структура издержек выработки пара и электричества с использованием дровяного отопления показана в таблице 40 [12]. Для расчетов был выбран дешевый источник древесины (19,2 долл/т сухой массы или 0,95 долл/ГДж – данные 1977 г.). Капитальные затраты на строительство парового генератора составили 94,1 млн. долл. и 165,6 млн. долл. – на строительство электрогенератора. Всего в день должно было перерабатываться 3000 т сухой древесины (около 6000 т сырой древесины), что соответствует потреблению сырья очень крупным целлюлозным заводом мощностью 150 МВт. По прогнозам на 1985 г., производство электроэнергии на основе использования древесины на топливо являлось неэкономичным, а пара – малоэкономичным по сравнению с издержками при использовании ископаемого топлива. Стоимость древесного сырья составила 44 % стоимости пара. Капитальные затраты на относительно небольшую электрогенераторную установку значительно увеличили и без того высокую стоимость электроэнергии.

Таблица 40. Выработка пара и электроэнергии на основе использования древесины в 1985 г. (цены 1979 г.)

Показатели	Стоимость продукта, долл/ГДж	
	пар	электро-энергия
Биомасса	1,32	4,76
Эксплуатационные затраты	1,68	11,62
Капитальные затраты		
Всего	3,0	16,38

Из сказанного можно сделать вывод, что при достаточном количестве сравнительно дешевого сырья выработка пара и электроэнергии из биомассы может быть экономичной. Однако дешевая древесная биомасса не всегда имеется в наличии, а повышение эффективности использования остатков древесины для производства изделий из дерева снизит необходимость использования древесины как топлива. В случаях, когда биомасса выращивается специально на топливо, эффективность выработки пара и электроэнергии будет в лучшем случае минимальной.

**Утилизация отходов, выработка энергии и пара.** Способность городского мусора гореть навела на мысль о получении полезной энергии. И снова основными продуктами должны были быть электроэнергия и пар, предназначенные для использования на очистных установках или для продажи местным потребителям. Различные свалки мусора являются наиболее дешевым методом удаления отходов, который, однако, дорожает с повышением цен на землю в черте городов. Сжигание отходов с целью выработки энергии и пара – альтернатива указанному методу. При этом не обязательно иметь доходное предприятие, так как местное население обязано нести некоторые расходы по утилизации

Таблица 41. Стоимость утилизации твердых городских отходов (1980 г.)

Способ утилизации	Стоимость, долл/т отходов
Мусорные свалки	15
Простое сжигание	20,1
Сжигание + выработка электроэнергии	23,79
Сжигание + выработка пара	17,92

отходов. Расчеты в этой области немного, возможно, вследствие сложности технологии, рынков сбыта продукции и позиции местных властей. Преимущества, связанные с сжиганием отходов, а также трудности, возникающие в этой области, описаны в литературе [13]. Не следует считать, что выработка электроэнергии или пара путем сжигания городских отходов сама по себе приведет к снижению издержек по сравнению с вариантом городских свалок. Результаты расчетов приведены в таблице 41. Если твердые отбросы поступают из пригорода (при ожидаемом кредите 6 долл/т), использование свалок становится менее выгодным. Несмотря на дороговизну, вариант сжигания мусора был реализован. В течение первых шести месяцев работы надежность системы была ниже желаемого уровня, а система поставки продукции заказчику не была завершена. Наиболее сложным моментом при этом оказались поиски заказчика (потребителя пара).

#### 4.3. ТЕРМИЧЕСКОЕ ОБОГАЩЕНИЕ

Большое число различных схем обогащения биомассы с получением полезного топлива затрудняет подбор типичных расчетов. Все же мы выбрали два примера расчетов – один, приводящий к получению высококалорийного газа, а другой – к получению жидкого топлива (метанола). Хотя в приводимом источнике [14] даются расчеты, основанные

как на кредитах с низким ссудным процентом, получаемых от местных органов управления и т. д., так и на частном финансировании, мы приняли второй источник финансирования с целью показать жизнеспособность предложенных проектов. Для обоих процессов была взята дешевая древесина стоимостью 1 долл/ГДж.

**Газификация.** В процессе газификации используется стружка свежесрубленной древесины, которая высушивается и тонко измельчается. Затем высушенная биомасса подается через загрузочный бункер в газификатор с кипящим слоем, работающий при давлении 35,15 кг/см<sup>2</sup>. Смесь, содержащая 98 % кислорода (из криогенного сепаратора), нагревается до 321 °С и подается с паром в газификатор. Степень превращения сырья принимается равной 98 % при времени нахождения смеси в реакторе 30 мин. Газ, выходящий из газификатора, очищается от примесей в циклонном сепараторе и возвращается в псевдосжиженный слой. Диоксид углерода и соединения серы удаляются путем пропускания их через соответствующие адсорбенты, а газ направляется в трубчатый реактор, где происходит реакция перемещения связей и образование метана из оксида углерода и водорода.

Перемещение связей:  $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$ .

Образование метана:  $3\text{H}_2 + \text{CO} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ .

После дальнейшего фракционирования синтетический натуральный газ (СНГ) высушивается и сжимается. Упрощенные экономические расчеты, приведенные в таблице 42, показывают, что капитальные вложения — наиболее важный компонент издержек. Стоимость производства СНГ из древесины в 2 раза выше, чем из угля, вследствие более высоких капитальных затрат, а также различий в размерах предприятий, работающих на древесном сырье и на угле. Предприятия, работающие на древесном сырье, в 7–40 раз крупнее, чем эквивалентные предприятия, работающие на угле.

Таблица 42. Стоимость производства синтетического натурального газа из древесного сырья (1979)

Показатели	Долл/ГДж
Материалы:	
древесина	1,5
другие	0,6
Зарботная плата	1,1
Накладные расходы	0,9
Амортизация и проценты на вложенный капитал	6,2
Всего	10,3

Таблица 43. Стоимость метанола, полученного из древесного сырья (1979 г.)

Показатели	Долл/ГДж	Долл/т
Материалы:		
древесина	1,6	37
другие	0,7	17
Зарботная плата	1,3	29
Электричество	0,1	3
Накладные расходы	1,0	23
Амортизация и проценты на вложенный капитал	7,4	164
Всего	12,1	273

**Метанол из древесины.** Производство метанола [14] было разработано фирмой "Кемикл Системз Инкорпорейтед". Древесина сначала газифицируется, как указывалось выше, а газы после частичного удаления влаги реагируют в высокотемпературном преобразователе с получением более благоприятного соотношения  $\text{H}_2/\text{CO}$  для последующего синтеза метанола. Газ, очищенный от серы, охлаждается, высушивается и при охлаждении сепарируется с получением обогащенных потоков  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2$  в соотношении 2:1. Синтез проводится в реакторе со слоем псевдосжиженного материала, где происходит конденсация метанола. Упрощенные расчеты процесса даны в таблице 43. Стоимость метанола при использовании этого метода была выше (273 долл/т, 1979 г.), чем цена на метанол в США в 1983 г. (примерно 240 долл/т).

#### 4.4. ГИДРОЛИЗ И ФЕРМЕНТАЦИЯ

Из всех процессов производства биотоплива процесс превращения углеводов растений в моторный спирт, по-видимому, в наибольшей степени завладел общественным мнением и значительно укрепил статус биоэнергии. Благоприятные экономические показатели в Бразилии и США (газохол и проалкоголь) способствовали разработке аналогичных схем в других странах. В Европе, где существует крупная спиртовая промышленность, использующая в основном мелассу, картофель и крахмал злаков в качестве сырья, спирт как топливо не используется. Причина заключается в отсутствии таких же значительных субсидий, как в США и Бразилии. Решающие факторы, определяющие необходимость выдачи субсидий, носят сугубо региональный характер. Использование спирта в качестве топлива дает возможность проверки общих идей использования биоэнергии, а также утверждений, что технология является хорошо разработанной, издержки могут быть сформулированы с большой долей определенности, а продукт находится в настоящее время на

рынке и производится в больших количествах. Автор выражает уверенность в беспрепятственном развитии производства биоэнергии в течение ближайших десятилетий.

**Кукурузный спирт.** Гидролиз и брожение кукурузного крахмала были выбраны как стандарт для расчетов издержек производства при сравнении различных видов сырья, а также региональных сравнений. Издержки взяты для развитой страны США. В 1983 г. в США из 1 млн. т ферментированного спирта около  $\frac{2}{3}$  было продано для использования в качестве горючего для автомобилей. Это составляет только 0,07% используемого моторного горючего. В таблице 44 дается упрощенная раскладка издержек по производству кукурузного спирта в США [16]. Зерно размалывается и "разжижается" под действием высокой температуры и ферментов. Затем пульпа "осахаривается" под действием ферментов и дрожжей. Для получения окончательного продукта с содержанием этанола 99,5% используются три дистилляционные колонны.

Таблица 44. Стоимость производства кукурузного спирта в США в 1981 г.

Показатели	Стоимость этанола, долл/т
Материалы:	
кукуруза	350
другие	5
Топливо (уголь)	40
Постоянные издержки (30% от капитальных)	188
Кредиты на побочные продукты	-216
Всего	367
Продажная цена безводного этанола (топлива)	644

Из таблицы 44 видно, что основная часть расходов приходится на кукурузное сырье. Однако эта статья в значительной мере компенсируется кредитами на побочные продукты, которые могут включать кукурузное масло, кукурузный жмых и клейковину. Приводимые издержки относятся к крупным заводам с годовой производительностью 80 тыс. т, расположенным в США. Стоимость сырья составляет около половины стоимости зерна в Европе.

Такой путь производства спирта очень выгодный (при рыночной цене 644 долл/т и издержках производства только 367 долл/т). Но каким образом может продукт при такой цене быть включенным в моторное топливо, за которое по оптовой цене выручена только половина рыночной стоимости этанола? Ответ дает таблица 45.

Таблица 45. Стоимость этанола в газохоле (США, 1981)

Показатели	Стоимость этанола, долл/т
Продажная цена безводного топливного этанола	644
Скидка с налога (федерального и налога в штатах) при 10% спирта в моторном топливе	-297; -312
Инвестиционная налоговая скидка	-7
Фактическая стоимость этанола	325-340
Цена этилированного бензина франко-хранилище, долл/т	329

В США существует скидка с налогов на смеси газохоло (как на федеральном уровне, так и на уровне штатов). Размер налоговых льгот и субсидий на смесь этанола и бензина варьирует по штатам. Следует отметить, что этанол, импортируемый из Бразилии, может подорвать производство этанола в США, поэтому в целях поддержания развития спиртовой промышленности США бразильский этанол облагается высокой пошлиной (в январе 1983 г. - 132 долл/т). До последнего времени налоговые льготы на газохол, предоставляемые федеральным правительством и правительствами штатов, касались в равной мере смесей, включающих кукурузный спирт как отечественного производства, так и импортный.

**Моторный спирт в развивающихся странах.** Мы видели, что использование газохоло в США определяется кредитами на побочные продукты и налоговыми льготами в отношении этого продукта. В Бразилии ситуация является иной, так как сырье (излишки сахара, полученного при переработке сахарного тростника, сок сахарного тростника и меласса), в противоположность кукурузе, не дает побочных продуктов. Остаточные количества биомассы после переработки сахарного тростника (багасса) могут быть, однако, использованы в качестве дешевого топлива. В Бразилии цены на бензин высокие и контролируются государством. Для того чтобы сделать смесь этанола и бензина, а также спиртовой дистиллят (смесь этанола с водой) привлекательными для покупателей, были установлены соответствующие налоги на топливо, а также выдавались ссуды на льготных условиях на строительство дистилляторов. Цена сырья является до некоторой степени произвольной и устанавливается по усмотрению правительства. Если цены на мелассу в Европе составляют около 100 долл/т, то на сахарном заводе ее можно купить по цене около 60 долл/т, включая расходы на транспортировку. Четыре-пять тонн мелассы дают одну тонну спирта, таким образом, стоимость этого сырья незначительно ниже, чем стоимость кукурузы (см.



табл. 44), поэтому для стимулирования использования моторного спирта владельцами автомобилей необходима "субсидия", аналогичная той, которая выдается в США.

Общим для Бразилии и США является перепроизводство биомассы (зерна и сахара) и отсутствие емкого внешнего рынка сбыта этих продуктов. В Европе, по крайней мере, до последнего времени не наблюдалось излишков углеводной биомассы, цены на которую высокие. На моторный спирт здесь субсидий нет, и этанол стоит около 750 долл/т, а стоимость бензина до уплаты налога составляет 270 долл/т. Внедрение газохолола в Европе пока не предусматривается, однако в некоторых других частях земного шара условия могут быть более благоприятными, поэтому Всемирным банком были определены страны, характеризующиеся сочетанием излишка сельскохозяйственной продукции и дефицита нефти, что может открыть возможности применения моторного спирта [17]. Такие страны включают Таиланд, Филиппины, Южную Африку и Турцию. В этих странах, как в Бразилии и США, должна, однако, существовать политическая воля для субсидирования производства этанола и сдерживания производства из нефти бензина, так как в условиях свободного рынка ископаемое топливо является значительно более дешевым, чем предлагаемая альтернатива. Однако сравнительно недавно опыт с топливным спиртом, например, в Кении, был менее удачным, чем в Бразилии [18], и этанол уже рассматривается в меньшей степени как панацея в решении проблемы, связанной с высокой стоимостью импорта нефти.

#### 4.5. АНАЭРОБНОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ

Применение метода анаэробного разложения биомассы в развивающихся странах. Издержки производства при использовании небольших реакторов определить нелегко. По имеющимся данным, начиная с 1972 г. в Китае было построено семь миллионов небольших установок [19]. Капитальные затраты на строительство этих реакторов, которые ненамного больше небольших навозохранилищ, составляют всего 30 долл. Рабочая сила, необходимая для сбора навоза и эксплуатации этих установок, практически ничего не стоит. Тем не менее иногда здесь возникала необходимость в получении субсидий со стороны правительства, а также в получении строительных материалов и технической помощи. Только треть этих реакторов считается надежными энергогенераторами [20]. В Индии, где, по имеющимся данным, число реакторов достигает 80–90 тыс. [21], издержки гораздо выше. Небольшая деревенская установка стоит 500–700 долл., при этом наиболее дорогостоящим элементом является сама установка, а не емкость, содержащая сбраживаемую биомассу. Кроме капитальных затрат, в таких странах, как Индия, существуют еще две острые проблемы. Одна из проблем – отсутствие достаточного количества навоза, а другая – высокие расходы по техниче-

скому уходу за реактором и отсутствие квалифицированных инженеров. Эти проблемы стоят настолько остро, что половина установок по производству биогаза бездействует [21].

Использование анаэробного брожения на фермах Великобритании. Для изучения функционирования реакторов анаэробного брожения в развитых странах мы не располагаем достаточной информацией, что связано с небольшим числом таких реакторов [22]. Часто строительство установки мотивируется необходимостью борьбы с загрязнением, эффективность которой в значительной степени определяется местными условиями. Однако экономичность брожения и процесса выработки электроэнергии на ферме считается делом сомнительным [23]. Расходы, полученные на основании анализа функционирования очистной установки в Ридинге, составили 45 тыс. ф. ст. на реактор емкостью 400 м<sup>3</sup> при годовых эксплуатационных расходах 13 102 ф. ст. (ставка процента 18). Стоимость произведенной электроэнергии составляла 11 600 ф. ст. Эти цифры основаны на 100%-ном теоретическом выходе газа и 100%-ном использовании произведенного газа; но более реалистичная цифра – 50%-ное использование энергии предполагает ежегодный убыток на ферме в 7302 ф. ст. Эти расчеты не учитывают положительный эффект борьбы с загрязнением окружающей среды и возможное улучшение свойств навоза как удобрения после прохождения его через реактор.

Крупные очистные сооружения. Крупные очистные сооружения используются только в районах большого скопления населения. Функционирование такой установки финансируется и осуществляется местными органами управления, и полных расчетов в нашем распоряжении нет. Текущие расходы на работу лондонских очистных сооружений составили 0,82 млн. ф. ст., а стоимость газа при теплотворной способности, сравнимой с теплотворной способностью дизельного топлива, составила 2,76 млн. ф. ст. [24]. При сравнении с теплотворной способностью природного газа эта цифра будет значительно меньше. Учет реальных капиталовложений, которые здесь не принимались во внимание, значительно сократит прибыль. Тем не менее во многих районах переработка отходов необходима по эстетическим соображениям, поэтому имеются реакторы в городах, насчитывающих 5000 жителей и более [24]. Из 5000 очистных сооружений в Великобритании только около 300 имеют реакторы анаэробного разложения как одну из ступеней процесса переработки, и многие из них сжигают газ вместо того, чтобы его использовать.

Переработка городских отходов. Стоимость разложения коммунальных отходов с использованием реакторов, аналогичных тем, которые используются при переработке городских стоков, была во всех деталях рассчитана в Уоррен Спринг Лаборатории [25, 26]. Упрощенный расчет издержек по эксплуатации реактора производительностью 1686 т/год (70 тыс. ГДж) показан в таблице 46. При расчетах прини-

Таблица 46. Стоимость получения биогаза из городских отходов (1977)

Показатели	На 1 ГДж биогаза
Эксплуатационные расходы	
коммунальные услуги	0,24
заработная плата	1,04
накладные расходы	0,29
Возмещение капитальных затрат	2,48
Прибыль на вложенный капитал	0
Кредиты на побочные продукты	
электроэнергия и обогрев	-0,93
удаление твердых отходов	-0,36
Всего	2,74
Природный газ для промышленности (1977)	1,68

малось, что биогаз должен обеспечивать энергию и обогрев установки для сортировки твердых отходов.

Как видно из таблицы, капитальные затраты составляют основную долю расходов по проекту, значительно превышающих потенциальную экономию. Для того чтобы производимый газ был конкурентоспособным по сравнению с природным газом, необходимо снизить капитальные расходы на стадии разложения отходов на  $\frac{3}{4}$  и снизить вдвое эксплуатационные расходы. Таким образом, при использовании существующей технологии такое снижение затрат в целях обеспечения процесса анаэробного разложения как части общего процесса удаления отходов является в высшей степени маловероятным. Аналогичные результаты были получены в серии расчетов по эффективности различных методов удаления отходов, где анаэробное разложение оказывалось одним из наиболее дорогостоящих методов [27]. Результаты расчетов обобщены в таблице 47.

Таблица 47. Средняя стоимость удаления отходов (1979)

Способ удаления	Ф. ст/т
Мусорная свалка	3,79
Сжигание	20,8
Сжигание + выработка электроэнергии	23,6
Пиролиз ("западный процесс")	26,6
Кислый гидролиз	34,3
Анаэробное брожение	38,8

Сбор метана из перегнившей мусорной свалки, естественно, не требует капитальных затрат на реактор, что определяет коммерческую жизнеспособность метода.

**Сельскохозяйственные отходы.** Во всех приведенных выше случаях принимается, что сырье биомассы для анаэробного брожения имеет нулевую или отрицательную стоимость. Там, где биомасса должна закупаться, биогаз неизбежно становится значительно дороже. Это было подтверждено расчетами издержек в опытах по сбраживанию соломы, которую закупали как сырье по цене 27,50 долл. за 1 т (сухая масса). На основании проведенных исследований было сделано заключение, что топливный газ, полученный при использовании таких субстратов, будет относительно дорогостоящим. В настоящее время требуется снижение издержек по сравнению с теми, которые сейчас планируются для переработки растительных остатков, а также существенное улучшение технологии процесса брожения.

Навоз крупного рогатого скота по цене 5–6 долл/т, включая транспортные расходы, дает биогаз в 16–20 раз дороже природного газа [29]. Однако при выдаче кредита на производство ферментативного осадка как ценного корма для скота экономические результаты резко изменятся, поскольку корм ценится больше, чем биогаз.

#### 4.6. РАСТИТЕЛЬНЫЕ МАСЛА

Растительные масла, каучук, эфирные масла и растительные воска имеются в продаже по доступным ценам. Сравнение цен на некоторые продукты приводится в таблице 48. Разница в цене между дешевыми растительными и минеральными маслами не очень большая и, вероятно, ниже, чем между другими возобновляемыми видами топлива, описанными в данной работе, и ископаемыми видами топлива. В свете предложений в литературе выращивать культуры для получения латекса, инте-

Таблица 48. Цены на различные масла и нефтепродукты на лондонской бирже (май 1983 г.)

Продукт	Долл/т
Растительные масла	
соевое	436
кокосовое	610
арахисовое	545
пальмовое	425
Каучук	1169
Газойль	236
Бензин высшего качества	301

ресно отметить, что каучук, являясь чистым углеводородом и будучи уникальным растительным продуктом, является таким дорогостоящим.

В прошлом делались попытки найти заменитель каучуконоса среди видов, иных, чем гевея, но ни один не выдержал испытание временем. Среди различных возможностей получения биотоплива следует изучить возможности использования в этом плане растительных масел, а также пальмового масла; в настоящее время исследуется экономика их производства.

**Переработка растительного масла.** Типичные издержки производства и переработки растительных масел приводятся в публикации ООН [30]. В таблице 49 дается раскладка издержек производства масла в развитой стране субтропического или теплого климата. Смешанные семена масличных культур (300 т в день) перерабатываются в рафинированное масло, кислое масло и муку при трехсменной непрерывной

Таблица 49. Издержки производства масла из смеси семян (1977)

Показатели	Долл/т масла
Сырье	
семена	838
химикаты и упаковка	57
Коммунальные услуги	40
Заработная плата	61
Накладные расходы	36
Капитальные издержки (прибыль на вложенный капитал – 32,4 %)	397
Кредиты на побочные продукты	392
Всего	1037

Таблица 50. Издержки при производстве пальмового масла (1977)

Показатели	Долл/т масла
Возделывание, уборка и т. д.	194
Переработка	38
Капитальные затраты (прибыль на вложенный капитал – 25,9 %)	
обустройство плантации	84
инфраструктура и транспорт	13
маслобойный завод	45
Кредиты на побочные продукты	35
Всего	339

работе в течение 250 дней в году. Расчеты показали, что срок окупаемости составляет 3,9 года при норме прибыли 30,8 %. Основная доля издержек приходилась на семена масличных культур, служившие сырьем. В таблице 50 дается раскладка издержек по возделыванию и переработке пальмового масла в Малайзии (производительность комплекса 160 т/день). Наибольшая доля издержек падает на выращивание пальмовых плодов. Норма прибыли по выращиванию и переработке пальмового масла является благоприятной, что объясняет значительное расширение этого производства в Малайзии за последние два десятилетия.

**Растительное масло как топливо.** Были предложения сделать растительные масла, предназначенные для топлива, дешевле, чем пищевые [31]. Однако процесс очистки, применяемый при производстве растительных масел, не играет важной роли при определении расходов. Как уже говорилось, масла в их естественном состоянии имеют ряд недостатков и нуждаются в использовании дорогостоящего процесса обогащения, например замещения глицерола в триглицеридах метанолом или этанолом.

Те же обстоятельства, способствующие получению спирта для использования его в качестве топлива, применимы и к использованию растительных масел, т. е. дефицит источников энергии и наличие излишков сельскохозяйственной продукции. Растительные масла находятся часто в излишке, но их производство подвержено погодным колебаниям. В результате происходит резкое колебание цен. Этот продукт используется в основном в пищу, и в этом случае потребители могут мириться с высокими ценами, в результате чего он не поступает на топливный рынок. Если использование растительных масел в качестве топлива субсидируется, то этот существенный пищевой продукт становится более дорогим, что отрицательно сказывается на беднейших слоях населения земного шара.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Holland, F. A., Watson, F. A., and Wilkinson, J. K., *Introduction to Process Economics*, Wiley, 1974.
- [2] Allen, D. H., *A Guide to the Economic Evaluation of Projects*, 2nd edn., Institute of Chemical Engineers, 1980.
- [3] Kharbanda, O. P., and Stallworthy, E. A., *How to Learn from Project Disasters*, Gower, 1982.
- [4] Pirt, S. J., Fermentation – A question of life, *Advances in Biotechnology*, Vol. 2, Ed. M. Moo-Young, Pergamon Press, 1981.
- [5] Zeikus, J. G., Chemical and fuel production by anaerobic bacteria, *Ann Rev Microbiol*, 34, 1980, 423–464.
- [6] Spinks, A., Targets in Biotechnology, Lecture given at the University of Surrey, 11th Feb. 1981.
- [7] Agarwal, A., The forgotten energy crisis, *New Scientist*, 10 Feb. 1983, 377–379.
- [8] Jones, D., Jones J., Wood chips versus densified biomass: an economic comparison, pp. 223–249 in [7].

- [9] Brandon, R. J., Residual wood fired furnaces: A demonstration of advanced systems, 4th Symposium on Energy from Biomass and Wastes, Lake Buena Vista, Florida, Jan. 1980, pp. 199–221.
- [10] Kemp, C. C., Szego, G. C., The energy plantation, *Energy Sources*, 2, 1975, 263–274.
- [11] Grantham, J. B., Ellis, T. H., Potentials of wood for producing energy, *J. Forestry*, Sept. 1974, 552–556.
- [12] Klüss, D. L., Energy from biomass and wastes – 1978 update, Symposium on Energy from Biomass and Wastes, Washington DC, Aug. 1978, 1–27.
- [13] Levenhagen, J. I., An update on the city of Waukesha energy recovery incinerator plant, pp. 151–167 in [9].
- [14] Kohan, S. M., Barkhordar, P. M., Mission Analysis for the Federal Fuels from Biomass Program, Vol. 4: Thermochemical conversion of biomass to fuels and chemicals, Contract EY-71-C-03-0115 PA131 to the US Dept. of Energy, Final Report, Jan. 1979, SRI International.
- [15] Haggin, J., Kriegar, J. H., Biomass becoming more important in US energy mix, *Chem and Eng News*, Mar. 14, 1983, 23–30.
- [16] Martin, S. R., The production of fuel ethanol from carbohydrates, Proceedings of Workshop on Power Alcohol organised by British Anaerobic and Biomass Association at Mortimer Hill, Reading, 23 Jan. 1981.
- [17] Alcohol production from biomass in the developing countries, *World Bank Report*, Sept. 1980.
- [18] MacKillop, A., More biomass energy for the south, *Energy Policy*, June 1983, p. 185.
- [19] Ruchen, C., The development of biogas utilisation in China, *Biomass*, 1, 1981, 39–46.
- [20] Smil, V., Chinese biogas program sputters, *Soft Energy Notes*, July/August 1982, 88–90.
- [21] Madeley, J., Problems of biogas production, *Energy Policy*, Dec. 1981, 328.
- [22] Hobson, P. N., Bousfield, S., and Summers, R., *Methane Production from Agricultural and Domestic Wastes*, p. 87, Applied Science Publishers, 1981.
- [23] Where there's muck – and straw – there's energy, *Farmer's Weekly*, Nov. 21, 1980, 39.
- [24] p. 226 in [20].
- [25] Veal, F. J., Methane from sorted domestic refuse: an economic assessment, Warren Spring Laboratory Report No. LR 260(MR), 1977.
- [26] Le Roux, N. W., Wakerley, D. S., The microbial production of methane from the putrescible fractions of sorted household waste, *Conservation and Recycling*, 2, 1978, 163–169.
- [27] Wilson, D. C., The uncertain costs of waste disposal and resource recovery, *Resource Recovery and Conservation*, 4, 1979, 261–299.
- [28] Jones, J. L., Methane production via bioconversion: A technoeconomic evaluation, *Chem. Eng Prog.*, Sept. 1980, 58–64.
- [29] Varani, F. T., Materials handling in anaerobic digestion systems, pp. 140–142 in Proceedings of the Symposium 'Bio-energy 80', April 21–24, 1980, in Atlanta, Georgia.
- [30] Guidelines for the establishment and operation of vegetable oil factories, United Nations, New York, 1977.
- [31] Hall, D., Put a sunflower in your tank, *New Scientist*, 26 Feb. 1981, 524–6.



ГЛАВА

## ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ БИОЭНЕРГИИ

### 5.1. ВВЕДЕНИЕ

**Сохранение энергии.** Как уже говорилось в главе 1, энергетические затраты при переработке и экстрагировании топлива являются важным вопросом в плане перспективного обеспечения топливом, а также вероятности уменьшения запасов энергии. На местном уровне стоимость возобновляемых видов топлива, исходя из затрат ископаемых видов топлива, использованных для их производства, связана с планами увеличения национальных запасов энергоносителей и снижения размеров валютных платежей за импорт первичной энергии. В Великобритании примерно 30 % первичной энергии, используемой в стране, потребляется самими энергетическими предприятиями [1]. По прогнозам, эта доля должна увеличиться с уменьшением доступности топлива. Были также высказаны опасения [2], что с понижением концентрации источников энергии и усложнением их переработки производство полезных видов топлива приемлемыми темпами окажется по термодинамическим причинам невозможным. Дополнительным мощным инструментом определения преимуществ альтернативных методов выработки энергии является детальный анализ энергетических затрат при производстве топлива.

Анализ чистых затрат энергии представляет собой попытку оценки затрат первичной энергии при производстве топлива; эти расчеты одно время считались настолько важными, что США потребовали утверждения закона о необходимости представления энергетического анализа как обязательного раздела всех новых технологических проектов по производству энергии [3].

Данные анализа чистых затрат энергии использовались как сторонниками, так и противниками возобновляемых источников энергии; в итоге стало очевидным, что выбор соответствующего метода расчета дает возможность ответа на целый ряд вопросов. В итоге была поставлена под сомнение основная философия энергетического анализа, а также возможности любой методологии ответить на вопросы, касающиеся термодинамических пределов продуктивности человеческого общества [2].

Человечеству не грозит гибель от истощения источников энергии вследствие расточительного их использования; как уже говорилось, по-

тенциальные источники энергии имеются в изобилии, мы не знаем только путей их использования. Энергетическая оплата процесса производства топлива не определяет его коммерческую ценность (жизнеспособность), и этот показатель не следует рассматривать как основной фактор. Тем не менее существует значительный интерес к расчетам необходимого количества ископаемого топлива для производства биологически возобновляемых видов топлива. Хотя эта информация играет небольшую роль в экономических спорах по поводу производства новых видов топлива, она может быть очень полезной в часто эмоциональных предложениях относительно "политических" субсидий и правительственных "поощрений" для предоставления возобновляемым видам энергии "равных возможностей".

**Допустимые затраты энергии.** Анализ затрат энергии при производстве топлива поднимает ряд основных проблем. Во-первых, до сих пор не имеется единого мнения относительно числа и вида вводимых энергетических ресурсов при осуществлении данного процесса. Кроме совершенно очевидных затрат энергии и других видов топлива, существует много других вводимых ресурсов, которые включаются и которые могут быть включены. Например, существует энергия, используемая при производстве оборудования, зданий, а также других материалов, энергия, используемая в области исследований и разработок, энергия, необходимая для очистки окружающей среды после проведения процесса. Капитал, прибыль, труд человека, заработная плата — все эти категории могут быть выражены с точки зрения затрат определенного количества энергии.

Энергетическая характеристика каждой категории часто наиболее удобным образом может быть выражена в форме эквивалентных экономических затрат по этой статье. Этот эквивалент получают на основании национальных денежных расходов по отдельным статьям и общего количества энергии, затраченного на их производство и доставку.

Таблица 51. Затраты энергии на единицу денежных затрат для различных сельскохозяйственных вводимых ресурсов

Показатели	МДж/ф. ст. (1968)
Дизельное топливо	2950
Электроэнергия	1690
Химические средства	326
Сельскохозяйственные постройки	260
Трактора и сельхозмашины	216
Технический уход и амортизация оборудования	200
Транспорт, услуги и т. д.	84

Некоторые примеры этих денежно-энергетических отношений для сельскохозяйственных вводимых ресурсов показаны в таблице 51 [4]. Более полное обсуждение типов вводимых энергетических ресурсов и методов расчетов можно найти в литературе [4, 5, 6].

**Энергетическая ценность побочных продуктов.** Второй проблемой энергетического анализа является получение дополнительной энергии при производстве побочных продуктов в ходе возобновляемых процессов производства топлива. Примеры можно найти в энергетическом анализе производства газохолода, где углеводородные остатки после сбраживания и перегонки могут иметь теплотворную способность, сравнимую с теплотворной способностью спирта. Некоторые авторы утверждают, что использование этих остатков позволяет избежать затрат значительных количеств энергии, необходимой для производства альтернативных видов кормов и других продуктов.

**Экономить нефть, а не энергию.** Наконец, неодинаковая экономическая ценность различных видов энергии (например, жидкие и твердые виды топлива) приводит к стремлению анализировать процесс не с точки зрения общих затрат энергии, а с точки зрения потребления только одного вида энергии. Проблема разделения различных количеств топлива того или иного типа, идущих на изготовление продуктов определенного диапазона, как это можно себе представить, является очень сложной.

Столкнувшись в литературе с энергетическими расчетами, читатель немедленно задаст вопрос, какие вводимые ресурсы и какие выгоды от использования побочных продуктов были учтены при расчетах. Необходимо относиться с осторожностью к методу выражения конечных результатов, так как, используя определенный продукт и приводя в действие соответствующий процесс, можно получить высокий выход чистой энергии. Калорийность биомассы сама по себе не является показателем затрат энергии; теоретически для поддержания процесса могут использоваться неограниченные количества биомассы при минимальной стоимости ископаемой энергии. До некоторой степени, интерпретация результатов расчетов затрат энергии, приведенных в этой главе, оставлена для читателя. Роль возобновляемых процессов в увеличении национальных запасов энергии, экономики валюты и оттягивании того момента, когда нефть иссякнет, также трудно выразить в количественных показателях. Единственное, что можно сказать, опять оставляя интерпретацию фактов читателю, — это то, что чем выше затраты энергии в производстве возобновляемых видов топлива, тем меньше их роль в увеличении мировых запасов энергии. При необходимости чистых затрат ископаемой энергии трудно подобрать аргументы для обоснования использования возобновляемых видов топлива как варианта окончательного решения проблемы удовлетворения потребностей человека в энергии.

## 5.2. ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ПРОИЗВОДСТВО БИОМАССЫ

**Революция в сельском хозяйстве.** Замена труда человека и животных трудом машины в результате механизации сельского хозяйства в ходе XX столетия может быть справедливо названа ярким процессом. Энергия, необходимая для обработки почвы, возделывания культур, их уборки и транспортировки продукции, прямо или косвенно обеспечивается ископаемыми видами топлива. Топливо необходимо для приведения в движение трактора, других сельскохозяйственных машин, строительства этих машин, производства удобрений и других химических средств, а также для целого ряда других целей. В 1901 г. в сельском хозяйстве использовалось 1,1 млн. лошадей и около 30% площадей (равнинной местности) отводилось для их содержания [4]. Эти лошади теперь уступили место полумиллионному парку тракторов. В 1885 г. в Южной Англии на каждые 11 га приходился один человек и целая армия сезонных рабочих, которые нанимались на период уборки. К началу 70-х годов XX столетия на одного человека приходилось уже 37 га. В период между 1920 и 1970 г. затраты энергии увеличились с 0,5 до 9 ГДж/га, отражая как замену труда человека и животных механизированным трудом, так и повышение интенсивности сельского хозяйства, ведущей к повышению урожаев. Затраты энергии на одного человека в сельскохозяйственном секторе развитых стран аналогичны затратам в тяжелой промышленности. Революция выразилась не столько в увеличении сбора биомассы, сколько в изменении путей ее выращивания и уборки.

Высокие затраты энергии являются в настоящее время существенной частью сельскохозяйственной практики, определяющей высокое качество продукции. Революция в сельском хозяйстве произошла благодаря не только более дешевой энергии, но также вследствие наличия машин и химических средств, необходимых для получения высоких урожаев и высокого качества продукции. Непосредственная стоимость топлива составляет только небольшую долю стоимости сельскохозяйственной продукции, и даже при более высоких ценах на топливо новая технология продолжала бы использоваться.

Тенденция к изменению типа и количества энергии, необходимой в сельском хозяйстве, привлекла значительное внимание в литературе. Многие относятся отрицательно к зависимости производства такого основного предмета потребления, как продовольствие, от ископаемых видов топлива. Так как продовольствие также является топливом, а его энергетическая ценность может быть выражена в тех же единицах, что и энергетическая ценность ископаемого топлива, энергетические затраты производства продовольствия и кормов могут быть выражены в простых энергетических соотношениях. С этой точки зрения продукты питания, которые мы потребляем, производятся при очень низкой эффективности затрат энергии. Так как значительная часть биомассы,

предназначенная для производства возобновляемых видов топлива, будет получаться с использованием технологии, мало отличающейся от технологии производства продуктов питания, вопрос энергетических затрат при выращивании биомассы становится кардинальным вопросом при проведении анализа чистых затрат энергии.

**Разбивка затрат энергии.** Первая основная проблема затрат энергии при получении биомассы связана с относительным значением различных вводимых энергетических ресурсов. Раскладка потребления энергии в сельском хозяйстве Великобритании представлена в таблице 52 [4]. Основную долю энергетических затрат составляют непосредственные затраты топлива, а также косвенные затраты энергии на производство удобрений и машин. Этот анализ не учитывает виды энергии, связанные с затратами труда, получением прибылей, капиталовложениями и т. д. Тем не менее общие потребности в энергии сельского хозяйства Великобритании являются значительными, и суммарный результат таблицы 52 составляет около 3% общего количества первичной энергии. В итоге в Великобритании на каждую калорию продовольствия, произведенного в сельском хозяйстве, тратится около 3 кал ископаемого топлива

Таблица 52. Затраты энергии в сельском хозяйстве Великобритании (1968)

Статья затрат	Млн. ГДж
Нефть	69,7
Электроэнергия	29,8
Другие виды топлива	8,9
Удобрения	81,9
Машины	31,8
Строения	22,8
Другие затраты	29,0
<b>В с е г о</b>	<b>273,9</b>

Таблица 53. Затраты энергии при выращивании кукурузы в США

Статья затрат	ГДж/т (сухая масса)
Удобрения и известь	2,28
Пестициды	0,01
Машины	1,27
Выращивание культур	0,23
Уборка	1,22
<b>В с е г о</b>	<b>5,01</b>

(прямые энергетические потребности в топливе и материалах). Куда уходит энергия (в пересчете на 1 т биомассы)? Раскладка затрат энергии при возделывании кукурузы в США показана в таблице 53 [7]. При возделывании кукурузы используются общепринятые системы удобрений и обработки почвы, обеспечивающие урожай в среднем 2,54 т с 1 га. В период выращивания и уборки культур используется жидкое топливо. Машины также представляют собой значительную статью потребления энергии. Наиболее важной статьёй, однако, является обеспечение удобрений. В этих расчетах не учитываются строения, труд и другие затраты энергии. Тем не менее даже с учетом этих ресурсов выращивание и доставка 1 т кукурузы на ферму требуют затрат энергии, эквивалентной примерно одной трети калорийности сухого зерна. Однако в долгосрочном плане непосредственная стоимость топлива составит только 10 % стоимости производства зерна.

**Потребности различных культур в энергии.** Зерновые культуры обеспечивают наиболее эффективное использование энергии. Овощи, зеленые культуры, древесные культуры, такие, как цитрусовые, яблоки и т. д., требуют наибольших затрат энергии при возделывании. Примеры потребностей энергии на 1 т биомассы показаны в таблице 54 [8]. Цифры приводятся для сельского хозяйства США и включают только прямые затраты топлива и удобрений, поэтому они, естественно, ниже других показателей.

Таблица 54. Затраты энергии в сельском хозяйстве США (топливо + удобрения)

Культура	ГДж/т (сухая масса)
Овес	1,9
Ячмень	3,1
Сахарная свекла	2,7
Соя	4,0
Картофель	7,9
Яблоки	17,3
Апельсины	25,4

Типы биомассы, которые можно считать за биотопливо, вероятно, лучше представлены такими продуктами, как силос, экономические расчеты по которому приведены в главе 2. Затраты энергии по производству кукурузного силоса в США представлены в таблице 55 [9].

Основная доля стоимости энергии приходится опять на машины, топливо и удобрения. В этих расчетах энергетический эквивалент трудовых затрат составляет 0,002 ГДж/ч. Однако энергетические затраты не рассчитывались по таким статьям, как строения, транспорт, прибыль,

Таблица 55. Затраты энергии при производстве кукурузного силоса

Статья затрат	ГДж/т (сухая масса)
Труд	0,01
Машины	0,75
Топливо	1,50
Удобрения	1,28
Семена	0,06
Гербициды	0,06
Электроэнергия	0,29
Транспорт	0,13
Всего	4,14

капиталовложения и т. д., силос предназначался для внутривладельческого использования. Тем не менее производство силоса требует около 4 ГДж/т при его теплотворной способности (определенной с помощью калориметрической бомбы) около 20 ГДж. Естественно, энергия биомассы не является легкодоступной, и биомасса должна быть обогащена путем использования других энергоемких процессов. Показатель 4 ГДж/т сухой массы увеличивается пропорционально потерям урожая при обогащении и составляет основной вводимый ресурс в окончательном продукте.

**Затраты энергии в лесном хозяйстве.** Возможно, вследствие своего традиционного использования в качестве топлива лес явился предметом усиленного внимания как потенциальный источник энергии. Возникает инстинктивное чувство, что в лесоводстве затраты энергии должны быть меньше, чем в интенсивном сельском хозяйстве. Работы по очистке площадей, посадке и уборке выполняются значительно реже, чем в сельском хозяйстве. Удобрения на лесопосадках вносят значительно реже, и деревья, по-видимому, "заботятся сами о себе". Однако положение современного лесного хозяйства не так просто: энергетические затраты являются существенными, и при учете всех процессов, необходимых для доставки биомассы к месту ее использования, составят около четверти теплотворной способности древесины. Сравнение интенсивной системы лесоводства, где проводится вспашка, внесение удобрений, обработка пестицидами и т. д., а также уборка каждые 10 лет, с системой естественного лесовозобновления показало незначительную разницу между общими показателями энергетических затрат [10].

В таблице 56 дается раскладка затрат энергии в интенсивном лесоводстве. Основная доля затрат приходится на топливо и удобрения. Основные потребности в энергии при подготовке древесины к использованию приходятся на процесс сушки. В расчеты включены затраты человеческого труда, однако других вводимых ресурсов не дано. Несколько

**Таблица 56. Затраты энергии при интенсивном ведении лесного хозяйства**

Статья затрат	ГДж/т древесины (сухая масса)
Оборудование	0,007
Химические средства и удобрения	0,94
Семенные деревья	0,007
Топливо	0,45
Труд	0,002
Измельчение	0,08
Сушка	3,70
<b>Всего</b>	<b>5,19</b>

приводят в замешательство низкие затраты на оборудование, а также отсутствие затрат на строительство измельчающего и сушильного оборудования (особенно потому, что по сельскохозяйственным машинам даются существенные затраты). В этих исследованиях урожай древесины с 1 га при интенсивной системе был в три раза выше, чем при естественной регенерации, поэтому для обеспечения того же объема продукции в последнем случае необходима в 3 раза большая площадь. Затраты на транспорт не включены в таблицу 56, но они оцениваются в 1,0 МДж/ткм; при этом в системах с естественной регенерацией они возрастают вследствие больших расстояний между местоположением заказчика и местом рубки.

При анализе затрат по выращиванию можно видеть, что лесное хозяйство имеет очень низкие потребности в энергии (собственно лесная культура). Однако транспортировка сырой древесины на большие расстояния для использования ее в качестве топлива нецелесообразна; продукт, подобно зерну в сельском хозяйстве, должен транспортироваться к месту использования почти в сухом состоянии. Авторы проведенного исследования определили сушку и транспортировку биомассы как две основные статьи затрат энергии; снижение размеров этих затрат является затруднительным.

### 5.3. ЗАТРАТЫ ЭНЕРГИИ НА ОБОГАЩЕНИЕ БИОМАССЫ

Затраты энергии на добычу ископаемых видов топлива. Биомассу в сыром состоянии можно сравнить с источниками первичной энергии, используемыми в национальном масштабе для обеспечения топливом промышленности, транспорта, жилых помещений и т. д. Эти источники первичной энергии частично расходуются в ходе самого процесса производства топлива. Желательно сохранить ископаемый уголь, нефть и газ

как компоненты источников первичной энергии, побудивших нас к проведению подсчетов энергетических затрат. Биомасса уже потребовала в процессе ее подготовки некоторых затрат первичной энергии. Сколько еще необходимо энергии для превращения сырья в пригодные для использования виды топлива, и насколько эти количества сравнимы с затратами энергии, необходимыми для производства топлива из ископаемого сырья? На этот вопрос нельзя дать точного ответа, так как провести сравнения по затратам энергии трудно. Цифры, приведенные в этом разделе, в лучшем случае, лишь приближенно раскрывают потребность в первичной энергии при производстве возобновляемых и не возобновляемых видов топлива.

Затраты энергии при производстве некоторых видов топлива из ископаемого сырья даются в таблице 57 [1]. В таблице показаны общие затраты энергии на единицу массы топлива и отношения использованной энергии к полученной. За исключением электроэнергии, только небольшая часть теплотворной способности топлива используется для его производства. Так как нас с самого начала интересовало истощение ископаемых ресурсов, теплотворная способность самого топлива принималась как вводимый ресурс; что касается биомассы, то энергию источника образования углеродсодержащих молекул — Солнца мы не учитываем.

**Таблица 57. Затраты энергии и энергетические соотношения для ископаемых видов топлива**

Источник энергии	Общие затраты энергии, ГДж/т	Энергия затраченная/ энергия полученная
Уголь, среднее по промышленности	30,2	1,0
Кокс	32,4	1,1
Бензин	51,6	1,2
Дизельное топливо	48,6	1,1
Топливная нефть (жидкое топливо)	54,2	1,3
Газ	0,13 ГДж/100 000 БТЕ	1,2
Электроэнергия	0,014 ГДж/(кВт · ч)	3,97

Однако мы включаем в наши расчеты стоимость получения биомассы. Как говорилось в разделе 5.2, типичные затраты энергии при создании биомассы (за исключением древесины) составляют 4–5 ГДж/т сухой массы. Энергоемкость этой биомассы составляет в среднем 18 ГДж/т сухой массы (игнорируя содержащуюся воду); таким образом, энергетическое соотношение (отношение энергии затраченной к энергии полученной) составляет 0,25. Целью процесса обогащения био-



массы, описанного раньше, является превращение биомассы в продукты, получаемые в настоящее время из ископаемых источников, т. е. в твердые, жидкие и газообразные горючие вещества, жидкие виды топлива для двигателей внутреннего сгорания и получения электроэнергии.

**Сжигание древесины.** Простое сжигание биомассы должно представлять простейший случай затрат при производстве возобновляемой энергии. Как было указано в предыдущем разделе, затраты на производство высушенной, измельченной древесины составляют около 5 ГДж/т, или около  $\frac{1}{4}$  ее теплотворной способности. Такая древесина при минимальной адаптации оборудования может непосредственно выступать в качестве заменителя угля, затраты энергии на производство которого сравнимы с его теплотворной способностью. Поэтому использование древесины даст чистую экономию ископаемого угля и нефти в национальном масштабе, даже при необходимости оплаты энергетических затрат в лесоводстве. Древесина широко используется во всем мире, хотя часто без лесовозобновления (что ставит под вопрос использование термина "возобновляемый"). Нерешенным вопросом, связанным с затратами энергии по производству древесины, является вопрос заработной платы, капитальных вложений, прибыли и т. д., который не включался в анализ энергетических затрат. Этот показатель зависит от структуры общества и представляет большую проблему при проведении анализа энергетических затрат. С одной стороны, денежные затраты пропорциональны содержащейся энергии [11], и лесное хозяйство в целях производства топлива функционировать не будет, в основном вследствие того, что в большинстве стран оно дорого и, кроме того, поглощает большое количество энергии, будучи к тому же неэкономичным. С другой стороны, косвенные затраты энергии, возможно, могут быть снижены путем резкого изменения характера потребления общества, и представленный энергетический анализ может сохранить свою силу. Почти все остальные виды биотоплива требуют использования большего количества энергии, чем древесина, и косвенные затраты на заработную плату, прибыль и т. д. становятся второстепенными вопросами, хотя они и увеличивают общую сумму затрат. Сушка, термическое обогащение, биохимическая переработка и т. д. — все эти процессы требуют больших затрат энергии, прежде чем мы получим топливо, сравнимое по своим характеристикам с топливом из ископаемого сырья.

**Процессы термического обогащения.** В литературе имеется крайне мало данных по энергетической характеристике термического обогащения биомассы. Для таких процессов часто рассчитываются простые тепловые балансы, при этом может быть сохранена значительная доля теплотворной способности сырья. Термическая эффективность таких процессов явно представляет интерес в плане сравнения преимуществ различных предложений и получения наибольшего выхода готовой продукции. Однако это не отвечает на вопрос об экономии ископаемого топлива. В таблице 58 показан тепловой баланс при производстве синте-

тического натурального газа из дерева [12]. В ходе процесса теряется около трети теплотворной способности сырой биомассы.

Таблица 58. Тепловой баланс газификации древесины

Показатели	Теплотворная способность сырой древесины, %
Синтез-газ	63,0
Отведено на охлаждение	31,4
Дымоход	4,4
Зола и непревращенный углерод	0,9
Разное	0,3
Всего	100,0

К этим потерям следует добавить все косвенные затраты энергии, связанные с оборудованием и финансированием самого процесса, а также финансированием вспомогательной деятельности, например очистка стока и т. д. Превысит ли сумма всех элементов общие затраты энергии на получение натурального газа (1,2 ГДж/ГДж, таблица 57) — здесь можно только строить предположения.

**Биохимические процессы.** Затраты энергии, связанные с брожением спирта, явились предметом пристального внимания в литературе, и они будут рассмотрены в следующем разделе. Другой биохимический процесс, анаэробное брожение, был рассмотрен Льюисом [13], который пришел к выводу, что простые системы, применявшиеся на Дальнем Востоке, могут быть чистыми производителями энергии, хотя точных данных по этому вопросу не имеется. При использовании более сложных систем общие прямые и косвенные затраты могут превысить количество энергии, полученной в форме метана. В одном примере по использованию отходов животноводства при общей затрате энергии 82,5 ГДж количество полученной энергии метана соответствовало 32 ГДж. При возделывании водорослей на каждый гигаджоуль метана требовалось 3 ГДж энергии. Даже эти цифры говорят о том, что может быть возможным в ближайшие годы, а не о том, что уже было достигнуто. Таким образом, продукты анаэробного брожения — сомнительный кандидат на использование в качестве заменителя ископаемого топлива. В этих исследованиях рассматривались только ограниченные затраты энергии. Количество энергии, необходимое, например, для очистки стока, не учитывалось.

**Растительные масла:** Насколько известно, процесс производства растительных масел не подвергался всестороннему энергетическому анализу. Общие затраты энергии на производство этих потенциальных видов топлива могут быть очень низкими. Затраты энергии на производство сои, как указывалось в предыдущем разделе, составляют около 4 ГДж/т

сухой массы, а экстрагирование масла требует относительно небольших энергетических затрат. Соевое масло оценивалось по методу отношения затрат к выходу энергии по соответствующим отраслям [6]; затраты составили 18 ГДж/т, в то время как теплотворная способность масла составляет около 43 ГДж. И хотя здесь также учитывались не все энергетические затраты, полученные показатели позволяют поставить растительное масло в один ряд с древесиной как возможных производителей чистой энергии.

#### 5.4. СПИРТ КАК ТОПЛИВО

**Экономия на импорте нефти?** Пропаганда спирта, полученного путем брожения для использования его в качестве топлива для двигателей внутреннего сгорания в США, характеризующихся наибольшим потреблением бензина в мире, привела к тому, что каждому аспекту производства спирта, его экономии и термодинамике стало уделяться самое пристальное внимание. Как говорилось ранее, возможности использования спирта в качестве топлива существуют в США только благодаря дешевым зерновым, налоговым льготам за такое использование спирта по линии как федерального правительства, так и правительства штатов, а также стимулированию капиталовложений. Фермеры, выращивающие кукурузу для производства спирта, получают большую выгоду, так как они постоянно имеют излишки этой культуры. Кроме того, также отмечалось, что добавление спирта в бензин снизит зависимость США от импортируемой нефти, зависимость, которая до нефтяного кризиса непрерывно росла. Замена нефти спиртом или его добавки к автомобильному бензину являются некоторым основанием для подобного рода заявлений. Возможность такой экономии была подтверждена целым рядом энергетических анализов. Однако выводы, сделанные из этих исследований, довольно спорные; существует мнение, что при технологии получения спирта в США методом брожения потребляется больше энергии из высококачественного топлива (т. е. нефти), чем ее вырабатывается [14, 15].

Дискутирующие стороны обвиняли друг друга в отсутствии объективности. Показатели различных вводимых ресурсов при производстве спирта были часто у обеих сторон аналогичными, но затруднения вызывал как раз вопрос: какие ресурсы должны быть включены в расчеты? Расчетные показатели экономии энергии нефти при использовании спирта в качестве топлива варьируют очень широко — от чистой экономии более галлона нефти на галлон спирта до потерь до трех галлонов на галлон. Ниже дается содержание проводящихся дискуссий, а также характеристика современного подхода к вопросу о ресурсах. Результатом является согласие с точкой зрения, что без революции в технологии использования угля и нефти в США использование спирта будет иметь ничтожное или даже отрицательное влияние на потребление нефти в стране.

**Раскладка затрат энергии на производстве спирта.** В литературе имеются данные по энергетическим затратам, а также различные варианты расчетов [16]; в таблице 59 представлена основная структура такого анализа. Для производства 1 т спирта необходимо примерно 3,35 т кукурузы. Раскладка энергии возделывания кукурузы здесь не дается, но она примерно соответствует показателям по биомассам, о которых говорилось ранее. Показатель энергии, затраченной на возделывание кукурузы, приближается к показателю теплотворной способности полученного спирта. Энергия переработки примерно в 2 раза выше затрат энергии на возделывание. Энергия, затраченная на производство побочного продукта (сухая барда), рассчитывается на основе энергии возделывания кукурузы минус стоимость транспортировки. Количество нефти, замененное спиртом, используемым в качестве добавки к бензину, выражается здесь через его теплотворную способность (29 ГДж/т против 43,5 ГДж/т для автомобильного бензина). Кроме того, использование спирта способствует также сохранению энергии, идущей на очистку сырой нефти для производства автомобильного бензина. В результате, как показывает анализ, в США экономится 35 ГДж первичной энергии (всех типов). Однако эта "экономия" идет за счет 70,3 ГДж первичной энергии.

Таблица 59. Энергетический анализ производства этанола для использования его в качестве топлива

Показатели	ГДж/т спирта
Сельское хозяйство (3,35 т кукурузы)	26,6
Энергия переработки	
брожение	8,9
перегонка	19,8
выпаривание и сушка побочного продукта	22,8
Снижение затрат вследствие производства побочного продукта	-6,8
Общие затраты	70,3
Теплотворная способность этанола	29,0
Экономия энергии, идущая на производство автомобильного бензина	6,0
Общий выход	35,0

Количество нефти может быть выражено в затратах энергии на производство спирта из кукурузы. При получении биомассы около 59 % потребленной энергии поступает из нефти. При переработке биомассы

в спирт затраты нефти могут варьировать в зависимости от метода перегонки; значительная доля вводимых ресурсов может покрываться углем, хотя по ряду причин в практике это отсутствует. Если вводимые ресурсы представлены по возможности углем, затраты энергии (нефть) составляют около 12 ГДж/т спирта по сравнению с полученным энергетическим уровнем 35 ГДж/т. Таким образом, производство спирта представляет собой метод превращения твердого топлива, угля, в более калорийное жидкое топливо. Была подсчитана стоимость этого топлива на галлон нефти [14]. Каждая тонна спирта в лучшем случае (перегонка на угле) экономит около половины тонны (35—12 ГДж) нефти. Для производства спирта в США рекомендуются установки на угле, а не на нефти.

**Косвенные энергетические затраты и кредиты.** В литературе имеются многочисленные варианты расчетов энергетических затрат. Энергия возделывания кукурузы может быть выше или ниже названного уровня. В кукурузном поясе США затраты на возделывание культур являются низкими. Более полный анализ с включением затрат на строения и т. д. и других косвенных затрат энергии, связанных с денежными расходами, дает более высокий показатель общих затрат. Кроме того, если увеличение использования топлива вызывает необходимость расширения площадей под кукурузой, стоимость возделывания кукурузы будет выше, так как для этих целей придется использовать менее плодородные почвы, чем почвы кукурузного пояса. Имитационные исследования, проведенные в Университете штата Айова, показали, что стоимость возделывания кукурузы может возрасти в 3 раза [17].

Был разработан ряд предложений по сокращению затрат на переработку биомассы при производстве спирта; общие затраты энергии на этой стадии должны составлять 20 ГДж/т [18]. Цифры таблицы 59 взяты из источников, опубликованных сторонниками использования спирта в качестве топлива, и вряд ли здесь можно ожидать больших отклонений. Минимально эффективное снижение затрат на брожение и перегонку само по себе не приведет к таким низким показателям; однако затраты энергии на переработку различным образом компенсируются кредитами на производство побочного продукта. Вместо учета только расходов на получение эквивалентной массы кукурузы (в пересчете на сухую барду) в качестве скидки, последняя рассчитывается на основе общей теплотворной способности сухой барды. Это требует обоснованности использования этого материала в качестве топлива. Белковая ценность зерна может переводиться в затраты энергии на возделывание другой белковой культуры, такой, как соя. Однако белковая ценность сухой барды намного ниже белковой ценности соевой муки. В крайнем случае, в скидку может включаться теплотворная способность отходов клетчатки в результате переработки кукурузы. Однако использование этого материала в качестве топлива маловероятно.

**Топливная ценность этанола.** Ценность спирта как компонента газохла лежит между его эквивалентной теплотворной способностью

(учитывая 4 %-ное увеличение потребления смеси при 10 % спирта в автомобильном бензине) и уровнем, превышающим его теплотворную способность примерно на 70 % (эквивалентным увеличению пробега на 6,7 %). Получение результатов испытаний, дающих увеличение длины пробега, происходит, очевидно, в результате использования искусственно обогащенных смесей для повышения рабочих характеристик двигателей [19], так как спирт "обедняет" бензин. Поэтому было бы правильнее не завышать теплотворной способности спирта при смешивании его с автомобильным бензином (без учета его свойств как антидетонационной присадки).

В литературе имеются данные по энергетическому анализу производства спирта из других культур, таких, как сахарный тростник, маниок, отходы целлюлозы. В принципе, затраты вводимых ресурсов меньше, но они отличаются по значимости. Затраты энергии на возделывание — низкие в случае отсутствия механизации сельскохозяйственного производства или когда сырьем являются отходы. Затраты на переработку ниже, когда в качестве топлива используется жом сахарного тростника (багасса). Вариант с сахарным тростником является интересным вследствие его усовершенствования в Бразилии; однако в этой стране (США) использование сахарного тростника для получения спирта на установке, только частично работающей на багассе, дало лишь небольшую прибавку чистой энергии [20]. По имеющимся данным, при работе на чистом ископаемом топливе процесс идет с потерей энергии.

## 5.5. ЭНЕРГИЯ И ДЕНЕЖНЫЕ ЗАТРАТЫ

Хотя ранее говорилось о том, что привлекательность процессов по производству биотоплива будет определяться не столько энергетическими затратами, сколько денежными расходами, непосредственное сравнение этих двух категорий расходов по отдельным продуктам прояснит отношения между денежными и энергетическими затратами в экономике. На рисунке 15 дается раскладка этих двух категорий расходов. Денежные расходы касаются травяного силоса, производимого в Великобритании, а затраты энергии касаются кукурузного силоса, производимого в США; это сравнение следует принимать как приблизительное вследствие различных технологий возделывания культур в этих странах. Машины и удобрения являются основными компонентами в обоих расчетах и имеют примерно одинаковую значимость. В этом нет ничего неожиданного, так как для таких продуктов энергетические затраты часто рассчитываются на основании денежных показателей. Однако два компонента не согласуются между собой. Один компонент, непосредственные затраты топлива, является существенным с точки зрения энергетических затрат, но очень дешевым с точки зрения денежных затрат. Другой компонент — строения, рента и труд — требует больших денежных затрат, но потребляет ничтожное количество энергии. Фактически некоторые

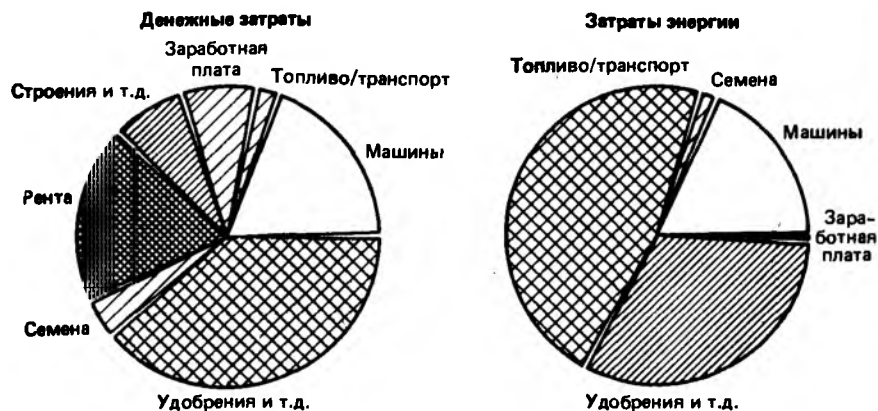


Рис. 15. Издержки при приготовлении силоса.

косвенные затраты энергии должны учитываться для строений и т. д. даже в обычных энергетических расчетах, но эта статья часто не принимается во внимание. Однако денежные вложения предполагают экономию энергии в том отношении, что выделение этих денег дает возможность отдельным лицам тратить их на энергоемкие товары. Если заготовка силоса осуществляется в странах третьего мира, то рента, труд и строения будут требовать значительно меньших затрат и эта статья будет иметь меньшую значимость. Расчет этих денежных затрат с точки зрения потребления энергии проводился различными специалистами.

**Материализованная энергия.** Энергоемкость капитала может быть получена на основании денежных амортизационных отчислений, а также балансового анализа капиталовложений в данной отрасли [6]. Рассчитывается средняя энергоемкость капиталовложений. Тот же автор поднимает вопрос о включении энергетических затрат по категории заработной платы и прибылей (что также будет включать земельную ренту и т. д.). Следует ли в энергетические затраты включать только физическую энергию работников, владельцев и т. д., затраченную на осуществление данного процесса, или здесь надо учитывать также первичную энергию, необходимую для производства всех товаров и осуществления всех услуг? Последний вариант был использован [11] для расчета общей (материализованной) энергии, затраченной на производство товаров и оказание услуг, включая труд и услуги органов управления. Применение этих методов в секторах экономики США показало, что затраты в денежном выражении, определяемые конъюнктурой рынка, и материализованные энергетические затраты пропорциональны для всех секторов, за исключением сектора получения первичной энергии. Хотя это положение часто использовалось для обоснования энергетической теории стоимости, в данном контексте его приложимость не является

очевидной. Процессы производства биотоплива не могут рассматриваться как типичные процессы превращения первичной энергии. Но если они рассматриваются как общие производственные процессы и если затраты энергии можно прогнозировать на основании денежных затрат, — зачем нужны энергетические анализы? Мы можем только вернуться к более общему обоснованию, заключающемуся в том, что если возобновляемые процессы предполагают чистое увеличение потребления традиционных видов первичной энергии, а также восполнение этих видов энергии в течение последующих десятилетий или столетий, тогда мы не будем использовать возобновляемые виды энергии. При точных расчетах заработной платы, прибыли и т. д. в ходе энергетического анализа, описанного в этой главе, мы получим, что почти все эти категории предполагают чистое увеличение потребления видов первичной энергии и с точки зрения термодинамики они мало могут быть полезны человечеству.

**Резюме.** На основании двух последних глав можно сделать вывод, что в общих чертах как экономические, так и энергетические затраты на производство биологических возобновляемых видов топлива являются высокими по сравнению с затратами на производство традиционных видов топлива. Это особенно верно для развитых стран, где ручной труд заменяется установками, требующими определенных капиталовложений, и эти установки должны быть безопасны, прочны, надежны, приемлемы с точки зрения охраны окружающей среды. В других случаях эти критерии могут быть менее важными, и при низком уровне заработной платы предприниматель может не заботиться о повышении производительности труда. В результате в развитых странах биотопливо ограничено рамками меньших, но более ценных рынков. При наличии реального рынка сбыта вопрос о том, является ли биотопливо чистым производителем или потребителем остающихся источников ископаемой первичной энергии, становится вопросом академического порядка.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Chapman, P. F., Leach, G., Slessor, M., The energy cost of fuels, *Energy Policy*, Sept. 1974, 231–243.
- [2] Leach, G., Net energy analysis – is it any use? *Energy Policy*, Dec. 1975, 332–344.
- [3] Huettner, D. A., Net energy analysis: An economic assessment, *Science*, 192, 1976, 101–104.
- [4] Leach, G., *Energy and Food Production*, International Institute for Environment and Development, 1975.
- [5] Chapman, P. F., Energy costs: a review of methods, *Energy Policy*, June 1974, 91–93.
- [6] Wright, D. J., Energy budgets, Goods and services, an input – output analysis, *Energy Policy*, Dec. 1974, 307–315.
- [7] Heichel, G. H., Agricultural production and energy resources. *American Scientist*, 64, 1976, 64–72.
- [8] Energy and US Agriculture 1974, Data Base NTIS publication PB–264 449, Sept. 1976.

- [9] Pimentel, D., Terhume, E. C., Energy and food, *Ann. Rev. Energy*, 2, 1977, 171–195.
- [10] Blankenhorn, P. R., Bowersox, T. W., Murphy, W. K., Recoverable energy from the forests, *Tappi*, 61, 1978, 57–60.
- [11] Constanza, R., Embodied energy and economic valuation. *Science*, 210, 1980, 1219–1224.
- [12] Mission Analysis for the Federal Fuels from Biomass Program, Vol. 4, Thermochemical conversion of biomass to fuels and chemicals, Jan. 1979, SRI Report on Contract EY-76-C-03-0115 PA-131 for US Dept. of Energy.
- [13] Lewis, C. W., Fuels from biomass – Energy outlay versus energy returns: a critical appraisal, *Energy*, 2, 1977, 241–248.
- [14] Weisz, P. B., Marshall, J. F., High-grade from biomass farming: potentials and constraints, *Science*, 206, 1979, 24–29.
- [15] Weisz, P. B., Marshall, J. F., *Fuels from Biomass*, Marcel Dekker Inc., 1980.
- [16] Chambers, R. S., Herendeen, R. A., Joyce, J. J., Penner, P. S., Gasohol; does it or doesn't it produce positive net energy? *Science*, 206, 1979, 789–795.
- [17] Methanol from coal yields more net energy than alcohol from biomass, *Synfuels*, Nov. 17, 1981, p. 5.
- [18] Energy Balances in the Production and End-use of Alcohols Derived from Biomass, Report No. 97611-E002-UX-00, Prepared by TRW Energy Systems Planning Division for the US Dept. of Energy.
- [19] Kyle, B. G., and reply by Weisz, P. B., and Marshall, J. F., High grade fuels and biomass farming, *Science*, 210, 1980, 807–808.
- [20] Hopkinson, C. S., Day, J. W., Net energy analysis of alcohol production from sugar cane, *Science*, 207, 1980, 302–303.

# 6

## ГЛАВА

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТЕПЕНИ РИСКА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ БИОЭНЕРГИИ, ЕЕ СОЦИАЛЬНОЕ ЗНАЧЕНИЕ И БЕЗОПАСНОСТЬ ДЛЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

#### 6.1. АНАЛИЗ СТЕПЕНИ РИСКА

Важным элементом в развитии использования возобновляемых видов энергии является риск, связанный с основной альтернативой источником энергии на земном шаре в будущем – ядерной энергией. Риск, или возможные отрицательные последствия для человечества, связанные с использованием биомассы, а также изготовленных из нее видов топлива, часто считаются незначительными, но многие знают разрушительные возможности бесконтрольного процесса ядерного распада. Возможности риска, связанные с использованием возобновляемых видов топлива при производстве и использовании их в масштабах, аналогичных масштабам использования ископаемых видов топлива, исследовались сравнительно мало, но этот фактор следует принимать во внимание.

Степень риска может быть оценена таким же путем, как это делается при анализе энергетических и денежных затрат. Общая деятельность в этой области раскладывается на ряд составляющих, причем по каждой составляющей известна степень риска. Такой анализ проводился в течение ряда лет [1] применительно к производству и использованию традиционных видов топлива.

Известно, что добыча угля и нефти более опасна как для лиц, участвующих в ней, так и для остального населения, чем производство ядерной энергии или природного газа. Извлечение больших количеств угля и нефти из неблагоприятной среды вызывает больше отрицательных последствий и смертельных исходов среди работников энергетики (в расчете на единицу производимой энергии), чем производство природного газа или добыча значительных количеств урановой руды. Уголь и нефть также вызывают более сильные отрицательные последствия для населения благодаря высвобождению больших количеств газообразных продуктов горения и твердых частиц. Отрицательный эффект, вызываемый продуктами сжигания газа или радиоактивными излучениями ядерных станций, намного ниже. В таблице 60 показаны

потери в человеко-днях на единицу выработанной энергии (один смертельный исход = 6000 чел.-дней) [2].

Таблица 60. Степень риска при производстве и использовании различных видов топлива

Источник энергии	Потери чел.-дней на 100 ГДж произведенной энергии	
	производство	использование
Уголь	232	6381
Нефть	57	6095
Ядерная энергия	28	4,4
Природный газ	19	—
Метанол из древесины	4032	1,3

Риск, связанный с производством биотоплива. В таблице 60 показана также степень риска, связанная с осуществлением одного процесса — получением метанола из древесины. Метанол считался очень чистым топливом, однако риск, связанный с его производством, довольно большой. В лесном и сельском хозяйстве процент несчастных случаев выше, чем при добыче ископаемых видов топлива [3]. Работа с большими партиями древесины также характеризуется высокой степенью риска для рабочих, занятых в этих отраслях. Раскладку степени риска, связанного с производством метанола из древесины, приводится в таблице 61 [4]. Сравнимые цифры по ядерной электроэнергетике представлены в таблице 62 (из того же источника). В отношении получения метанола из древесины наибольшая степень риска связана с приобрете-

Таблица 61. Раскладка степени риска при производстве метанола из древесины

Показатели	Потери чел.-дней на 100 ГДж произведенной энергии
<b>Несчастные случаи на производстве</b>	
приобретение материалов	1206
работа и техобслуживание	2762
транспортировка	51
Профессиональные заболевания	4
Несчастные случаи в быту	0
Заболевания населения, не участвующего в этом производстве	0,4

нием сырья и с осуществлением процесса. Производство металлов и других материалов, используемых при производстве возобновляемых видов топлива, предполагает использование угля или нефти, которые, в свою очередь, добываются и используются при определенной степени риска. Эти цифры следует рассматривать в перспективе, так как риск, связанный с производством угля и нефти, а также их использованием, обычно рассматривается как приемлемый.

Степень приемлемого риска лежит примерно между показателями естественной смертности (примерно один смертельный исход в год на миллион населения) и смертностью при заболеваниях (примерно тысяча смертельных исходов в год на миллион населения) и зависит также от осознаваемой степени выигрыша [5]. Риск, осознаваемый населением, может быть выше или ниже статистического расчетного уровня. Например, в самолете пассажир может чувствовать, что степень риска является более высокой, чем на самом деле. При обсуждении относительных преимуществ видов биотоплива следует оценить степень риска, связанного с введением новых систем, и сравнить его с существующими системами, которые предстоит заменить.

Таблица 62. Раскладка степени риска для отрасли ядерной электроэнергетики

Показатели	Потери чел.-дней на 100 ГДж произведенной энергии
<b>Несчастные случаи на производстве</b>	
приемка материалов и транспортировка	13
выработка электроэнергии и удаление отходов	1
Профессиональные заболевания	
приемка и транспортировка материалов	11
выработка электроэнергии и удаление отходов	2
Несчастные случаи в быту	0,3
Заболевания населения, не участвующего в этом производстве	4

Анархия в использовании биоэнергии. Биоэнергия имеет преимущество децентрализованного использования. Каждый может собирать сухие ветки, сбраживать сахар и отходы. Но даже при этом следует знать относительную степень риска как индивидуальную, так и общественную. Частные предприятия гораздо труднее поддаются контролю, чем государственные. Значительные опасения высказывались в связи со сжига-

нием древесины [6, 7], особенно в США, где эти процессы в значительной мере усилились и где, в противоположность Великобритании, такое сжигание проводится почти бесконтрольно. Как мы увидим позднее, мелко-масштабные процессы сжигания древесины связаны с серьезным загрязнением окружающей среды и угрозой для здоровья человека.

**Баланс диоксида углерода.** Глобальный риск, связанный со сжиганием всех ископаемых видов топлива (это не касается ядерного топлива), является результатом выброса в атмосферу диоксида углерода. Вопрос, насколько это обстоятельство представляет собой риск, — явился предметом широких дискуссий, так как "парниковый" эффект может даже оказаться положительным как для климата земного шара, так и для выхода продукции сельского и лесного хозяйства. Но с другой стороны, были также прогнозы таких грозных явлений, как расширение мировых пустынь и катастрофический подъем уровня моря. С точки зрения общепринятого анализа степени риска, число фактов недостаточно, и можно только рассуждать по поводу эффектов непрерывного сжигания ископаемых видов топлива. Только половина углерода, выброшенного в атмосферу в результате сжигания ископаемого топлива в течение этого столетия, может быть фактически обнаружена в атмосфере [8].

Ежегодное поглощение углерода в процессе фотосинтеза наземной биосферой и океанами составляет около 100 млрд. т., что значительно больше существующего выброса углерода в атмосферу (5 млрд. т в год).

Сведение лесов без возобновления растительного покрова ликвидирует возможность поглощения диоксида углерода, что приведет к обострению проблемы. Однако высокопродуктивное сельское хозяйство имеет потенциальные возможности поглощать, по крайней мере, столько же диоксида углерода, сколько леса (см. главу 2).

В определенных условиях рост растений может быть ограничен недостатком диоксида углерода. Таким образом, в мировом масштабе растительность может увеличить фиксацию углерода в результате повышения его концентрации в атмосфере. Однако измерить это небольшое увеличение выхода продуктов фотосинтеза будет затруднительным. И наоборот, по простым причинам кинетического характера концентрация  $\text{CO}_2$  в окружающем воздухе может увеличиться в результате интенсификации сельскохозяйственного производства, предполагающего более быструю смену растительного покрова. Некоторые авторы утверждают, что даже в районах, покрытых растительностью, идет чистое образование диоксида углерода [9], однако такого рода утверждения трудно подтвердить или отвергнуть до тех пор, пока нам не будет известна точная емкость поглощения  $\text{CO}_2$  океанами и наземной растительностью, которая дала бы возможность рассчитать полный углеродный баланс.

## 6.2. СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

**Потребность в площадях.** В этом разделе рассматриваются вопросы, связанные с безопасностью использования биоэнергии для людей и окружающей среды. Уровень безопасности является значительным, и этот фактор может перевесить все остальные возражения против использования этого вида топлива. В главе 2 было показано, что теплотворная способность материалов, получаемых человеком в сельском и лесном хозяйстве, равна примерно четверти общей энергии топлива, используемого человеком. Увеличение использования энергии биомассы потребует переворота в развитии сельского и лесного хозяйства. Для производства энергии потребуются больше земли, при этом возрастет конкуренция между производством энергии и производством продовольствия, волокон и т. д. Конечно, можно предположить условия, при которых потребление энергии на душу населения составит только незначительную долю того, что существует в настоящее время. Такие предметы роскоши, как путешествия, машины, экономящие труд, материалы и продукты, произведенные с использованием энергоемких методов, будут в сильной степени ограничены. Последствия такой революции здесь не рассматриваются. Маловероятно, что такой переворот будет принят добровольно.

Проблемы наличия земельных угодий рассматриваются в главе 2. Хотя приобретение необходимых площадей плодородных земель для оптимального производства биомассы на топливо может оказаться невозможным, правительство, вероятно, сможет выделить крупные площади для производства топлива. Каких можно ожидать последствий? Последствий много, и среди них такие, как изменения в обеспечении продовольствием, занятости, благоустройства, отдыха, истощение почвы, эрозия, состояние жилищного строительства и транспорта. Если предусмотреть использование для производства биотоплива только остатков сельского и лесного хозяйства, влияние указанных изменений на состояние общества значительно снизится, но при этом доля энергии биотоплива будет также значительно меньше.

**Занятость.** Кроме экономии иностранной валюты, биотопливо должно иметь преимущество в обеспечении занятости. Это подтверждается самой природой сельского хозяйства, являющегося часто трудоемким; в таблице 63 показан низкий выход энергии при производстве зерновых по сравнению с производством нефти и угля (последняя отрасль также является трудоемкой) [10, 11, 12].

Эффект значительно выше в развивающихся странах, где производительность труда обычно очень низкая. Однако даже в этих странах использование биотоплива не обязательно сопровождается увеличением занятости. Например, в Бразилии на плантациях сахарного тростника потребности в рабочей силе носят чисто сезонный характер, и рабочие, которые раньше при производстве продовольственных культур имели круглогодичную занятость, в настоящее время являются сезонными ра-

Таблица 63. Производительность труда в энергетике

Добыча и производство	Выход энергии, МДж/чел.-ч
Нефть, Северное море	150 000
Уголь, Великобритания	9000
Зерновые, Великобритания	3040
Кукуруза, тропики	23 - 48

бочими [13]. Местные рабочие могут не найти подходящую работу на плантациях по производству биомассы (как это было с уборкой сахарного тростника в Доминиканской республике); для этой цели могут быть наняты иностранные рабочие. Использование городских отходов и сельскохозяйственных остатков для производства биотоплива, особенно в странах третьего мира, может лишить многих людей (собирающих эти отходы) средств к существованию. В развитых странах для повышения национального благосостояния ищутся пути повышения производительности труда во всех отраслях, включая энергетику. Поощрение и внедрение технологий, характеризующихся низкой производительностью труда в развивающихся странах, вызовут снижение показателя национального продукта на душу населения.

**Продовольствие или топливо?** Использование потенциальных источников продовольствия в качестве сырья для производства топлива явилось предметом широкого обсуждения. Аргументы были как экономического, так и морального порядка, так как ценность биомассы как продовольствия обычно значительно выше, чем ее ценность как топлива. Однако субсидии, стимулирующие использование биомассы в качестве топлива, могут радикальным образом изменить положение. Использование излишков биомассы (сахар в Бразилии или кукуруза в США) для производства топлива явилось сначала, скорее, результатом нехватки достаточно выгодных рынков сбыта, чем стремлением создать новую отрасль. Поэтому было предложено увеличить получение биомассы (особенно в Бразилии) для производства спирта независимо от пищевой промышленности. Это, в свою очередь, вызвало обеспокоенность неблагоприятными социальными последствиями в Бразилии и привело к замене необходимых продовольственных культур топливными [14].

Конкуренция за использование мировых запасов биомассы между "богатыми", желающими использовать ее в качестве топлива, и "бедными", нуждающимися в ней как в средствах к существованию, создала в мире угрожающее положение [15]. В таблице 64 приводятся данные о площадях, необходимых для выращивания зерна на продовольственные нужды и для производства топлива (спирта) [13]. Если топливо, необходимое для производства зерна, также обеспечивается путем выращивания зерна, то для этого потребуются большие размеры площадей.

Таблица 64. Площади, необходимые для производства продовольствия и топлива

Показатели	Гектары
Полуголодный рацион	0,08
Обильный рацион	0,36
Европейский автомобиль (7000 миль в год при 25 милях на галлон)	1,32
Автомобиль США (10 000 миль в год при 15 милях на галлон)	3,12

Если все же цены на энергию увеличатся в ближайшие десятилетия, как это следует из прогнозов, ценность биомассы как топливного сырья также увеличится и покупательная способность развитых стран послужит гарантией того, что биомасса будет использоваться не как продовольствие, а как топливо. Несмотря на неправдоподобие этих аргументов, следует все-таки учитывать, что уже значительная доля продовольствия в форме сахара в Бразилии и кукурузы в США была использована в качестве топлива. По имеющимся данным, только треть всех бразильцев имеет нормальный рацион, а одному из потребителей американской кукурузы, СССР, было на время отказано в необходимых ему продовольствии и кормах. Другими странами, собирающимися проводить политику, ведущую к подобным результатам, являются Австрия (экспортирующая в Восточную Европу излишки пшеницы), Новая Зеландия, Австралия, Южная Африка, Таиланд и Филиппины. Затруднения, связанные с крупными излишками сельскохозяйственной продукции и региональными различиями в доходах и потреблении продуктов питания, будут, вероятно, в дальнейшем углубляться вследствие широкого использования потенциальных запасов продовольствия "богатыми" в качестве топлива. В Бразилии средний доход наиболее богатой части населения (1/5 общей численности) в 36 раз превышает средний доход беднейшей части, составляющей также 1/5 часть общего населения. Владельцы автомобилей могут использовать наиболее низко оплачиваемые слои населения для производства топлива. Бразилия — крупнейший импортер зерна в Западном полушарии, и ее площади могут с успехом использоваться для выращивания культур в целях прекращения утечки иностранной валюты.

**Почвенный статус.** Для "энергетических плантаций", при организации их в достаточно больших масштабах, будут использоваться бедные почвы, непригодные для сельского хозяйства. В дальнейшем в результате выращивания и уборки биомассы может произойти дальнейшее снижение плодородия и ухудшение структуры почвы. При существующей



технологии уборки значительная часть питательных веществ остается в почве в необработанных частях растения. При уборке всего растения, как этого требуют некоторые технологии производства биотоплива, почва будет терять органическое вещество, и для поддержания достаточно высоких урожаев потребуется внесение большего количества неорганических питательных веществ. С точки зрения отрицательных последствий, вызванных потерей питательных веществ, больше всего страдают тропические леса и меньше всего — хвойные леса умеренной зоны [14].

Другая проблема, связанная с выращиванием лесов для целей производства топлива, — уплотнение почвы колесами тяжелых машин, используемых для вывозки лесной биомассы. Уплотнение ведет к повышению стока, эрозии и ухудшению условий роста корней.

**Отдых и окружающая среда.** Последнее из социальных последствий, которое мы рассмотрим, — это проведение досуга и отдых. Особенно в Великобритании леса рассматриваются как место отдыха, а также как промышленный источник древесины. Лесное хозяйство Англии характеризуется монокультурой и преобладанием пород с мягкой древесиной. Забота о красоте лесных насаждений заставляет человека менять их истинный облик путем посадки полос из пород с твердой древесиной вдоль дорог. Однако эти породы скоро заглушаются более быстро растущими хвойными породами.

Изменение характера пользования при организации энергетических плантаций не может не изменить характера фауны. Одни считают такие изменения положительными, другие — отрицательными [16], но многие специалисты по вопросам окружающей среды предпочитают отсутствие изменений той революции, которую вызывает возделывание топливных культур.

Вследствие огромных потребностей в площадях для производства значительных количеств энергии проблема изменения внешнего вида ландшафта в равной мере коснется лесоводства, сельского хозяйства, а также предложенной по организации морских хозяйств. Морское побережье — это традиционное место отдыха населения Великобритании, и появление структур для закрепления водорослей, а также закрытие крупных водных пространств не может не вызвать отрицательной реакции. Деятельность, связанная с добычей ископаемых видов топлива, в значительной мере локализована с точки зрения ее влияния на население; производство же биоэнергии будет иметь значительные социальные последствия.

### 6.3. ЗАГРЯЗНЕНИЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ

**Стоки, выбросы и отходы.** Производство биотоплива предполагает обработку больших количеств органического вещества, что неизбежно вызовет образование больших количеств твердых, жидких и газообразных отходов. Вследствие сложности химического состава сырья и отно-

сительной простоты состава получаемого топлива не удивительно, что количество загрязняющих веществ на единицу произведенной энергии здесь больше, чем при производстве ископаемых видов топлива. Процессы должны сравниваться на основе эквивалентных количеств произведенной энергии, т. е. количества загрязняющих веществ на 1 ГДж. Значение этой проблемы оценивается недостаточно полно, так как биотопливо производится в масштабах, не сравнимых с производством ископаемых видов. Поэтому в литературе имеются противоречия. В одном источнике [3] утверждается, что биоэнергия вызывает очень мало проблем, связанных с охраной окружающей среды. Далее, в том же источнике говорится, что резкое расширение использования биоэнергии может иметь серьезные отрицательные последствия для окружающей среды вследствие плохого управления и недостаточного контроля. В настоящее время, естественно, производство биотоплива слишком незначительно для того, чтобы вызвать серьезные проблемы загрязнения.

Несмотря на то что некоторые биоэнергетические процессы представляют собой также методы удаления отходов, они неизбежно ведут к появлению других остатков, которые также должны быть удалены. Стоимость таких процессов часто представляет собой компромисс между стоимостью обработки и удалением отходов с использованием ряда методов — химических, физических и биологических. Стоки, получаемые в результате очистных процессов, также следует принимать во внимание для проведения обоснованного сравнения. Например, удаление осадка, получающегося в результате анаэробного брожения, очень дорогостоящее мероприятие. Поэтому при рассмотрении любого крупномасштабного предложения по производству биотоплива резонно будет задать вопрос, какое количество стоков и выбросов можно ожидать, какие меры потребуются для их удаления и каковы будут затраты.

Стоимость обработки сточных вод при производстве биотоплива, а также методы, используемые для этой цели, в значительной мере зависят от местоположения. Во внутренних районах, в местах скопления населения этот вид стоимости может представлять значительную долю общих расходов. В удаленных районах сбросы отходов (например, в море или в определенные места на суше) не вызывают такой отрицательной реакции. Каждый процесс производства биотоплива вызывает различные проблемы загрязнения; ниже приводятся некоторые комментарии по основным процессам.

**Сбраживание сточных вод.** Проблемы загрязнения, связанные с производством спирта, известны. Каждая тонна произведенного спирта может сопровождаться образованием до 15 т жидкости (в результате сбраживания и перегонки), имеющей высокую биологическую потребность в кислороде. Сброс этой жидкости в реки в Бразилии в ходе выполнения программы производства спирта имел серьезные последствия для окружающей среды [14]. Сброс отходов в реки вызвал гибель рыб и водорослей; такой сброс эквивалентен необработываемым отходам,

производимым в городе с населением 200 млн. жителей. Возможные методы обработки заключаются в сооружении отстойников, аэробных и анаэробных фильтров или сбросе в море. Однако эти методы не находят широкого использования в Бразилии, вероятно, вследствие их дороговизны. Проблема удаления сточных вод возникает в Великобритании при производстве виски; был проведен ряд исследований по изысканию дешевого метода удаления отходов первичной перегонки (остатков от сброженного сушла). Эти остатки дали положительный эффект при использовании их в качестве удобрения [17]. При организации сброса необходимо наличие хорошо дренируемых почв с высоким содержанием органического вещества; при этом надо следить, чтобы сбросы с высокой биологической потребностью в кислороде не попадали в реки. Проблема удаления стоков при производстве спирта из кукурузы решена путем их выпаривания с получением сухой барды (при наличии рынка для этого продукта).

**Отходы анаэробного брожения.** Анаэробное брожение представляет собой метод для обработки стоков и одновременно для производства метана. Преимущество этого метода состоит в снижении биологической потребности в кислороде жидкостей и твердых частиц. Однако только часть исходного углерода удаляется в виде метана и диоксида углерода (около 50–70%). Остальная часть содержится в осадке, который может использоваться в качестве удобрения на соответствующих почвах в соответствующее время года. Другой метод удаления — сжигание и организация свалок мусора. Жидкие загрязняющие вещества возникают в результате предварительной обработки твердых отходов для последующего сбраживания, а также в результате обезвоживания суспензий. Размеры этих проблем пока не ясны [18]. Однако риск переноса инфекции из материала, подлежащего сбраживанию (например, экскременты человека и животных), по имеющимся данным, уменьшается.

На тяжелых, заболоченных почвах удаление сброженного осадка представляет серьезную проблему, а стоимость транспортировки в места сброса может быть значительной. Повышенная концентрация тяжелых металлов в осадке может способствовать накоплению этих металлов в почве. Сжигать осадок дорого, а мусорные свалки нежелательны по санитарным соображениям. Горючие газы, образовавшиеся в результате брожения, могут содержать значительные количества серы, вызывающей коррозию устройств для сжигания, а диоксид серы, содержащийся в продуктах сгорания, загрязняет атмосферу. Производство метана и обработка жидких стоков создают часто противоречивую ситуацию, так как для максимального производства метана и получения стока с минимальным показателем биологической потребности в кислороде требуется различное время реакции. Таким образом, здесь необходимо компромиссное решение — в интересах охраны окружающей среды следует принять более низкий выход энергии.

**Сжигание и термическое обогащение.** Все методы, предполагающие сжигание биомассы, такие, как термическое обогащение, вызывают выброс в атмосферу частично окисленных и не сгоревших углеводородов, частиц, а также окислов азота и серы. Некоторые процессы дают жидкие стоки. Как жидкие стоки, так и выбросы в атмосферу, происходящие в результате сгорания и процессов термического обогащения, описаны в литературе [18]. На крупных заводах по производству топлива борьба с загрязнением имеет достаточную эффективность при соответствующих затратах. Однако при мелкомасштабном производстве борьба с загрязнением становится нереальной. Выгоды от сжигания древесины по обеим сторонам Атлантики являются хорошо известными, и эффективность переноса тепла и регулирование интенсивности сгорания явились предметом значительного внимания. Однако это регулирование осуществляется только путем изменения течения процесса сгорания. Эмиссионный фактор для окиси углерода, метана, альдегидов, бензола и полициклических углеводородов в расчете на 1 кг древесины выше при недостатке кислорода, чем при его избытке [19]. Выбросы при сжигании угля были, однако, на три порядка ниже, чем при сжигании древесины. Выброс мутагенных веществ в атмосферу при сжигании древесины в печах бывает выше, чем при сжигании угля, и всегда выше, чем при работе угольных и нефтяных промышленных бойлеров и печей [7]. Представляют проблему также твердые частицы, выбрасываемые в атмосферу; их выброс при сжигании древесины в северных городах США играет большую роль в нагревании окружающего пространства [6]. Однако можно отметить, что при сжигании древесины происходит меньший выброс серы по сравнению с углем (в отношении других форм биомасс положение может быть иным).

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Comar, C. L., Health effects of energy production and conversion, *Ann Rev Energy*, 1, 1976, 581–600.
- [2] Inhaber, H., Is solar power more dangerous than nuclear? *New Scientist*, 18 May 1978, 444–446.
- [3] *Energy from biological processes*, US Office of Technology Assessment, 1980.
- [4] Inhaber, H., Risk of energy production, Atomic Energy Control Board of Canada Report AECB 1119, March 1978.
- [5] Starr, C., Rudman, R., Whipple, C., Philosophical basis for risk analysis, *Ann Rev Energy*, 1, 1976, 629–662.
- [6] Lipfert, F. W., Dungan, J. L., Residual firewood use in the United States, *Science*, 219, 1983, 1425–1427.
- [7] Allaby, M., Lovelock, J., Wood stoves: the trendy pollutant, *New Scientist*, 13 Nov. 1980, 420–422.
- [8] Rotty, R. M., Energy supply/demand and global atmospheric carbon dioxide, p. 548, in Proceedings of Symposium 'Bio-energy 80', April 21–24 1980, Atlanta, Georgia.
- [9] Hinckley, A. D., Deforestation and CO<sub>2</sub>, in [8].
- [10] Leach, G., Energy and food production, International Institute for Environment and Development, 1975.

- [11] *Annual Abstract of Statistics 1982*, HMSO, London.  
 [12] *Annual Report and Accounts 1982*, BP Co. plc.  
 [13] Poole, A., Social/economic impacts in developing countries, pp. 529–530, in [6].  
 [14] Bazin, M., Brazil: running on alcohol, *Nature*, 282, 1979, 550–551.  
 [15] Brown, L., Food or fuel: new competition for the world's cropland, *Worldwatch* paper no. 35, 1980.  
 [16] Van Hook, R. I., Johnson, D. W., West, D. C., Mann, L. K., Environmental effects of harvesting forests for energy, pp. 537–541, in [6].  
 [17] Bucknall, S. A., McKelvie, A. D., Naylor, R. E. L., The effects of application of distillery pot ale to hill vegetation and lowland crops, *Ann Appl Biol*, 93, 1979, 67–75.  
 [18] Shannon, L. J., Anath, K. P., Waste to energy systems: their nature and environmental impact, Chapter 7 in *Energy and the Environment Interactions*, Vol. 1, Ed. L. Theodore and A. J. Buonicore, CRC Press, 1980.  
 [19] Ramdahl, T., Alfheim, I., Rustad, S., Olsen, T., Chemical and biological characterization of emissions from small residential stoves burning wood and charcoal, *Chemosphere*, 11, 1982, 601–611.

# 7

## ГЛАВА

### РЫНКИ БИОТОПЛИВА

#### 7.1. КАКОВА ЦЕНА БИОТОПЛИВА?

**Дорогостоящий выбор.** В главе 4 была показана дороговизна большинства видов биотоплива. Этот факт обычно признается даже сторонниками биоэнергии; она объясняет также, почему использование биотоплива в масштабах, сравнимых с масштабами использования традиционных видов в развитых странах, до сих пор не получило распространения. Там, где биотопливо все же используется, существуют особые условия. Например, правительство может субсидировать производство биотоплива (газохол в США и Бразилии) или обложить высокими налогами использование ископаемых видов топлива. И наоборот, биологическое сырье для производства биотоплива может представлять собой дешевые остатки, например, в деревообрабатывающей промышленности; оно может являться загрязняющими отходами; наконец, оно может быть результатом простого сбора материала на местности. Биотопливо может являться побочным продуктом дорогостоящих процессов переработки отходов. Эти специальные случаи не представляют собой важного потенциального источника производства энергии, сравнимого с источниками ископаемых видов топлива. Количество энергии, обеспечиваемое за счет биомассы (в основном древесные отходы), составляет в США около 3,5% общего потребления энергии [1]. США особенно хорошо обеспечены лесами и ресурсами древесины, и эта цифра может оказаться недостижимой для других развитых стран.

Промышленные товары часто не имеют единой рыночной стоимости. В различных областях применения существуют различные цены, например бензин для зажигалок стоит намного больше в расчете на 1 т, чем тот же продукт, используемый для обогрева или на транспорте. Биотопливо может иметь дорогостоящее использование, как, например, уголь для мангалов и грилей, древесина для костров, а также более обычное использование, такое, как заменитель традиционных видов топлива. Этот продукт иногда оценивается не по его калорийности, а с эстетической точки зрения, а также с точки зрения других факторов. Однако в этих случаях потребности в биотопливе удовлетворяются относительно легко и являются незначительными по сравнению с национальной

или мировой потребностью в энергии. Проблема заключается в том, чтобы иметь возможность прогнозировать будущие потребности в типе топлива, которое в настоящее время является дорогостоящим по сравнению с традиционными видами топлива, а также по сравнению с теми, которые находятся в стадии разработки (например, ядерная энергия). Со временем эти виды топлива могут стать значительно дешевле, чем ископаемое топливо, от которого в настоящее время зависит человечество.

**Дорогостоящие виды топлива и будущее.** Внимание, уделяемое возобновляемым видам энергии, отчасти является реакцией на повышение цен на нефть 1973–1974 и 1978 гг. Ископаемое топливо (уголь) сначала вытеснило возобновляемые виды топлива в развитых странах с помощью двойственного воздействия более благоприятных цен и эволюции необходимых технологий использования. Однако существует мнение, что вследствие роста цен на топливо новые отрасли биологической промышленности, такие, как биотехнология, генная инженерия, микробиология и т. д., повернут процесс в обратном направлении и восстановят в правах некоторые старые виды энергии. Тем не менее эти технологии все еще более дорогие, чем существующие стандартные технологии. Первый вопрос, на который надо получить ответ: являются ли исторические процессы обратимыми? Можно ли легко изменить многовековую тенденцию к использованию более дешевых видов энергии? Традиционно с повышением цен спрос на продукт падает при различной степени "эластичности" отношения. Спрос на нефть характеризовался относительно низкой эластичностью до тех пор, пока энергетический кризис не дал примерно 15 %-ное падение потребления продукта при росте цен на него [2]. Существует мнение, что это падение связано в основном с факторами цен и сохранения энергии (64 %), а также условиями последовавшего спада (36 %). Создаются ли для биоэнергии благоприятные условия в результате роста цен на остальные виды энергии, или же спрос на нее упадет вместе с падением спроса на все дорогие виды энергии? Как ни странно, но этот вопрос никак не обсуждался, и отдельные специалисты, пытавшиеся поднять этот вопрос [3], были обвинены в том, что они вносят разногласия в общие суждения [4] и питают особый интерес к невозобновляемым видам энергии.

**Развивающиеся страны.** Для осуществления созидательной деятельности общества или развития биологических организмов необходим их рост. Страна со снижающимися потребностями в энергии в меньшей степени нуждается в разработке новых видов энергии, тогда как растущая экономика при повышении потребностей в энергии будет изыскивать пути получения новых и дешевых видов топлива. Несомненно, что наиболее благоприятные условия для своего использования биоэнергия имеет в условиях именно такой экономики, когда биоэнергия является более дешевой, чем существующие альтернативы. Эти условия не удовлетворяются в развитых странах, но существуют в некоторых развиваю-

щихся странах. В этих странах может происходить быстрый рост населения и валового национального продукта на душу населения. В стране могут отсутствовать запасы угля и нефти, но земельные ресурсы (по крайней мере, в некоторых странах) могут быть значительными. Труд может оплачиваться иначе, чем в развитых странах, а рабочие могут быть привязаны к земле путями, которые в других местах неприемлемы. Таким образом, в некоторых обществах может представиться возможность замещения капитала и импортируемого сырья для производства биотоплива трудом. Это обычно сводится к одному из вариантов. Время покажет, насколько будут благоприятными долгосрочные эффекты с точки зрения национального процветания или социальных последствий. Так как использование тяжелой энергии является симптомом процветания, а не нищеты, использование нищеты для создания дешевого топлива будет печальной главой в истории развития энергетики.

Даже в развивающихся странах производство биотоплива нуждается в наличии особой дешевой формы биомассы, а также субсидий и искусственных препятствий на пути использования традиционных форм ископаемых продуктов. Реальности, лежащие в основе издержек производства биотоплива и субсидирования цен, пожалуй, лучше всего отражены в международных рыночных ценах на продовольствие, топливо и т. д., а также затратах человеческого труда при производстве различных продуктов. С этой точки зрения спирт, полученный из сахарного тростника, является дорогим как в плане международных цен на автомобильный бензин, который он заменяет, так и в плане затрат человеческого труда. Если спирт рассматривать как топливо, то он влечет за собой все проблемы, возникающие, например, в связи с добычей нефти в Северном море, которая имеет высокие издержки производства. Оба продукта могут страдать от недостаточного спроса в периоды спада, и обоим грозит снижение производства при падении мировых цен на нефть в случае насыщения рынка.

**Альтернативное использование биомасс и их производных.** Некоторые специалисты выражали надежду, что исследования приведут к получению более дешевых биомасс и разработке дешевых процессов их переработки в биотопливо. В обсуждениях этих вопросов приняло участие большое число специалистов, непосредственно заинтересованных в решении этой проблемы. Перспективы исследований по снижению издержек производства биомассы и цен на нее до приемлемых уровней описываются в следующей главе. Однако полезно рассмотреть вопрос, что случится, если биомасса и биотопливо значительно подешевеют. В противоположность урановой руде и низкосортному углю, представляющие очень небольшую ценность для человека до тех пор, пока они не превращены в электричество или пар, биомасса и ее производные находят очень разнообразное и ценное применение. Примером могут служить зерновые и сахар, дающие продовольствие, корма, химические средства и крепкие спиртные напитки. Процесс превращения раститель-

ных сахаров в спиртные напитки, по сути, аналогичен процессу промышленного получения растворителей или топлива для двигателей внутреннего сгорания. Стоимость полученного этанола варьирует в зависимости от характера использования. В таблице 65 показана стоимость сахара как продукта питания, питьевого спирта, спирта как растворителя и заменителя автомобильного бензина. Что произойдет, если в результате исследований удастся снизить цену спирта? Ответ, по сути, тот же, что и в случае снижения цен на продукт в результате местных субсидий. Продукт является дорогостоящим, пока не будут введены в действие соответствующие законодательные положения. В Бразилии пили проалкоголь до тех пор, пока спирт не стали денатурировать. В США налоговые льготы даются только тогда, когда спирт денатурируется нефтью в газохоле.

Таблица 65. Стоимость сахара при различном использовании продуктов его перегонки

Продукты перегонки	Долл/т
Питьевой спирт	550–1000
Промышленный спирт	500–770
Моторный спирт	240–330
Сахар как продукт питания (контрактная цена) 2 т = 1 т спирта	Около 1400

Аналогичные варианты представлены продуктами: растительными маслами, употребляемыми в пищу; зерновыми и зернобобовыми, используемыми на корм животным; древесиной, используемой для производства бумаги и как строительный материал.

Субсидии на производство спирта могут означать, что альтернативные, более дешевые варианты производства спирта будут поставлены в невыгодное положение. Такой эффект уже имел место в Европе, когда действовавшие субсидии на производство этанола поставили под угрозу производство синтетического спирта и лишили его рынков сбыта [5]. Другим, нарушающим равновесие эффектом газохолы является имеющее место субсидирование побочного продукта, такого, как сухая барда, используемого в качестве белковой кормовой добавки. Резкое увеличение переработки зерна на спирт в США привело к опасениям относительно избыточного поступления на рынок сухой барды, а также относительно того, что ЕЭС может закрыть двери продукту, составляющему конкуренцию их собственному небелковому зерну [6]. В настоящее время зерновые, а не белковые корма подвергаются тарифным ограничениям в Европе. Пример производства спирта — это только один из

многих вопросов, которые могут возникнуть, если биомасса и биотопливо резко подешевеют. Проблема избыточного предложения сахара, молочных продуктов и вина в Европе является сигналом трудностей, которые могут возникнуть. Результатами возможных научных открытий может воспользоваться "третий мир", однако в его распоряжении уже находится дешевое продовольствие с возможностями использования известной технологии и традиционных видов топлива. Высокие урожаи, интенсивное сельское хозяйство и современная технология во многих случаях приводили к производству более дешевых продуктов в условиях менее благоприятного климата (для культур) в развитых странах, чем те, которые можно получить в благоприятных условиях в странах третьего мира. Примером может служить свекольный сахар, производство которого дешевле в условиях механизированного сельского хозяйства, чем производство тростникового сахара в условиях экстенсивного сельского хозяйства.

## 7.2. КОНКУРЕНЦИЯ С НЕФТЬЮ, УГЛЕМ И ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИЕЙ

**Рост или сокращение?** В главе 1 уже говорилось о том, что в настоящее время в мире преобладают виды энергии, получаемой за счет нефти, угля и газа. Возобновляемые виды энергии всех типов должны конкурировать с крупными промышленными отраслями, представленными этими видами топлива. Они должны также конкурировать с относительно новым видом энергии — ядерной энергией. Потребление ядерной энергии увеличилось за десять лет (с 1971 по 1981 г.) почти в 8 раз (рис. 16) и к концу столетия, по прогнозам, должно увеличиться еще в 4 раза до 28 млрд. ГДж в год [7]. Возобновляемые виды энергии в большинстве случаев не новые, многие из них были ранее вытеснены видами топлива, используемыми в настоящее время. Могут ли они теперь конкурировать с остающимися резервами ископаемых видов топлива и с резервами расщепляющихся материалов, которые могут быть использованы в будущем для выработки ядерной энергии? Каковы в перспективе потенциальные возможности возобновляемых видов топлива по отношению к ядерным и термоядерным реакциям? Если термоядерная реакция будет осуществлена технически, мы получим возможность почти неограниченной выработки энергии. Ответы зависят частично от состояния мировой экономики, населения и т. д. в будущем.

Уменьшение мирового населения, уменьшение его благосостояния вызовут уменьшение потребностей в энергии, а также возможность или восполнения запасов ископаемых видов топлива, или приспособления к более низким нормам потребления, определяемым возобновляемыми видами топлива. Рост населения, повышение благосостояния, усложнение человеческих отношений вызовут необходимость развития основных новых источников энергии, которые должны быть дешевыми, не вызы-

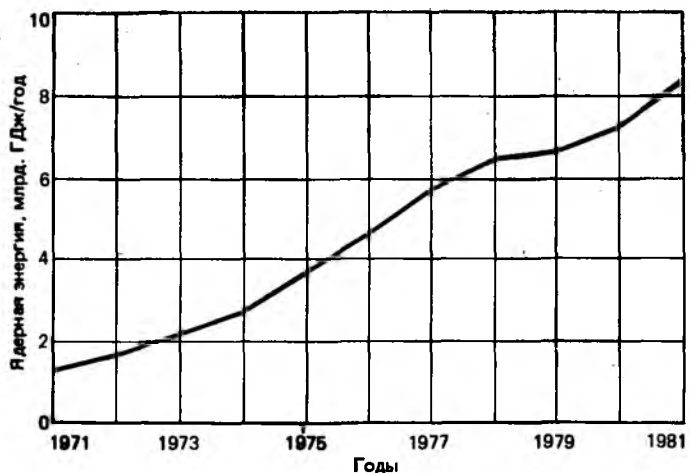


Рис. 16. Мировое потребление ядерной энергии.

вать загрязнение окружающей среды и быть приспособленными для использования в различных географических условиях, но не должны зависеть от армий плохо оплачиваемых, неквалифицированных рабочих. Ниже мы рассмотрим второй вариант, так как он больше согласуется с историей развития энергии, а также потому, что первый вариант вызывает больше проблем, чем решает. Динамическое равновесие, связанное со стихийным, быстрым ростом, является, возможно, более стабильным, чем искусственно созданный застой, который будет рассматриваться как несправедливость теми, кто не успел насладиться плодами индустриализации.

**Размеры запасов энергетических ресурсов.** Конкуренция между возобновляемыми и другими видами энергии определяется прежде всего разведенными запасами ресурсов. Глобальные энергетические ресурсы показаны в таблице 66 [8]. Цифры по ископаемым видам топлива даются для дешевого, легко добываемого сырья. При включении более дорогих ресурсов, т. е. 50 долл/т угля и 25 долл/т нефти и газа запасы примерно утраиваются с 32 до 93 тыс. млрд. ГДж только для ископаемых видов топлива. Топливо для обычного ядерного реактора добавляет к общей сумме еще 9450 млрд. ГДж. Реакторы-размножители, находящиеся в стадии разработки, добавляют к общей сумме в тысячу раз больше топлива. Термоядерный синтез, если он когда-нибудь станет технически возможным, снова в громадных размерах увеличит общий объем ресурсов. В главе 2 указывалось, что общий объем биомассы, промышленно собираемый человеком, составляет около 70 млрд. ГДж в год. Если предположить, что десятая часть этого объема, т. е. 7 млрд. ГДж в год, могли бы быть использованы в качестве топлива в

Таблица 66. Мировые запасы энергии и текущее потребление в 1981 г.

Источник энергии	Запасы, млрд. ГДж	Потребление, млрд. ГДж в год
Уголь	17 640 (0,86 долл/ГДж)	90
Нефть	8316 (0,41 долл/ГДж)	131
Газ	8411 (0,41 долл/ГДж)	60
Ядерный реактор	9450	8
Реактор-размножитель	9 450 000	—
Биомасса	(7 в год, см. текст)	*

\* Точных данных не имеется.

течение нескольких десятилетий, то такое предположение было бы в высшей степени оптимистичным. Хотя энергия биомассы, накопленная с течением времени, в принципе, выше, чем все другие виды энергии (так как она может возобновляться каждый год, даже при низких урожаях и отсутствии ископаемых видов топлива), нормы ее использования являются очень низкими и не могут составить серьезную конкуренцию другим видам энергии, по крайней мере, в ближайшие годы.

**Цены на нефть.** Резкий рост цен на сырую нефть в 70-е годы явился частично причиной внимания к развитию биоэнергетической промышленности и надежд, что биотопливо сможет конкурировать с ископаемыми видами топлива. Последующие события явились менее благоприятными для будущего биоэнергии, так как цены на нефть упали, а конкуренция между биомассой и углем складывается обычно неблагоприятно для биомассы. Однако энергетические кризисы имели место не столько вследствие обеспокоенности по поводу топлива вообще, а вследствие временного дефицита жидких видов топлива, необходимого развитым странам для использования на транспорте. Жидкие виды топлива могут быть получены из биомассы с использованием ограниченного числа процессов, включая ферментацию и термическое обогащение. Последний тип процесса может также применяться для экстрагирования жидкого топлива из угля, нефтяных сланцев и битуминозного песчаника. В этом случае сырье является очень дешевым. В результате получение синтетического топлива из этих источников в будущем более вероятно, чем получение биоэнергии. Синтетический автомобильный бензин получают из угля в специальных условиях, существующих в Южной Африке. Однако, к сожалению, производство синтетического топлива из угля и сланцев в Европе и США за последнее время ослабло вследствие падения цен на сырую нефть и из-за больших издержек по переработке сырья. Можно также ожидать соответствующее ослабление интереса и к возобновляемым видам топлива.

**Размеры и число установок по производству синтетического топлива.** Одно из преимуществ нефти, газа, угля, низкосортных горючих сланцев и битуминозного песчаника то, что эти источники энергии сконцентрированы в одном месте. В результате возможна постройка крупных перерабатывающих заводов. Нефть часто перерабатывают на заводах мощностью 10 млн. т в год и более. Аналогично этому заводы по производству синтетического топлива, использующие горючие сланцы и битуминозный песчаник, будут тоже очень крупными. Проекты биотопливных заводов предусматривают размеры на 2—3 порядка меньше, так как в этом случае ограничивающим фактором служит необходимость сбора биомассы с очень большой площади. Любое преимущество в размерах биотопливного завода аннулируется увеличением стоимости перевозок. Таким образом, для производства объема топлива, сравнимого с объемом ископаемого топлива, производимого обычным заводом, потребуется большое число мелких биотопливных заводов. Поэтому при наличии более концентрированных источников энергии биомасса будет всегда в невыгодном положении. Как мы уже отмечали, урановая руда по плотности энергии превышает все остальные источники. Уголь и нефть менее энергоемки, но более ценны в этом отношении, чем биомасса и другие источники возобновляемой энергии (см. главу 1, раздел 1.2).

**Биомасса и уголь.** Наиболее реальным конкурентом биомассы и ископаемых видов топлива является уголь. Как уголь, так и биомасса — твердые вещества, содержащие углерод, но здесь их сходство кончается. Биомасса более влажная, более окислена, имеет более низкую теплопроводную способность и плотность, чем уголь, используемый в настоящее время. Уголь обычно дешевле и легче транспортируется к месту его использования, за исключением только очень отдаленных районов. В ближайшие несколько десятилетий прогнозируется увеличение потребления угля вследствие уменьшения потребления нефти. Многие процессы, предложенные для обогащения биомассы, такие, как сжигание, пиролиз, газификация и т. д., в равной мере применимы к углю. Запасы угля все еще большие (по отношению к годовому потреблению энергии), поэтому в течение, по крайней мере, ближайших ста лет (при отсутствии других разработок в области топлива) уголь останется очень сильным конкурентом биомассы.

**Загрязнение.** Загрязнение окружающей среды — это другая область, где традиционные и ядерные виды топлива часто предпочтительнее биотоплива. В случае традиционных видов топлива, поскольку добыча его сконцентрирована в одном месте, удаление стока на единицу произведенного топлива является значительно более практичным. Электрофильтры, установки для обработки стоков и другое оборудование несовместимы с мелкомасштабным производством, даже несмотря на то что мелкомасштабность считается достоинством биоэнергии. Загрязнение можно рассматривать, исходя из единицы произведенного топлива и из возможности регулирования выбросов и стоков. Ядерная энергия в этом отноше-

нии котируется высоко и уже может считаться наиболее экологически "чистой" из всех видов энергий, которыми пользуется человечество. Дымный огонь от сжигания дров можно считать как временное самодеятельное отклонение от тенденции к очищению воздуха. В перспективе использование электричества для индивидуального транспорта уменьшает остроту проблемы выхлопных газов, от которой не свободно даже спиртовое топливо. Правда, одна технология, а именно анаэробное брожение, способствует уменьшению выброса загрязняющих среду углеродистых материалов, и ценность этой технологии выше, чем просто как метода производства топлива.

**Исследования.** Много надежд возлагается на исследования, направленные на снижение затрат и решение проблем, связанных с биоэнергией, и, конечно, никто не может предсказать результаты исследований и изменения, которые они могут вызвать. Много исследований проводится также и в других областях энергии. Были предложены новые формы энергии и новые методы производства традиционных видов топлива. Какие направления окажутся наиболее полезными — сказать трудно. Мы не имеем в своем распоряжении разработанных методов проведения таких оценок, но можно утверждать, что потенциальное преимущество (эффект) биоэнергии является более ограниченным, чем потенциальный эффект ядерного деления или синтеза. Жидкие виды топлива представляют собой только углерод в восстановленной форме, и при достаточном количестве дешевой энергии диоксид углерода может быть восстановлен до углеводов. Наличие в мире окисленного углерода в форме известняка обеспечивает почти неиссякаемый резерв в добавление к потенциальным запасам топлива. Как мы увидим в следующей главе, значительная часть современных исследований по биоэнергии направлена на изучение второстепенных компонентов стоимости производства топлива. Требование исследований поставить использование биоэнергии на промышленную основу является революционным и в значительной мере теоретическим по сравнению с требованиями использовать более трудные источники углеводов, а также низкосортные виды ископаемого топлива, которые уже имеются "в наличии", но ожидают разработки экономичных процессов получения.

### 7.3. РАЗВИВАЮЩИЕСЯ СТРАНЫ

**Неравенство в обеспечении ресурсами.** Относительная нищета, в которой находится значительная часть человечества, и его неспособность обеспечить свои самые основные потребности являются причиной законного беспокойства. Одной из таких потребностей является потребность в топливе для приготовления пищи и обогрева. В Индии существуют громадные трудности, связанные со сбором дров для обеспечения ежедневных потребностей; так, в некоторых местах сбор достаточного количества биомассы занимает до семи часов в день [9]. Однако проблема

состоит не в истощении мировых ресурсов энергии, а в громадном неравенстве между нациями и внутри наций и нищете среди изобилия. Развивающиеся страны также стремятся выявить достаточные источники энергии для осуществления индустриализации, повышения эффективности сельского хозяйства, а также для использования энергии в массе других областей, связанных со здравоохранением и процветанием общества. Однако существующие национальные потребности в энергии в таких странах очень малы по сравнению с потреблением энергии в развитых странах.

**Развивающиеся страны — особый случай?** Проблемы, связанные с использованием биотоплива в развитых странах, по крайней мере, осознаются многими из сторонников биоэнергии. Ограниченные площади, дефицит сельскохозяйственной продукции, а также дешевая энергия ископаемого топлива препятствуют стихийному распространению биоэнергии во всех странах (за исключением нескольких). Исследователи обратили внимание на менее развитые страны, где имеется свободная земля и излишки биомассы и которые не могут позволить себе импорт топлива. В литературе отмечалось странное положение развитых стран, экспортирующих свои проблемы истощения энергии в страны, использующие очень мало энергии, но имеющие неисследованные природные запасы традиционных источников энергии [10]. Поток советов и предложений развивающимся странам [11] относительно того, как решать проблемы их развития с использованием энергии биомассы, описывался в литературе как процесс, основанный на устаревшей философии и упрощенных логических положениях [12]. Тем не менее при решении проблем, связанных с использованием биотоплива в развивающихся странах, почти во всех случаях необходимо проведение детальных местных обследований и полевых испытаний, так как переменные таких процессов являются высокоспецифичными.

**Ресурсы, не вовлеченные в хозяйственный оборот.** Проблемы развивающихся стран очень сложны и, помимо энергии, включают много дефицитных статей. Тот факт, что энергия — главный фактор развития, сомнению не подлежит, но, как и во многих развитых странах, эта энергия может вырабатываться или разведываться в местных масштабах. Если энергия обнаруживается в нужном месте, ее стоимость может быть значительно ниже мирового уровня. В литературе отмечался относительный недостаток внимания, уделяемого разведке нефти и других традиционных видов энергетического сырья в развивающихся странах [10]. В 1976 г. около 46 % нефтяных изыскательских работ было проведено в развивающихся странах, не производящих нефть; в этих странах сосредоточено свыше 70 % мировых нефтеносных площадей. Ситуация, однако, меняется частично вследствие укрепления позиции стран, производящих нефть, после кризиса. Потенциальные запасы нефти неразрабатываемых месторождений развивающихся стран также больше, чем уровень их потребления. Запасы нефти в этих странах составляют

60 млн. баррелей, а суточная потребность в ней в 1985 г. составляла около 4 млн. баррелей. Запасы газа, угля и гидроэнергии также могут ждать своего использования, так как всеми традиционными источниками энергии в развивающихся странах пренебрегали в эру дешевой нефти. Денежные средства и технология для этих изысканий должны прийти в основном из развитых стран, и есть свидетельства того, что они активизируют свои усилия в этом направлении.

**Трудности диспропорции?** Так как потребности в энергии в менее развитых странах должны расти относительно более быстрыми темпами, чем в развитых странах, воздействие повышения цен на нефть, на экономику менее развитых стран должно быть более серьезным. Поэтому считалось, что такие страны должны иметь дополнительный стимул к развитию возобновляемых видов энергии. Однако эти выводы не подтверждаются фактами. Во-первых, импорт традиционных видов энергии менее развитыми странами уменьшается вследствие увеличения производства энергии внутри стран. Доля импорта нефти в совокупном потреблении нефти наименее развитых стран — импортеров нефти должна была, по прогнозам, упасть с 72 % в 1975 г. до 60 % в 1985 г. [10]. Во-вторых, с повышением цен на нефть повысилась стоимость других товаров. Некоторые страны с твердой валютой, имеющие круг экспортных товаров, фактически испытали абсолютное падение цен на нефть после первого энергетического кризиса. Там, где экономика базируется на производстве одной культуры или продукта, подвергающегося значительным колебаниям спроса и предложения, влияние повышения цен на нефть может стать более серьезным и доля расходов на закупку энергоносителей в общей сумме расходов иностранной валюты может увеличиться. Однако это не обязательно должно вызвать катастрофические последствия, так как многие страны ЭЭС тратят на нефть 25 % и более иностранной валюты.

**Расход или экономия иностранной валюты?** Возникает любопытное противоречие, когда одна страна предлагает переработать определенную культуру в низкосортное топливо, а другая страна предлагает переработать ту же культуру в относительно высококалорийный корм на экспорт. Хорошим примером может служить предложение Бразилии по переработке маниока в спирт и доходные европейские рынки для тайландского маниока. Последнее означает облегчение проблем платежного баланса и развитие промышленности страны, а первое — может вызвать дальнейшее обнищание сельского населения. Для менее развитых стран более приемлем поиск выгодных внешних рынков сбыта для культур или продуктов, чем переработка этих культур и продуктов в низкосортное топливо внутри страны.

**Политическая независимость.** Как в развитых, так и в развивающихся странах аргументом в пользу возобновляемых видов энергии часто является политическая независимость. Этот аргумент важнее в отношении импорта, чем в отношении экспорта. Страна не должна нуждаться



в закупках энергоносителей за рубежом. Менее важным является открытие неограниченных и выгодных рынков для продукции этой страны. Добиться независимости в обеспечении энергией — это цель, не вызывающая сомнений; однако в Великобритании независимость в обеспечении энергией не привела к какому-либо заметному улучшению в развитии страны. В некоторых случаях зависимость менее развитых стран от возобновляемых видов энергии означает увеличение их зависимости от развитых стран в отношении технологии (например, эффективные перегонные установки), а также финансирования капиталоемких процессов. В результате — унижительная зависимость от развитых стран вместо свободной торговли между равными партнерами.

Последнее замечание касается недостаточно доказанной рентабельности возобновляемой энергии. Даже в развитых странах были запрошены крупные суммы денег для разработки и "демонстрации" биоэнергии. С точки зрения коммерческой, результаты по большинству форм биоэнергии, в лучшем случае, неубедительные. Было бы несправедливо перекладывать бремя разработки форм возобновляемой энергии на менее развитые страны. Мы уже говорили о необходимости проведения местных исследований по биотопливу, перед тем как приступить к анализу его эффективности. Если удастся показать жизнеспособность видов биотоплива в различных условиях, тогда развивающимся странам может быть оказана помощь в организации его производства и эксплуатации [13]. Еще более необходима помощь в проведении изысканий и разработках традиционных источников топлива.

#### 7.4. ЧТО ПРОИЗОЙДЕТ, КОГДА ИСТОЧНИКИ ИСКОПАЕМОГО ТОПЛИВА ИССЯКНУТ?

Биоэнергия — основной ресурс? Столкнувшись со всеми трудностями, связанными с внедрением биоэнергии, обычной реакцией является утверждение, что рано или поздно биоэнергия должна быть внедрена, так как запасы всех видов топлива должны в итоге иссякнуть. Биоэнергия и другие формы возобновляемой энергии должны обеспечивать постоянные поступления энергии. Строго говоря, это тоже не является абсолютно верным, так как солнечный свет тоже должен когда-нибудь исчезнуть. Овладение технологией синтеза более легких элементов обеспечит выработку топлива, которое практически будет неистощимым, как солнечный свет, и обеспечит намного более высокие поступления энергии. Таким образом, вопрос следует поставить по-другому. Мы приближаемся к концу фазы мирового развития, где в качестве топлива используются нефть и газ; как и когда мы осуществим переход к более дешевым и обильным видам топлива? Этими видами топлива будут, очевидно, ядерное топливо, уголь или возобновляемые виды, или же их смесь.

Существуют две точки зрения относительно того, что случится, если нефтяные ресурсы будут исчерпаны. Один вариант — это очереди на заправочных станциях, нормирование, черные рынки, постепенная остановка транспорта. Другой вариант — скачок цен вследствие превышения спроса над предложением. Возможному снижению спроса обычно не придается большого значения, даже несмотря на то что повышение цен на нефть, возможно, сыграло свою роль в процессе мирового спада. Невозможность платить за энергию является лучшим стимулом ее экономного использования. Однако в итоге мы не сможем платить даже за то, что считаем существенным. Увеличение зависимости от наличия избыточной и дешевой энергии формировалось незаметно в течение столетий. Постепенно эти формы вытеснили менее обильные и более дорогие формы биологической возобновляемой энергии. Повышение производительности во всех обществах во всех материальных аспектах означает ускоренное формирование энтропии и ускоренную денатурацию видов топлива, характеризующихся высокой энергетической плотностью с образованием низкокалорийного нагрева. Сами законы термодинамики не дают нам возможности обходиться без этих расходов топлива, хотя мы стараемся достичь прогнозируемого уровня, опираясь на законы теоретически минимально необходимого уровня. Если человечество собирается продолжать свою деятельность, оно должно иметь избыточные количества дешевого топлива. Трудно видеть будущее дорогостоящих возобновляемых видов топлива, даже в конкуренции с другими дорожающими видами, за исключением только условий кризиса или увеличивающегося хаоса. В небольшом масштабе возобновляемые виды топлива могут эксплуатироваться энтузиастами-любителями, как это часто имело место во время последней войны. В больших масштабах дорогостоящая энергия, не затронутая инфляцией, использование нефтедолларов и обещание разработки дешевых форм энергии могут только отбросить развитые страны назад, к ранним стадиям развития. Такие тенденции будут, скорее всего, катастрофическими.

Эти вопросы были рассмотрены после первого нефтяного кризиса [14], и прогнозы, сформулированные в то время, по-видимому, остаются в силе.

По мере роста цен на нефть и газ будет происходить естественная адаптация без вмешательства правительства. Сначала будет наблюдаться возврат к углю. Затем в итоге, по мере истощения запасов угля, появится тенденция к экономии всех видов топлива. Экономический застой будет способствовать экономии топлива. Станет экономически выгодно разрабатывать запасы ископаемых видов топлива, производство которых раньше было неэффективным, и эти запасы будут использоваться более полно. Станет экономичным заниматься исследованиями районов земного шара с суровым климатом. Появится стимул к разработке новых источников энергии, как ископаемых, так и неископаемых. Дол-

госрочная проблема состоит не в истощении источников энергии, а в разработке новых, крупномасштабных энергетических технологий.

**Потребность в жидких видах топлива.** В некоторых прогнозах роль биоэнергии сузилась до обеспечения производства жидких видов топлива. Наша приверженность к независимому и быстрому виду транспорта усилила беспокойство относительно невозможности пользования таким транспортом вследствие отсутствия подходящего топлива. Следует отметить, что некоторые предложения по использованию биоэнергии не включают использование жидких видов топлива, например прямое сгорание, газификация, анаэробное брожение; они больше подходят для выработки пара или электричества. Другие виды топлива могут использоваться в двигателях внутреннего сгорания в качестве добавок к традиционным видам топлива (газохол) путем модификации двигателя (водный спирт) или путем химической модификации топлива (эфир растительных масел). Однако углерод во всех его формах может быть превращен в жидкости с высокой теплотворной способностью, и превращение биомассы в жидкие виды топлива может конкурировать с превращением тяжелых масел, угля и природного газа в аналогичные виды или даже в топливо для карбюраторных двигателей. В настоящее время такие ископаемые материалы сжигаются в основном для получения тепла. При достаточно сильном повышении цен на автомобильный бензин, полученный путем простой перегонки нефти, можно использовать расщепление более дешевых, тяжелых нефтяных фракций со снижением более стабильных форм углерода. Биомасса представляет, однако, дорогую форму углерода, а сырая биомасса к тому же играет важную роль для человечества. Напротив, уголь, тяжелые горючие сланцы, битуминозные пески находят незначительное применение, кроме как источники топлива или химические материалы.

**Транспорт без жидких видов топлива.** Допущение о том, что жидкие виды топлива всегда будут необходимы для наземного или воздушного транспорта, может быть не всегда верным. Ценностью углеводородов является их очень высокая энергетическая плотность, которая составляет в настоящее время величину, в 300 раз превышающую показатель для свинцово-кислотных аккумуляторов. Возможность расширить использование транспортных средств с электродвигателем является в настоящее время предметом усиленного внимания, и в этой области имеется, по крайней мере, несколько перспектив использования аккумуляторов высокой энергетической плотности. Возможность получения дешевой ядерной электроэнергии (особенно когда электромобиль не используется) является привлекательной. Энергетическая плотность ядерного топлива значительно выше, чем энергетическая плотность углеводородов, и в перспективе ядерная энергия будет наиболее вероятным заменителем нефти. Она занимает свое место в истории термодинамики топлива. Ядерное топливо компактно, безопасно и не загрязняет окружающую среду. Строительство небольших атомных стан-

ций — это вопрос только времени и технологии. Однако, как и в период появления первых автомобилей, ядерной энергии необходимы красные опознавательные сигналы.

**Биоэнергия и дешевое топливо.** Все виды возобновляемой энергии кажутся дешевле, чем они есть на самом деле. Рост биомассы, ее уборка, переработка, использование в качестве топлива обеспечиваются множеством путей с использованием традиционных видов топлива. Дешевые виды топлива используются непосредственно в самом процессе, а также для производства необходимых машин, удобрений, строений и т. д. При отсутствии дешевых видов топлива все компоненты процессов производства возобновляемой энергии становятся соответственно дороже. За последние несколько лет появилось много легковесных прогнозов относительно конкурентоспособности возобновляемых видов энергии, которые игнорировали этот простой факт. Насколько автору известно, этот вопрос не имеет полного теоретического обоснования, однако при прогнозах относительно будущего биоэнергии на фоне повышения цен на традиционные источники энергии следует соблюдать очень большую осторожность.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Haggin, J., Krieger, J. H., Biomass becoming more important in the US energy mix, *Chem Eng News*, 14 March 1983.
- [2] A 20 year preview; oil, plentiful; synfuels scarce, *Chem Week*, 26, 1983, 132.
- [3] Brookes, G., Energy policy, the energy price fallacy and the role of nuclear energy in the UK, *Energy Policy*, June 1978, 94–106.
- [4] Roberts, F., Energy in the 80's, *Energy Policy*, Sept. 1977, 253–254.
- [5] Johnson, P., The facts behind the alcohol issue, *Double Bond*, April 1983, 6–7.
- [6] Sauer, H. B., Compton, J. B., Optimizing the by-product credit for distiller's grains in a fuel grade ethanol production process: Kentucky's experience, Proceedings of the Ninth Energy Technology Conference, Feb. 16–18, 1982, Washington DC.
- [7] Cave, L., Nuclear power experience, *Energy policy*, 11, 1983, 176–177.
- [8] Hafele, W., Results of a seven-year global energy study, Proceedings of the Eighth Energy Technology Conference, Mar. 9–11, 1981, Washington DC.
- [9] Agarwal, A., The forgotten energy crisis, *New Scientist*, 10 Feb. 1983, 377–379.
- [10] Mac Killop, A., Energy for the developing world, *Energy Policy*, Dec. 1980, 260–276.
- [11] Hall, D. O., Barnard, G. W., and Moss, P. A., *Biomass for Energy in the Developing Countries*, Pergamon Press, 1982.
- [12] Mac Killop, A., More biomass energy for the south, *Energy Policy*, June 1983, 185.
- [13] Pyle, D. L., Energy and fuel from biomass, *National Energy Symposium*, Nov. 22–24, 1978, Nairobi, Kenya.
- [14] Robinson, C., The energy market and energy planning, *Long Range Planning*, 9, 1976, 30–38.

## ЧТО МОГУТ СДЕЛАТЬ ИССЛЕДОВАНИЯ?

### 8.1. ПОВЕРХНОСТНЫЙ И ВСЕСТОРОКНИЙ ПОДХОД

Исследования и экономика. Перед тем как начать проведение исследований по такой технико-экономической проблеме, как биоэнергия, важно определить специфическую природу этой проблемы. Усилия должны быть направлены на понимание и совершенствование многих различных аспектов получения биотоплива с использованием информации, накопленной в различных областях знаний. Однако данные, которые могут казаться эффективными с научной точки зрения, совершенно необязательно должны привести к снижению затрат при производстве биотоплива и побочных продуктов. Для определения очередности исследований, а также для создания уверенности в правильности выбранного направления необходимо прежде всего определить издержки по основным компонентам процесса производства. Такая простая преамбула очень часто игнорируется, и дается очень поверхностное обоснование исследований, а также возможных результатов. Экономические аргументы часто рассматриваются как факторы, сдерживающие развитие созидательных исследований, и о них не вспоминают до тех пор, пока исследования не становятся завершенными. Такое положение может быть приемлемым при проведении фундаментальных исследований, но оно совершенно неприемлемо при разработке таких прикладных проблем, как получение энергии из биомассы.

К этой главе число ссылок невелико, так как литературы по этому вопросу немного. В литературе рекомендации по производству биотоплива часто ограничены рамками исследования, при этом никаких указаний относительно осуществления политических курсов в области использования биоэнергии не дается [1], несмотря на то что фонды на исследование выделяются на основе стратегических решений. Несмотря на часто повторяемую мысль о необходимости совершенствования технологии производства биотоплива, влияние такого совершенствования на общую жизнеспособность процесса определяется редко. Не предполагается также и вероятность каких-либо кардинальных открытий в этой области. Подход, излагаемый ниже, представляет собой только

личное мнение автора и является предварительным суждением относительно перспектив исследований в области биоэнергии.

Роль каждого. Число различных групп, заинтересованных в биоэнергии, резко возросло. Это произошло вследствие природы некоторых предложений по производству биотоплива, частичного переплетения производства и переработки биомассы и других видов человеческой деятельности, а также сложности методов получения биотоплива, охватывающих широкий диапазон научных дисциплин. Таким образом, фермеры, лесники, пивовары, представители бумажной, молочной промышленности, предприятий по переработке сточных вод — все заинтересованы в решении проблем, связанных с получением биоэнергии. Как ни странно, представители отраслей, занимающихся производством традиционных видов энергии, часто менее многочисленны при обсуждении вопросов биоэнергии, чем представители указанных отраслей. Однако повышение стоимости производства энергии, болезненное отношение к проблеме истощения ресурсов, а также вопросы эстетического порядка, связанные с биоэнергией, явились основой заинтересованности каждого в этом вопросе. Однако, несмотря на то что сама по себе мысль является здоровой, требования немедленных действий часто заглушают предложения о необходимости проведения рационального анализа проблем. Авторов, занимающихся экономическим анализом и указывающих на технические трудности осуществления этих процессов, относят к разряду негативистов. За последние годы энтузиазм по поводу биоэнергии получал объективную оценку только тогда, когда он становился историей и сравнивался с аналогичными явлениями в прошлом.

Разбивка издержек по составным элементам. Новаторские исследования в промышленности имеют тенденцию к двум крайностям. В случаях, когда процесс является в достаточной мере отработанным, исследование может проводиться с целью совершенствования отдельных его аспектов для повышения конкурентоспособности (доработка). Этот тип исследований иногда называют текущими научными исследованиями и опытными разработками. В целях более радикального изменения технологии с разработкой совершенно новых процессов подход к исследованиям может носить более радикальный характер (глубокие исследования). При появлении изобретения или открытия инженеры-технологи и ученые, занимающиеся вопросами развития, могут довести эту идею до совершенства с получением максимального результата. Последний вид исследований проводится значительно реже. Повышение степени риска при выделении средств на всесторонние исследования оправдано только в случае достаточной большой отдачи. При решении определенной проблемы важно установить, какой тип исследования мы собираемся проводить. Улучшение результатов на несколько процентов, в то время как необходимо сокращение издержек вдвое для того, чтобы сделать его рентабельным, вряд ли целесообразно. С другой стороны, поиск

всеобъемлющего решения проблемы, требующей только незначительной корректировки или незначительных затрат, также вряд ли будет иметь смысл. Насколько радикальными должны быть изменения технологии, чтобы обеспечить использование биоэнергии в развитых странах? Обеспечит ли современное направление проводимых исследований желаемые результаты?

Таким образом, прикладные исследования по такому комплексному вопросу, как биотопливо, должны начаться с анализа издержек производства. Наиболее важные элементы затрат определяют тип и размер технических изменений, которые необходимо осуществить, технологию производства и распределения средств. Таким образом, достоинства новаторских предложений по различным научным дисциплинам определяются успехом проведенной работы. Иначе, существует опасность, что более громкие голоса специалистов в таких областях, как проектирование биореактора, проектирование системы теплообмена или биохимия микробных процессов, будут преобладать в дискуссиях и могут заслонить основные спорные вопросы.

Вернемся снова к структуре затрат на осуществление различных биоэнергетических процессов, описанных в главе 4. Каждый процесс характеризуется своими особенностями, и затраты на эти процессы в значительной степени зависят от района и возможных модификаций процесса. Тем не менее обобщения могут и должны быть сделаны. Полные издержки можно разделить на три группы: капитальные вложения, стоимость сырья (биомассы) и ежедневные эксплуатационные расходы. Так как процессы по производству биоэнергии осуществляются в масштабах, более широких по сравнению с другими процессами переработки биомассы и вследствие небольшой стоимости используемых материалов (кроме биомассы), эксплуатационные расходы составляют часто только незначительную часть полных издержек по производству биотоплива (при производстве биотоплива в развитых странах). Как уже говорилось, в менее развитых странах трудовые затраты могут играть первостепенную роль и являться определяющим фактором в отношении простейших форм использования биомассы — сжигание дров и угля. В этих случаях труд в различной степени замещает капитальные вложения.

Если источник биомассы — полноценный продукт, стоимость сырья является наиболее важным фактором. В качестве примера можно привести использование зерновых колосовых для гидролиза и ферментации, использование масличных культур для получения топливной нефти и полные затраты в интенсивной системе лесоводства при использовании древесины на дрова. В тех случаях, когда биомасса представлена отходами, будут преобладать капитальные затраты (например, анаэробное разложение сточных вод, сжигание древесных остатков и соломы и термическое обогащение городских отходов).

## 8.2. ТЕХНОЛОГИИ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К ИЗМЕНЕНИЯМ СТОИМОСТИ СЫРЬЯ

**Стоимость биомассы.** Как было показано в главе 2, издержки по выращиванию и уборке биомассы значительно выше издержек при добыче ископаемых видов топлива. Цены на биомассу, предназначенную для превращения ее в биотопливо, могут быть значительно выше при учете транспортных расходов, импортных пошлин, расходов на хранение прибылей. Цена на биомассу, включающая расходы по доставке, немедленно выключает большинство видов биомасс из производства биотоплива, если только эти расходы не компенсируются субсидиями. Исследования в области естественных наук могут сделать очень немного для того, чтобы способствовать субсидированию (если только исследователи не станут политиками). Многие предприятия не станут полагаться на такого рода субсидии при осуществлении долгосрочных капиталовложений. Реализация излишков биомассы фермерами по цене, не покрывающей издержки производства, и при отсутствии компенсации приведет скоро к банкротству фермеров.

Как было показано выше, наиболее важными элементами стоимости биомассы являются удобрения, машины и земельная рента; структура издержек производства биомассы (травяного силоса) показана на рисунке 17 (см. табл. 19 в главе 2). Земельная рента не является предметом исследования в области естественных наук. Остаются механизация и химические средства, необходимые для обеспечения высоких урожаев и сохраняющие издержки на низком уровне. Дорогостоящая, но необходимая роль, которую играет современная технология, — это основная дилемма, с которой приходится сталкиваться в области биоэнергии.

По крайней мере, при трех технологиях получения биоэнергии стоимость биомассы особенно важна. Это прямое сжигание для выработки пара и электроэнергии, спиртовое брожение растительных углеводов и экстрагирование растительных масел. В каждом случае биомасса, служащая сырьем для производства биотоплива, представляет основные отрасли мировой промышленности. Используются следующие виды биомассы: древесина (прямое сжигание), зерновые колосовые и сахароносные культуры (спиртовое брожение), семена и плоды масличных культур (производство растительных масел). Тот факт, что эти виды биомассы представляют основные отрасли промышленности, является благоприятным обстоятельством для производства биоэнергии в том отношении, что человечество имеет большой опыт в производстве этих форм биомассы в широком масштабе. Однако важные в экономическом отношении аспекты использования биомассы будут вступать в серьезный конфликт с производством более дешевых продуктов, таких, как топливо.

**Прямое сжигание.** При прямом сжигании закупленной древесины (в промышленности или для обогрева жилья) основной компонент

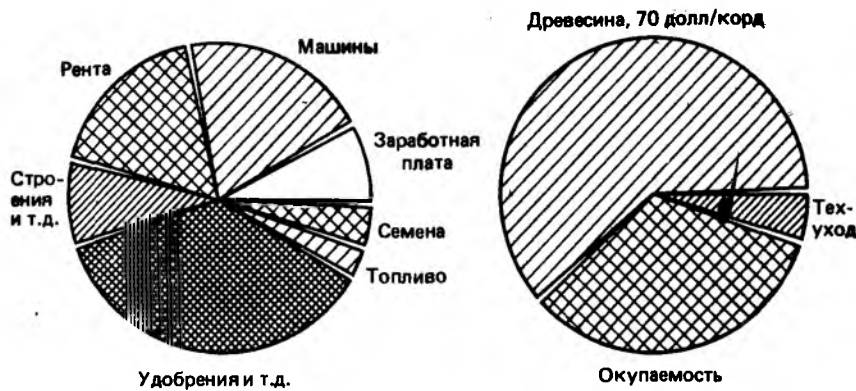


Рис. 17. Структура издержек производства биомассы.

Рис. 18. Издержки отодления древесиной.

издержек — стоимость самой древесины (рис. 18). Для соответствующим образом высушенной древесины имеются необходимые устройства для сжигания, и хотя они обычно более дорогостоящие, чем устройства для сжигания нефти, газа и угля, никаких радикальных изменений в технологии сжигания здесь не требуется. Проведенные исследования выявили причины загрязнения окружающей среды при сжигании древесины, а также способствовали повышению эффективности процесса сжигания. Однако это не улучшает положения со сжиганием древесины, так как стоимость последней значительно выше стоимости ископаемого топлива. В Великобритании проблема может быть частично решена путем сбора древесных отходов на землях общего пользования и на пустырях. Часть древесины имеется в продаже в форме дешевых отходов рубки леса, разделки древесины и других остатков, являющихся результатом деятельности в различных областях лесного хозяйства. Рыночная цена на высушенную древесину делает невозможной конкуренцию древесины с углем, газом или нефтью. Что могут сделать исследования в плане обеспечения предложения конкурентоспособной биомассы для сжигания?

**Учет отходов и остатков.** Ответ на вопрос о возможности такого учета не очень обнадеживает. Существует статистический подход, дающий суммарное количество остатков древесины и биомассы в национальном масштабе. Обычно такие подсчеты дают довольно значительные количества энергии (калориметрическая бомба, расчет на сухую биомассу). Такие исследования проводились во многих странах, включая Великобританию, США и Францию. К сожалению, статистика не указывает, какое количество биомассы может быть собрано в одном месте и при каких издержках. Эти цифры не могут оказаться полезными ни

при организации службы распределения древесины, ни при устройстве индивидуального деревянного центрального отопления.

**Энергетические плантации.** Другим подходом является организация "энергетических плантаций". Высказывались предложения высаживать быстрорастущие деревья на бедных землях с последующей уборкой всей биомассы. При этом, по прогнозам, издержки производства должны быть значительно меньше, чем при существующей практике лесоводства. Экономия обычно достигается в методах уборки. На первый взгляд эта мысль кажется перспективной. Однако в Великобритании не существует таких энергетических плантаций, предназначенных для промышленного производства топливной древесины. В сущности, эта мысль была высказана перед возникновением нефтяного кризиса для оказания помощи целлюлозной промышленности Великобритании, где стоимость целлюлозы значительно выше, чем стоимость топлива. Но по расчетам издержки оказались слишком высокими. Отчасти причиной этому был тот факт, что быстрый рост на бедных почвах сам по себе является противоречием, так как высокие урожаи могут быть получены только на плодородных почвах при интенсивных методах возделывания и внесении удобрений. Полные издержки в расчете на 1 т произведенной древесины на таких плантациях скорее всего будут выше, чем в лесах с выборочной рубкой и самовосстановлением (как, например, в Скандинавии и СССР), но, возможно, ниже, чем при интенсивной системе лесоводства, когда рубки ухода проводятся в течение цикла роста. В Великобритании вопрос наличия земельных угодий представляет собой наиболее сложную проблему, где исследования мало что могут сделать.

**Моторный спирт.** Стоимость сырья — основной элемент издержек в общей стоимости производства моторного спирта (рис. 19). Побочные продукты нередко играют решающую роль в определении степени цен-



Рис. 19. Стоимость производства спирта из кукурузы.

Рис. 20. Стоимость производства растительного масла.

ности процесса, и для них ведется поиск наиболее выгодных рынков сбыта. Исследования по проектированию ферментатора или повышению эффективности перегонки мало что значат в производстве моторного спирта, если при этом нет дешевого сырья. Такие исследования могут оказать большую помощь традиционным отраслям, производящим промышленный и питьевой спирт методом ферментации. Кроме того, в случаях, когда производство моторного спирта было организовано благодаря субсидиям или другой помощи со стороны правительства, процесс превращения биомассы в спирт должен быть максимально эффективным в целях снижения общих затрат. Существует много предложений по различным типам ферментаторов, перегонным кубам и теплообменникам, новым типам микробных реакций, альтернативным методам регенерации спирта и т. д. В других странах, где субсидирование менее вероятно, необходимы очень дешевые моносахариды или легко гидролизующие полисахариды для стабильного производства моторного спирта.

**Растительные масла.** Основной проблемой, связанной с использованием растительных масел, снова является стоимость производства биомассы (семян масличных культур и т. д.) (рис. 20). За последние несколько десятилетий стоимость растительных масел в реальном выражении снизилась благодаря механизации, внесению удобрений и новым сортам. Несмотря на перспективы дальнейшего повышения урожая, снижение стоимости растительных масел будет недостаточным для того, чтобы конкурировать с видами дизельного топлива, которые растительные масла могли бы заменить. Поскольку растительные масла вызывают закоксовывание поршневых колец дизельных двигателей, может возникнуть необходимость дальнейшей очистки масел, прежде чем они могут быть использованы в качестве топлива в карбюраторных двигателях внутреннего сгорания. Было бы более справедливо сравнить растительное масло с сырой нефтью (190 долл/т), чем с дизельным топливом (240 долл/т). Их стоимость в текущих ценах (440–600 долл/т) не позволяет им конкурировать с традиционными видами топлива.

### 8.3. ТЕХНОЛОГИИ, ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ К ИЗМЕНЕНИЯМ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ

**Сложность и низкая продуктивность.** В случаях, когда биомасса как сырье обходится дешево, предоставляется бесплатно или с доплатой, капитальные затраты становятся наиболее важным элементом в расчете издержек производства. Крупные и дорогие реакторы, системы подачи твердых частиц и сложные процессы — все эти факторы способствуют повышению первоначальных инвестиционных затрат, затрат по техническому уходу, а также повышению размеров долга, который необходимо погасить. В свете этих проблем основной упор должен быть сделан на уменьшение сложности процессов, повышение их

производительности и решение проблемы повышения материалоотдачи и эффективности строительства. В развитых странах решающим фактором являются повышение продуктивности и отказ от капиталоемких технологий, в то время как в развивающихся странах капитал до некоторой степени может быть замещен трудовыми затратами. Однако в обоих типах стран чувствительность капитальных затрат к совершенствованию процессов и оборудования обнаруживается редко, а положительные стороны многих новаторских предложений формулируются недостаточно четко.

**Прямое сжигание.** Рентабельность процесса удаления отходов и выработки пара и электроэнергии в значительной степени зависит от необходимых размеров капиталовложений. Стоимость системы сжигания топлива увеличивается при повышении сложности сортировочных машин, а также вследствие необходимости измельчения компонентов смеси перед сжиганием. Сама природа материала и его низкая теплотворная способность требуют специальной технологии сжигания и дорогостоящего оборудования. Хотя капитальные затраты могут быть компенсированы стоимостью выработанных пара и электроэнергии, для этих продуктов необходимо найти рынок. Общее влияние нововведений в области получения теплоты, энергии и удаления отходов на потребление энергии в национальном масштабе вряд ли может быть значительным. Вопрос стоит больше в плане снижения затрат на удаление отходов, чем нахождения новых источников энергии. В то время как исследования могут способствовать решению вечной проблемы, связанной с удалением отходов, для того чтобы поставить неотсортированные городские отходы на одну доску с ископаемым или ядерным топливом для выработки пара или электроэнергии, потребуется целая серия значительных усовершенствований. Так как именно дешевые виды ископаемого топлива вызывали появление гор отходов вокруг основных городов мира, нехватка этих видов топлива будет означать повышенный спрос на отходы. Отходы, которые приравниваются по энергетическим затратам к ископаемым видам топлива, характеризуют общество, достигшее крайней степени рециркуляции материалов, что ставит огромную проблему перед наукой.

**Термическое обогащение.** Экономика термического обогащения сильно зависит от компонентов капиталовложений при низкой стоимости сырья (рис. 21). В качестве сырья обычно предлагается использовать дешевую древесину, сортированные городские отходы и отходы сельскохозяйственного производства. Вследствие возможности использования угля в тех же процессах трудно представить эти процессы с использованием более дорогих видов биомасс. Потребности в капиталовложениях в обогатительный завод будут зависеть от сложности процесса и от продуктивности основных реакторов. Как процессы, так и реактор могут быть усовершенствованы в результате исследований, однако за последние годы не отмечено в этом направлении никаких



Рис. 21. Стоимость производства метанола из древесины.



Рис. 22. Стоимость производства биогаза из отходов.

кардинальных сдвигов. Здесь необходимо осуществление крупных постепенных изменений, а не мелких усовершенствований. Значительная часть усилий направлена на организацию демонстрационных процессов, а не на разработку радикально новых методов газификации или сжигания биомассы. Пути представления результатов часто затрудняют их понимание, т. е. какого рода усовершенствования были достигнуты — повышение продуктивности или упрощение процессов.

Нам все же приходится сталкиваться с фундаментальными проблемами при работе с влажным, гетерогенным, волокнистым материалом; проблема также заключается в отделении и измельчении твердых частиц для обеспечения приемлемых темпов реакции, а также в отделении комплексных продуктов реакции от такого же комплексного субстрата биомассы. При более высоких температурах продуктивность реактора увеличивается, а состав продуктов упрощается; в этих условиях единственным продуктом пиролиза и газификации являются газы, содержащие углерод. Однако экстремальные условия удорожают реакцию, и прочность материалов скоро достигает своего предела. Исследовательские и демонстрационные установки по производству синтетического топлива из угля могут оказаться полезными при исследовании возможностей биомассы. Уголь является менее сложным, более калорийным, более плотным и сухим сырьем, чем биомасса. Однако здесь имеется аналогичная проблема с твердыми частицами, медленными темпами реакции и образованием сложных продуктов реакции. Если в следующем десятилетии уголь покажет себя как жизнеспособный вид сырья для производства синтетического топлива, мы получим критерий для исследования биомассы как альтернативного субстрата.

**Анаэробное разложение.** Анаэробное разложение характеризуется обычно наличием углеродного сырья, получаемого бесплатно или с приплатой. Процесс довольно прост, и издержки производства биогаза в основном сводятся к капиталовложениям (рис. 22). Были проведены широкие исследования по разложению различных видов биомассы, например навоза различных животных, морских и пресноводных растений и микроводорослей, городских отходов и т. д. Все эти субстраты в определенной степени разлагаются, хотя часто процесс протекает очень медленно. В этом типе исследований не учитывается важный вопрос капитальных затрат, являющийся преобладающей статьёй даже при разложении наиболее благоприятных субстратов. Капитальные издержки являются высокими, так как продуктивность процесса (образование метана и уменьшение биологической потребности в кислороде) очень низка. Реакция протекает очень медленно, и фундаментальные исследования в области биохимии, физиологии и микробиологии мало способствовали повышению ее скорости. Процесс вбирает медленные темпы всех реакций, химических или биологических, включающих твердые реагирующие субстраты. Анаэробные биологические реакции также протекают медленно, возможно, вследствие небольших изменений свободной энергии. В определенной степени образование метана может быть увеличено за счет общей продуктивности реакции, рассматриваемой как процесс обработки сточных вод. Так как последнее является часто определяющим фактором, может возникнуть необходимость компромиссного решения (с низкой продуктивностью образования метана).

В лабораторных системах, использующих растворимые субстраты, время нахождения смеси в реакторе может быть сокращено до нескольких часов или нескольких дней; однако такой короткий период выдерживания оказался невозможным при наличии отходов с высокой биологической потребностью в кислороде, содержащих волокнистые материалы. Путем изменения конструкции реактора можно увеличить продуктивность при обработке сточных вод с более низкой биологической потребностью в кислороде; особенно эффективным типом реактора в отраслях пищевой промышленности является реактор с восходящим током и взвешенным слоем осадков. Однако, несмотря на то что темпы снижения биологической потребности в кислороде высокие, скорость образования метана низкая благодаря меньшей загрузке. Появление быстрого метода биологического анаэробного разложения материалов с большим содержанием твердых частиц могло бы революционизировать систему удаления отходов и дать дешевый метан для использования его в качестве топлива. В настоящее время таких предложений не имеется. Повышение выхода метана при разложении твердых частиц, содержащих летучий углерод, было также незначительным; было достигнуто только 50%-ное снижение количества летучих твердых частиц.

В ограниченных условиях капитальные затраты по осуществлению анаэробного разложения могут быть снижены очень простым путем. Удаление городских отходов часто осуществляется путем организации свалок мусора. Собранные отходы представляют собой гигантский реактор с минимальными капитальными затратами. Низкие скорости реакции и низкая продуктивность в этом случае играют меньшую роль, так как свалка уже существует, и эта территория не используется для каких-либо производственных целей. Выделяющийся метан может собираться в пробуренных скважинах, а затем путем диффузии поступать в сеть трубопроводов. В то же самое время опасность перемещения метана в окружающую среду, жилые помещения и т. д. снижается. По этому вопросу проводилось и проводится целый ряд экспериментов. При достаточно эффективном сборе метана открываются возможности эффективной регенерации энергии, хотя даже в этом случае природный газ может составить конкуренцию. Однако эта деятельность может все же оказаться полезной в плане общенационального энергообеспечения. Совместно с соответствующими потребителями газа необходимо установить местонахождение крупных свалок мусора с глубиной биомассы, по крайней мере, 10 м. Безопасное и надежное удаление метана из данной местности само по себе — дополнительный стимул и главное обоснование процесса. Если в использовании метана нет необходимости, его можно сжигать на месте.

Многие другие проблемы, связанные с анаэробным разложением, могут рассматриваться как вспомогательные при решении проблемы капитальных затрат и низкой стоимости продукта. Фактически решение некоторых из этих проблем может неизбежно означать повышение капитальных затрат. Так, создание насосов, устойчивых к коррозии, вызываемой биогазом, повышение эффективности сортировки отходов, обеспечение хранения сырья и биогаза — это проблемы, которые можно решить, но которые способствуют увеличению капиталовложений. Было бы неразумно тратить значительные суммы денег на исследования этих проблем, если мы не можем решить основную проблему высокой стоимости процессов разложения.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Carruthers, S. P., Jones, M. R., Biofuel production strategies for UK agriculture Centre for Agriculture Strategy, Reading CAS Paper, 13 July 1983.

Широкий интерес к использованию биоэнергии был частично вызван опасениями относительно будущих запасов энергии. Возможная роль продуктов фотосинтеза как источников энергии должна рассматриваться на фоне основных отраслей мировой промышленности, занимающихся добычей и переработкой традиционных видов топлива. Для обеспечения будущих потребностей в энергии необходимы новые крупные источники энергии. Энергия из биомассы вряд ли составит сколько-нибудь значительную долю в общем потреблении энергии.

Существует множество мелких рынков биотоплива, но их масштаб мал по сравнению с рынками других видов топлива. Производство биотопливных предприятий стоит дороже традиционных видов топлива; иногда эти предприятия получают местные субсидии. Уровень исследований по биоэнергии не может быть оправдан наличием таких малых рынков сбыта. Необходима реальная перспектива выпуска продукции, которая в широком масштабе сможет заменить при необходимости традиционные виды топлива, в частности нефть.

Характеристики биологически возобновляемых видов энергии были рассмотрены как по сути, с использованием технико-экономических критериев, так и в сравнении с традиционными видами энергии. Как можно было ожидать, выводы не в пользу биотоплива при использовании последнего в развитых странах (при очень небольшой роли, которую возобновляемые виды энергии играют в мировом потреблении энергии). Использованные критерии включают размер ресурсов, технические возможности, продуктивность процесса, денежные затраты, загрязнение окружающей среды, влияние на социальные условия и перспективы исследования.

Все проблемы использования биотоплива в корне своем связаны с первыми двумя законами термодинамики. Ресурсы биоэнергии, доступные человеку, слишком малы (первый закон) и слишком "разбавлены" (второй закон). Высокая стоимость, неблагоприятные энергетические показатели, загрязнение и т. д. — все сводится к этим двум фактам и в значительной мере считается неизбежным. Конечно, вполне возможно значительное повышение эффективности процессов, но мы неизбежно сталкиваемся с фактом незначительности объема продуктов



фотосинтеза в сельском хозяйстве и лесоводстве и их низкой энергетической плотностью по сравнению с ископаемыми и ядерным видами топлива.

Анализ каждого упомянутого критерия вызывает серьезные опасения относительно жизнеспособности предложений по получению биоэнергии, и только в исключительных обстоятельствах проблемы могут оказаться разрешимыми в течение короткого времени. Наука, однако, считает вполне возможным, что со временем биоэнергия будет играть более существенную роль в деятельности человека. К сожалению, лучшая возможность осуществить этот вариант — это вернуться к предыдущей стадии развития и значительно более сокращенному населению земного шара.

Как было показано, биологические ресурсы, используемые в настоящее время сельским хозяйством и лесоводством, относительно малы с точки зрения энергетических характеристик. Широкое использование этих ресурсов для производства энергии окажет большое влияние на другие отрасли промышленности. Следует сказать, что в истории использования энергии проходили десятки лет и века, прежде чем новые виды топлива достигали значительной доли в общем потреблении энергии. Переход к использованию новых видов энергии происходил тогда, когда этому способствовали механизм цен и появление новых технологий. В отношении биотоплива действия этих механизмов не наблюдалось. Использование ресурсов к тому же ограничивается многими факторами, включая солнечную радиацию, почвенно-климатические факторы, потребности в удобрениях и пестицидах, социальные факторы. Поэтому биомасса идет по высоким ценам при использовании ее для производства продуктов, иных, чем топливо; некоторые из этих продуктов, особенно продукты питания, имеют более важное значение для человека, чем промышленная энергия.

Процессы получения и использования биомассы в качестве топлива представляются осуществимыми, по крайней мере, в общих чертах. На опытных установках не получали только биологический водород. Другие процессы представляются реальными при продуктивности, являющейся низкой по сравнению с продуктивностью процессов получения ископаемых и ядерных видов топлива. При современном состоянии знаний перспективы значительного повышения продуктивности этих реакций являются слабыми.

Низкая продуктивность приводит к высоким капитальным издержкам и делает биотопливо дорогостоящим по сравнению с традиционными видами топлива. Эти издержки в сочетании с обычно высокой стоимостью биомассы (сырья) делает цены на биотопливо в несколько (до 10) раз выше стоимости альтернативных вариантов. Рыночные цены на биомассу характеризуются одним из наиболее резких различий между существующим положением и прогнозами сторонников биотоплива. Значительное несоответствие существует между ценами на мировом рын-

ке на продукцию сельского хозяйства и лесоводства и ценами; необходимыми для обеспечения рентабельности получения биотоплива. Даже отходы и остатки редко можно получить бесплатно. Маловероятно, что энергетические плантации могут обеспечить биомассу по значительно более низким ценам, чем те, которые существуют в настоящее время.

Стремление к использованию биотоплива часто основывалось на растущих ценах на ископаемые виды топлива, в то время как стоимость сырья для производства биотоплива считалась постоянной величиной. Большая роль, которую играют дешевые виды ископаемого топлива в выращивании, уборке и переработке биомассы, ставит это утверждение под сомнение. В развитых странах произошли громадные изменения с тех пор, когда древесина играла существенную роль в обеспечении энергией, и дешевая энергия стала неотъемлемой, хотя и скрытой частью почти всех видов человеческой деятельности.

Так как виды биотоплива представляют собой "разбавленные" источники энергии, они требуют больших затрат энергии при их производстве. Затраты по отношению к объему конечного продукта при производстве биотоплива значительно выше, чем при производстве ископаемой или ядерной энергии, однако энергия, необходимая для производства этих видов топлива, поступает за счет именно этих ископаемых и ядерных видов топлива. Экономия ископаемых видов топлива путем использования возобновляемых видов не была продемонстрирована достаточно убедительно (например, в случае спирта). Вследствие незаметного проникновения дешевых видов энергии во все сферы экономической деятельности можно легко войти в заблуждение, считая, что открыты новые, нетронутые источники энергии, в то время как фактически при эксплуатации этих источников возрастет нагрузка на традиционные источники энергии. В отношении возобновляемых видов энергии не всегда проводится анализ степени загрязнения окружающей среды, а также степень риска, связанного с их использованием; такой анализ был проведен недавно на примере традиционных и ядерных видов топлива. Рубка леса, например, является довольно опасным занятием. Углерод, остающийся после завершения процессов производства возобновляемых видов топлива, часто составляет значительную долю от массы сырья, усложняя удаление жидких, газообразных и твердых отходов. Большое число и малые размеры заводов по производству биотоплива усложняют проблему, связанную со степенью риска и загрязнением окружающей среды.

Социальный аспект широкого использования биотоплива является, пожалуй, более неблагоприятным в долгосрочном плане, чем результаты чистых экономических расчетов. Во-первых, возникает вопрос занятости в случаях, когда требуется увеличение производительности труда, особенно в развивающихся странах. Процессы по производству биотоплива характеризуются низкой производительностью труда. Во-вторых, производство биоэнергии требует больших земельных площадей

для обеспечения достаточного количества сырья. Нарушение картины ландшафта и влияние на зоны отдыха, транспорт и фауну в современной ситуации вряд ли будут восприняты положительно.

Остаются особые случаи, когда биотопливо может использоваться, по крайней мере, временно и когда возможно более широкое его использование в будущем. Первый случай касается развивающихся стран, где большое число людей вынуждены восполнять свои относительно небольшие количества энергии биомассы для удовлетворения основных потребностей в топливе. Можно не сомневаться, что эти люди обратятся к более энергоемким и обильным видам топлива, если таковые окажутся в наличии. Во-вторых, есть случаи, когда биотопливо имеет как эстетическое, так и утилитарное значение: древесина и уголь будут продолжать использоваться в качестве топлива для обогрева помещений. Последний случай определить трудно, так как он представляет скорее зло, чем благо, для национальной экономики. Это произойдет в случаях, когда излишки сельскохозяйственной продукции будут использоваться как низкосортное топливо. Субсидии, необходимые для предотвращения банкротства производителей биомассы, указывают на компромиссную природу такой деятельности, а также на невозможность того, что этот путь может дать стабильный или значительный источник топлива. Аналогично этому превращение отходов и остатков в топливо может осуществляться в некоторых ситуациях, однако маловероятно, что оно может иметь глобальное значение. Необходима разработка более дешевых методов удаления отходов и более эффективного их использования.

Как показало это исследование, вложение крупных сумм в развитие биоэнергетики неоправдано. Со стороны основных отраслей энергетической промышленности вполне разумно осуществлять контроль за ходом разработок в области ферментации, анаэробного разложения, производства растительных масел и термического обогащения биомассы. Предложения, которые могут внести изменения в области производства биотоплива, должны быть тщательным образом проанализированы и исследованы. За последние годы предложения по получению биологически возобновляемых видов энергии являются только небольшой частью общего числа предложений по производству новых видов топлива. К сожалению, выводы относительно использования предложенных видов топлива оказались аналогичными выводам по использованию биотоплива. Вследствие сложности и разнообразия идей по использованию биоэнергии трезвая их оценка занимает много времени, в течение которого могут быть затрачены большие денежные средства. В настоящее время уже имеются признаки снижения интереса к этому вопросу. Падение цен на ископаемые виды топлива, увеличение числа нерентабельных процессов производства возобновляемых видов энергии, более глубокое понимание технических проблем сыграли определенную роль в снижении интереса к этой проблеме.

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие к английскому изданию . . . . .	5
<b>Глава 1. Потребность в большом количестве дешевой энергии . . . . .</b>	<b>7</b>
1.1. Энергия, энтропия и полезная работа . . . . .	7
1.2. Масштабы, эффективность и плотность использования энергии . . . . .	11
1.3. История вопроса потребления и стоимости энергии . . . . .	14
1.4. Эффективность энергии и эффективность затрат . . . . .	21
Литература . . . . .	22
<b>Глава 2. Продукты фотосинтеза — сырье для топлива? . . . . .</b>	<b>24</b>
2.1. Солнечная радиация и наличие земельных угодий . . . . .	24
2.2. Урожай культур и факторы, лимитирующие урожай . . . . .	30
2.3. Стоимость продуктов фотосинтеза . . . . .	35
2.4. От первичных продуктов фотосинтеза к ценным видам топлива . . . . .	38
Литература . . . . .	42
<b>Глава 3. Технология получения биотоплива . . . . .</b>	<b>44</b>
3.1. Сжигание . . . . .	44
3.2. Сухая перегонка, газификация и сжижение . . . . .	47
3.3. Гидролиз и ферментация . . . . .	54
3.4. Анаэробное разложение . . . . .	58
3.5. Растительные масла . . . . .	63
3.6. Производство биологического водорода . . . . .	69
Литература . . . . .	70
<b>Глава 4. Стоимость биоэнергии . . . . .</b>	<b>72</b>
4.1. Подход к расчетам стоимости биоэнергии . . . . .	72
4.2. Непосредственное сжигание . . . . .	76
4.3. Термическое обогащение . . . . .	79
4.4. Гидролиз и ферментация . . . . .	81
4.5. Анаэробное разложение . . . . .	84
4.6. Растительные масла . . . . .	87
Литература . . . . .	89
<b>Глава 5. Энергетические затраты при производстве биоэнергии . . . . .</b>	<b>91</b>
5.1. Введение . . . . .	91
5.2. Затраты энергии на производство биомассы . . . . .	94
5.3. Затраты энергии на обогащение биомассы . . . . .	98
5.4. Спирт как топливо . . . . .	102
5.5. Энергия и денежные затраты . . . . .	105
Литература . . . . .	107
<b>Глава 6. Определение степени риска при использовании биоэнергии, ее социальное значение и безопасность для окружающей среды . . . . .</b>	<b>109</b>
6.1. Анализ степени риска . . . . .	109
6.2. Социальный аспект . . . . .	113
6.3. Загрязнение окружающей среды . . . . .	116
Литература . . . . .	119

Глава 7. Рынки биотоплива . . . . .	121
7.1. Какова цена биотоплива? . . . . .	121
7.2. Конкуренция с нефтью, углем и ядерной энергией . . . . .	125
7.3. Развивающиеся страны . . . . .	129
7.4. Что произойдет, когда источники ископаемого топлива иссякнут? Литература . . . . .	132 135
Глава 8. Что могут сделать исследования? . . . . .	136
8.1. Поверхностный и всесторонний подход . . . . .	136
8.2. Технологии, чувствительные к изменениям стоимости сырья . . . . .	139
8.3. Технологии, чувствительные к изменениям капитальных затрат Литература . . . . .	142 146
Глава 9. Заключение . . . . .	147

Д. Бойлс

**БИОЭНЕРГИЯ: ТЕХНОЛОГИЯ, ТЕРМОДИНАМИКА, ИЗДЕРЖКИ**

Зав. редакцией *В. Е. Машковский*

Редактор *Н. И. Вяткин*

Художник *В. А. Валит*

Художественный редактор *А. И. Бершачевская*

Технические редакторы *Н. А. Зубкова, В. А. Боброва*

Корректор *А. П. Шахрова*

ИБ № 5177

Подписано в печать 11.09.87. Формат 60 × 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная № 1.  
Печать офсетная. Гарнитура Пресс-Роман. Усл. п. л. 8,84. Усл. кр.-отг. 9,07.  
Уч.-изд. л. 10,01. Изд. № 564. Тираж 2100 экз. Заказ № 3078 Цена 2 руб.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО "Агропромиздат", 107807, ГСП,  
Москва, Б-53, ул. Садовая-Спасская, 18.

Типография № 9 Союзполиграфпрома Государственного комитета СССР по делам  
издательств, полиграфии и книжной торговли, 109033. Москва, Волочаевская, 40.