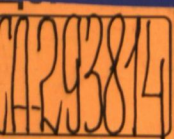


С. О. Денк

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ
ИСТОЧНИКИ И РЕСУРСЫ
БЛИЗКОГО БУДУЩЕГО**



Пермь 2007



Денк Святослав Отеллович

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ И РЕСУРСЫ БЛИЗКОГО БУДУЩЕГО

Научно-производственное (практическое)
издание

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ КУЛЬТУРЫ
"ОРЕНБУРГСКАЯ ОБЛАСТНАЯ
УНИВЕРСАЛЬНАЯ НАУЧНАЯ БИБЛИОТЕКА
ИМ. Н. К. КРУГСКОЙ"

Пермь

Издательский дом
«Пресстайм»

2007

08

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список аббревиатур и основных обозначений	5
Введение	7
Раздел 1. Традиционные скопления углеводородного сырья	15
Глава 1. Основные положения системного подхода к нефтегазогеологической теории и практике	16
§ 1. Продуктивный объект как ПФС.....	25
§ 2. Самоструктурирование ПФС и стадийность процесса флюидоотдачи.....	36
§ 3. Основные положения интенсивной технологии извлечения пластовых флюидов.....	49
§ 4. Элементы системного подхода к процессам нефтегазоизвлечения в геолого-промысловой практике	58
Глава 2. Типичные продуктивные объекты: доизвлечение остаточных запасов углеводородного сырья.....	62
§ 1. Нефть недоизвлеченная и технологически неподвижная	65
§ 2. Микробиологическое воздействие	69
§ 3. Растворение углеводородным газом.....	72
Глава 3. Нетипичные продуктивные объекты	78
§ 1. Нетипичная структура ФЕС: межблоково-проницаемый коллектор	79
§ 2. Литотип вмещающей породы как признак нетипичности ПО	89
§ 3. Деформирующиеся коллекторы нефти и газа	100
§ 4. Объекты с аномальными пластовыми флюидами	108
§ 5. Скопления водорастворенного метана.....	112
Раздел 2. Нетрадиционные скопления углеводородного сырья	124
Глава 1. Скопления природных битумов	127
§ 1. Разновидности термического воздействия на битумопородный массив	140
§ 2. Примеры эффективной скважинной разработки залежей битумов.....	149

Глава 2. Сланцепородные массивы	155
§ 1. Некоторые вопросы выемки сланца на-гора и его наземной переработки	163
§ 2. Внутрипластовая переработка ГС.....	167
Глава 3. Угленосные толщи	177
§ 1. Подземная газификация угля	186
§ 2. Основные направления совершенствования технологии ПГУ	192
Глава 4. Скопления торфа	195
Глава 5. Биомасса как источник углеводородного сырья	204
§ 1. Переработка древесных отходов	217
§ 2. Переработка твердых бытовых отходов	221
§ 3. Канализационная биомасса — источник метана	223
§ 4. Ближайшие перспективы развития переработки биомассы	225
Глава 6. Углеводородные газы в нетрадиционных агрегатно-фазовых состояниях.....	233
§ 1. Скопления сжиженных УВгазов	235
§ 2. УВгазы в гидратной форме	237
Раздел 3. Альтернативные источники энергии	244
Глава 1. Солнечная энергия	251
§ 1. Технологии солнечной теплоэнергетики	252
§ 2. Технологии солнечной электроэнергетики	257
§ 3. Использование энергии ветра	260
Глава 2. Энергия поверхностных вод.....	268
§ 1. Механическая энергия	269
§ 2. Тепловая энергия Мирового океана	272
§ 3. Химическая энергия воды: водород	274
Глава 3. Тепловая энергия Земли.....	282
§ 1. Тепловая энергия и продуктивные объекты в горячих безводных массивах	287
§ 2. Энергия и резервуары геотермального пара	290
§ 3. Паро-водяная смесь: широко распространенный геотермальный энергоноситель	294
§ 4. Термоминеральные продуктивные объекты.....	297
§ 5. Перспективы развития геотермальной энергетики на островах Курильской гряды (Сахалинская область)	303
Заключение.....	315

БИОМАССА КАК ИСТОЧНИК УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

«Рассмотри только поприветнее свое хозяйство, то увидишь — всякая тряпка пойдет в дело, всякая дрянь даст доход..»

Н. В. Гоголь

В общем случае биомасса суть общая масса тел¹⁾ особой одного вида, группы видов или организмов сообщества в целом, приходящаяся на единицу площади/объема и исчисляемая как масса органического вещества в абсолютно сухом состоянии. С точки же зрения потенциальных энергетических ресурсов²⁾ к биомассе следует отнести только некоторую часть фитомассы (т. е. биомассы растений) непромышленного значения, — например, ветви, сучья, ботву и пр., — вместе с органическими отходами производства и жизнедеятельности человека и домашних животных. Ежегодно в биосфере Земли прирастает³⁾ 110 млрд. т одной фитомассы, причем > 96 % указанного объема находится за пределами возделываемых угодий. Приведенная величина отвечает получению в год 2 000 млрд. ГДж энергии, если принять среднюю теплотворную способность сухой биомассы за 18 ГДж/т. Очевидно, что определение²⁾ существенно ограничивает рассматриваемый объем, хотя и он очень велик. Например, к началу 80-х гг. XX века в сельском хозяйстве СССР только образование соломы злаковых⁴⁾ составляло ежегодно 180...200 млн. т.

¹⁾ Биомасса // Лесная энциклопедия. — М.: Советская Энциклопедия, 1985. — Т. 1. — С. 84—85.

²⁾ Денк С. О. Перспективы нефтегазодобычи. «Нетипичные» продуктивные объекты, нетрадиционные источники углеводородного сырья, интенсивные технологии. — Пермь: Электронные издательские системы, 2006. — С. 207.

³⁾ Бойлс, Д. Биоэнергия: технология, термодинамика, издержки. — М.: ВО «Агропромиздат», 1987. — С. 12, 14, 30, 50, 53—54, 67, 110.

⁴⁾ Нетрадиционные источники энергии и их комплексное освоение. — М.: ВНИИКТЭП, 1985. — С. 58—64, 130—137.

Состав биомассы⁵⁾ таков (% масс. на сухое вещество):

водорастворимые (сахароза, крахмал, карбамид, соли) соединения	5...30
белки	5...40
целлюлоза	25...90
лигнины ($C_{22-120}H_{10-138}O_{3-35}$)	5...30
зола	1...13

Технические классификации биомассы многочисленны и варьируют в зависимости от свойства/свойств исходного продукта, принимаемых за таксономический признак/признаки. В работе⁶⁾ биомасса по составу и агрегатному состоянию подразделяется на сухую (древесина и т. п.), жидкую (сточные воды) и сахарную (твердые отходы сахарной промышленности). Основные направления и технологии переработки биомассы в УВсырье показаны на рис. 67.

Простейший способ утилизации биомассы для выработки теплотэлектроэнергии — сжигание — здесь не рассматривается. Вкратце скажем, что в этой области имеются многие передовые разработки. В частности, фирмой «Woodex» (США) создана установка, измельчающая, сушащая и экструдирующая древесину⁴⁾ под давлением 30 МПа. На выходе получаются таблетки с длиной и диаметром 9,3 и 3 мм соответственно. Это топливо для домашних печей и плит, теплотворная способность которого варьирует в пределах 21,2...33,2 МДж/кг при содержании воды 10...14 %. Необходимо отметить, что топливный потенциал древесной биомассы достаточно востребован в США. К началу 80-х гг. XX века > 5 млн. американских семей пользовались ей как основным видом домашнего твердого топлива. Отсюда и выработка древесных горючих таблеток становится актуальной.

Далее даются краткие характеристики указанных технологий.

Пиролиз. Эта технология переработки биомассы принципиально не отличается от применяемой в отношении иных твердых горючих полезных ископаемых (см. главы 2, 3, 4 настоящего раздела). Из летучих продуктов пиролиза имеют топливное значение газ и жидкое УВсырье. (Последнее названо американскими специалистами пиротопливом⁷⁾. Этот термин, по мнению автора, достоин широкого применения.) Твердый остаток, при пиролизе древесины называемый древесным углем, является беззольным (содержание золы < 2 % масс.) печным топливом. В США освоена эксплуатация шахтных гене-

⁵⁾ Терентьев Г. А., Тюков В. М., Смаль Ф. В. Моторные топлива из альтернативных сырьевых ресурсов. — М.: Химия, 1989. — С. 121—125, 149, 188, 221.

⁶⁾ Более чем достаточно? — М.: Энергоатомиздат, 1984. — С. 113—115, 134—136.

⁷⁾ Биомасса как источник энергии. — М.: Мир, 1985. — С. 20, 117, 159—166, 170—181, 221—235, 287—304.

раторов с подачей воздуха и/или пара для пиролиза древесной щепы и другой «выбросной» биомассы⁷⁾. Получаемый газ состоит главным образом из азота: ~ 50 % по объему. Горючими составляющими служат оксид углерода (II) и водород (в процентном отношении к объему):

CO	19,8
H ₂	18,2
CO ₂	10,9

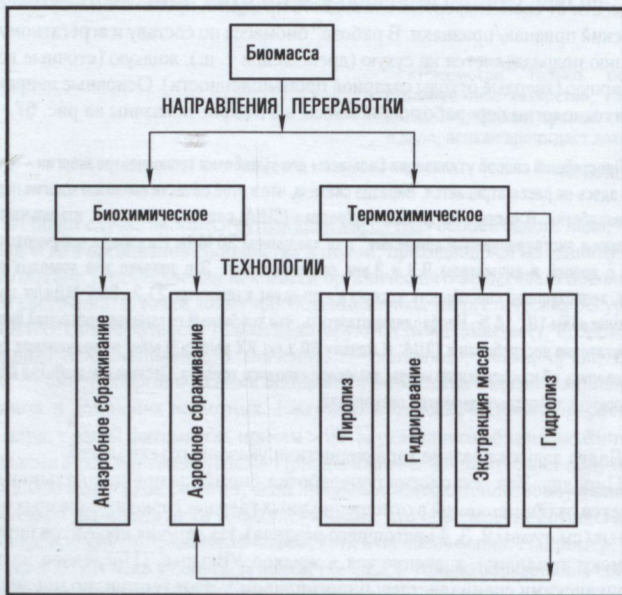


Рис. 67. Основные направления и технологии переработки биомассы.
По данным^{3), 4), 5), 6)}

Газ имеет энергетическое применение. Выходящее пиротопливо с плотностью > 1 100 кг/м³ обогащено кислородными соединениями (табл. 23) и весьма агрессивно по отношению к металлу, напоминая тем самым уксусную кислоту³⁾. Оно не смешивается с нефтью/нефтепродуктами, но большей частью растворимо в воде. Данное жидкое УВсырье неприменимо в качестве моторно-

го топлива для типичных двигателей внутреннего сгорания. Смешивая его с водой до 16 % об., получают заменитель топочного мазута. Хранение пиротоплива допустимо лишь в течение двух недель. Затем оно теряет свои качества в силу продолжающихся химических реакций между компонентами смеси.

Табл. 23

Содержание, % масс.	Исследуемые продукты и сырье		
	исходная древесина	пиротопливо	твердый остаток
Углерод	52,3	52,7	77,1
Водород	6,0	5,9	5,2
Кислород	41,2	25,2	10,2
Вода	50,0	16,2	5,8

Пиролиз служит типичным примером технологии, направленной на превращение исходной биомассы в более энергонасыщенные продукты. Имеет смысл привести показатели теплотворной способности сырья и продуктов (МДж/кг):

древесная щепа	20,7
пиротопливо	24,58
углистый остаток	31,65

Гидрирование. В атмосфере водорода при различных термобарических условиях процесса и применяемых катализаторах биомасса преобразуется в разнообразное УВсырье, от метана до твердого пека. Начало описываемой переработке положили эксперименты специалистов германской фирмы «ИГ Фарбениндустри» в 1930 г. Истертая еловая⁸⁾ древесина, смешанная с бензолом и этиловым спиртом, гидрировалась на никелевом катализаторе при температуре и давлении 280 °С и ~ 1,6 МПа. Как следствие, биомасса полностью превращалась в сырье, подобное тяжелым нефтяным остаткам. До $\frac{3}{5}$ его объема составляла вязкая смола, прочее представляло собой пек. Переработка смолы давала аналоги легких нефтепродуктов, в т. ч. бензин. Стоимость последнего была на 28 % ниже таковой для топливного этанола⁹⁾, получаемого гидролизом той же древесины.

Положительные результаты получены¹⁰⁾ при гидрогенизационном оживлении лигнина — твердого отхода гидролизной промышленности. В присутствии

⁸⁾ Кислицын А. Н. Пиролиз древесины: химизм, кинетика, продукты, новые процессы. — М.: Лесная промышленность, 1990. — С. 255–275.

⁹⁾ Химия древесины. — М. — Л.: Гослесбумиздат, 1960. — Т. 2. — С. 234–237.

¹⁰⁾ Козлов В. Н., Нимвицкий А. А. Технология пирогенетической переработки древесины. — Л.: Гослесбумиздат, 1954. — С. 137, 283, 292.

катализатора — сульфида молибдена и в среде лигнинового дёгтя исходная биомасса нацело переходит в жидкую смесь алканов и циклоалканов. Полученный продукт характеризуется температурой начала кипения 300 °С и сходен по свойствам с нефтяным газойлем. Его использование возможно как непосредственно в роли дизельного топлива, так и в виде сырья для гидро- и каталитического крекинга, для производства заменителей светлых нефтепродуктов.

Ожижение лигнина представляет значительный интерес ввиду крупнотоннажности (~ 35...40 % массы принятого для гидролиза сырья) этого отхода. В бывшем СССР⁴⁾ одно только производство микробиологических препаратов осложнялось ежегодным образованием до 4 млн. т «выбросного» лигнина. Из этого объема утилизировалось менее 1/5. Основная масса лигнина поступала в отвал.

Гидрирование биомассы позволяет получать также спирты. В частности, из древесины⁸⁾ клена в диоксане с катализатором — хромитом меди выходит метанол.

Экстракция масел. Способность растительных масел служить топливом для двигателей внутреннего сгорания известна издавна. Изобретенный Рудольфом Дизелем и носящий его имя двигатель был способен в одном из конструктивных вариантов потреблять³⁾ подсолнечное масло... Действительно, рапсовое масло соответствует традиционному соляру по теплотворной способности (именно, 36,2 и 37,2 ГДж/м³), отличаясь более высокими показателями вязкости (0,98 м²/с против 0,02...0,08) и температуры воспламенения (317 и 55 °С, аналогично). Употребление, например, льняного масла⁵⁾ вместо соляра влечет за собой снижение мощности двигателя на 1/20...1/5 от номинального значения. Все растительные масла (табл. 24) тяжелее традиционного дизельного топлива (~ 820 кг/м³), и вязкость их существенно выше¹¹⁾.

Табл. 24.

Вид масла	Оливковое	Арахисовое	Подсолнечное	Соевое	Кунжутное
Характеристики					
Плотность, кг/м ³	915,3	917,2	922,4	923,1	921,0
Вязкость при 20 °С, мПа·с	78,1	75,9	63,3	57,8	71,2

Тем не менее при температуре 100 °С вязкость всех масел резко уменьшается, составляя в среднем 6,8 мПа·с. Таким образом, подогревание мас-

¹¹⁾ Купчинский П. Д. Вязкость растительных масел // Тр. / ВНИИЖ. — 1957. — Вып. 17. — С. 183–188.

ляного топлива перед поступлением в форсунки дизелей решит проблему подвижности масла. Как показывают результаты экспериментов, растительные масла, используемые в качестве дизельного топлива, нуждаются в очистке от растительного клея и воды. Необходимость обезвоживания очевидна: при высоких температурах будет происходить гидролиз масел с выделением высших жирных кислот, агрессивных по отношению к металлу. В табл. 25 сведены успешные результаты опробования в роли моторных топлив масел и смесей масел с традиционными топливами⁵⁾.

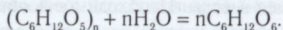
Табл. 25

Государство, в котором велись исследования	Тип двигателя	Компоненты топливной смеси		Содержание компонент, % об.	
		нетрадиционная	традиционная	нетрадиционной	традиционной
Австралия	Дизель	Арахисовое масло	—	100	—
Таиланд	Дизель	Кокосовое масло	Керосин	Нет сведений	Нет сведений
Бразилия	Дизель «Катерпиллар»	Масла соевое, подсолнечное, арахисовое	Соляр	10	90
ФРГ	Дизель	Подсолнечное масло	Соляр	25	75
Япония	Карбюраторный	Эвкалиптовое масло	Бензин, спирт этиловый	10...20	80...90

Зарубежный опыт показывает, что основным осложнением применения растительных масел как топлив является их термическая нестабильность. Как следствие, имеют место забивание форсунок дизелей и закоксовывание поршневых колец. Засорение фильтров ввиду повышенной вязкости масел может быть, как сказано выше, устранено предварительным нагреванием растительного топлива.

Вполне очевидно, что в первую очередь в качестве топлива будут использованы не пищевые (к тому же подчас производящиеся в регионах с хронически недоедающим населением — Африке и Латинской Америке), а технические растительные масла. Среди последних обращают на себя внимание кукурузное (второстепенный продукт кукурузоводства), техническое оливковое (т. н. «деревянное») и техническое жирное (получаемое из околоплодника масличной пальмы *Elaeis guineensis*).

Гидролиз. Важнейшая составная часть фитомассы, целлюлоза, представляет собой природный полимер, при гидролизе деполимеризующийся до моносахаридов:



Процесс протекает в растворах серной/соляной кислот при атмосферном давлении и температуре 185 °С. Далее получаемые моносахариды подвергаются аэробному сбраживанию с образованием этилового спирта.

Верховой торф низкой степени разложения представляет собой слабо измененную фитомассу болотных растений. Его гидролиз¹²⁾ при термобарических условиях 100...150 °С и 0,4...0,6 МПа позволяет получить монозы — простейшие сахара́.

Аэробное сбраживание. Гидролизат ферментируется дрожжами при температурном режиме 30...38 °С и в условиях перемешивания. По окончании процесса брожения жидкость, содержащая 4...5 % об. C_2H_5OH , отфильтровывается и перегоняется. Перегонка дает спирт с концентрацией 50...70, а затем 90...95 % об. Дистилляция получаемого этанола — наиболее технологически сложная и энергетически затратная стадия технологического процесса аэробного сбраживания⁵⁾. Так, энергетические затраты на выработку 1 т C_2H_5OH из кассавы (юкки) равны 53,4 ГДж. Из них собственно сбраживание требует 4,3 ГДж, тогда как перегонка — 17,1.

Технология аэробного сбраживания перспективна в отношении переработки жома сахарного тростника — багассы, или багасо (с испанского «bagazo»). Багасса является крупнотоннажным отходом тростниково-сахарного производства. Выработка 1 т сахара-сырца сопровождается образованием 2,1 т жома. В 1970 г. только в Республике Куба¹³⁾ произвели 21 млн. т багассы, и более $\frac{2}{3}$ этого объема утилизировали как местное твердое топливо. Компонентный состав кубинской багассы показан на рис. 68.

Гидролиз багассы и последующее сбраживание гидролизата обеспечивают высокий, до 52,1 % об. от растворимого вещества жома, выход этанола¹⁴⁾. Минимальные, до 22,6 ГДж/т, удельные энергетические затраты на производство C_2H_5OH из сахарного тростника делают возможным исполь-

¹²⁾ Справочник по торфу. — М.: Недра, 1982. — С. 551—553.

¹³⁾ Жуков Н. И. Структура и направления развития тростниково-сахарного комплекса Кубы // Латинская Америка. — 1978. — № 1. — С. 55—56.

¹⁴⁾ Дмитриев Г. М., Порубова А. Т., Тен Техада. Двухступенчатая биохимическая переработка гидролизатов багассы // Химическая переработка древесного и недревесного сырья. — Л.: ЛТА, 1989. — С. 33—35.

зование полученного спирта в качестве моторного топлива. Так, в Бразилии⁵⁾ в период 1984...1985 гг. из 89,5 млн. т тростниковой массы было выработано 9,5 млн. м³ этанола. По состоянию на 1980 г. весь коммунальный транспорт г. Сан-Пауло потреблял лишь спиртовое топливо. Согласно некоторым оценкам¹⁵⁾, для полного перевода бразильского автотранспорта на С₂Н₅ОН следовало производить ежегодно 30 млн. м³ этанола.

Анаэробное сбраживание. Технология, в зависимости от температурных условий брожения, подразделяется на мезофильный (30...35 °С) и термофильный (50...55 °С) процессы ферментации биомассы. Последняя может быть весьма различной по составу (рис. 69), но имеющий энергетическое значение продукт брожения — **биогаз** — представляет собой смесь метана и оксида углерода (IV), варьирующую в довольно узких пределах. Содержание СН₄ в биогазе¹⁵⁾ изменяется от 50 % при переработке домашнего мусора до 70 %, если ферментируются трава или сосновая хвоя. Нет необходимости упоминать о том, что полезной в топливном смысле компонентой газовой смеси является именно метан, и что соответственно его концентрация определяет теплотворную способность биогаза (рис. 70). Верхним пределом последней является теплотворная способность чистого, осушенного СН₄, равная 41,9 МДж/м³.

Среднее содержание метана в газе анаэробного сбраживания соответствует 60 %. 1 м³ биогаза подобного состава эквивалентен по энергетическому содержанию ~ 0,5 кг дизельного топлива¹⁶⁾. В ФРГ биогаз, содержащий по объему 56,4 % СН₄ и 36,2 % СО₂, успешно применялся как топливо для дизелей. Двигатели удовлетворительно работали на чистом газе и на его смеси с соляром (10...15 % от общего объема горючей смеси).



Рис. 68. Компонентный состав багассы.
По Г. М. Дмитриеву и др. (1989 г.)

¹⁵⁾ Байдукин Ю. А., Бойко А. Я., Пяева О. Д. Использование отходов сельского хозяйства для получения энергии. — М.: ВНИИТЭИСХ, 1981. — С. 12–13, 20, 29, 41–42, 46.

¹⁶⁾ Коломийцев П. А., Солодеников В. Н. Комплексное использование органических отходов для получения высококачественных удобрений и горючего газа. — М.: Гостоптехиздат, 1959. — С. 12–13, 63–66.

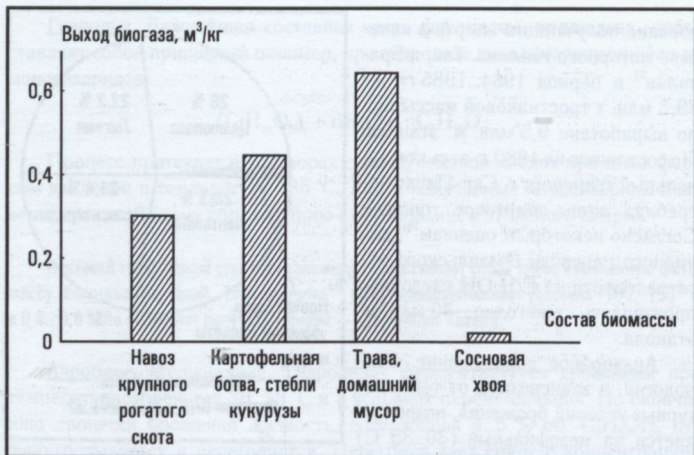


Рис. 69. Удельный выход биогаза при сбраживании биомассы (в пересчете на сухое вещество) различного происхождения. Исходные данные Ю. А. Байдукина и др. (1981 г.)

Как правило, анаэробному сбраживанию подвергаются органические отходы, в т. ч. навоз крупного рогатого скота. Ферментация всего объема навоза, производимого скотооткормочными предприятиями штата Калифорния (США), способна дать 810 тыс. м³/сут метана. Стоимость 1 м³ биогаза оценивается в 0,07 доллара. Твердый остаток биомассы после сбраживания представляет собой высококонцентрированное азотно-фосфорное удобрение и корм для рыбоводческих хозяйств.

Стихийное использование продуктов анаэробного сбраживания известно издавна. По словам великого географа Э. Реклю¹⁷⁾, в 80-х гг. XIX века в штате Пенсильвания (США) «...один фермер утилизировал струю выходящего из выгребной ямы газа для приготовления кленового сахара»... Пламя сгорающего биогаза выпаривало кленовый сок.

В финале этого, по необходимости краткого, описания промышленных и полупромышленных технологий переработки биомассы неизбежно встает вопрос: в чем причины весьма ограниченного использования этого источника энергии вообще и УВсырья в частности? Действительно, биомасса отличается

¹⁷⁾ Реклю, Э. Земля и люди. Всеобщая география. — СПб.: Товарищество «Общественная польза» и К, 1900. — Т. 16. — С. 641.

по крайней мере тремя великими преимуществами. Она — возобновляемое сырье, поскольку связана с энергией Солнца. Она распространена повсеместно, на суше и в Мировом океане, причем подавляющее большинство водной фитомассы (например, водоросли, морские травы и пр.) еще практически не используется. Наконец, сбор и переработка биомассы не ухудшают экологическую обстановку, а если и ухудшают, то существенно меньше, чем традиционные добыча и переработка нефти/газа.

Вместе с тем рентабельность использования биомассы до настоящего времени много ниже таковой для традиционного и в ряде случаев нетрадиционного УВсырья. Это объясняется, во-первых, изначальными свойствами биомассы⁵⁾:

- рассредоточенностью сбора (транспортные затраты превышают $1/2$ всего объема расходов на сбор);
- сезонностью заготовок;
- влажностью, предполагающей затраты тепловой энергии на сушку.

Во-вторых, концентрация потенциальной энергии, или энергетическая плотность³⁾, — показатель, отображающий как теплосодержание сырья и продуктов его переработки, так и трудозатраты на добычу и переработку этого сырья, — биомассы многократно меньше, чем у традиционной нефти. Энергетическая плотность сырой нефти оценивается равной 36 000, древесины же — лишь 9 000 МДж/м³. Для прочих разновидностей биомассы она еще ниже. В самом деле, выработка равного 100 ГДж объема энергии требует трудозатрат³⁾, измеряемых 19 человеко-часами при использовании природного газа и 57 человеко-часами для нефти. Применение же для этой цели этанола, получаемого гидролизом древесной биомассы, эквивалентно затрате 4 032 человеко-часов...

В-третьих, прирост биомассы на суше в различных климатических поясах существенно различен. Он максимален в тропиках⁶⁾ (для сахарного тростника 66 т/(га·год)), на лугах же умеренного пояса не превышает 22 т/(га·год). В Мировом океане темпы прироста огромны. Только биомасса водорослей¹⁸⁾ ежегодно увеличивается на $5,5 \cdot 10^{11}$ т. Однако технологическое использование водной фитомассы предполагает либо развитие добывающего



Рис. 70. Зависимость теплотворной способности биогаза от содержания в нем метана. Исходные данные¹⁵⁾

¹⁸⁾ Водоросли // Лесная энциклопедия. — М.: Советская Энциклопедия, 1985. — Т. 1. — С. 157.

флота океанского класса, либо освоение марикультур искусственного выращивания. Оба этих подхода трудо- и финансово затратны, отличаются высокой энергетической емкостью. Возвращаясь к проблемам переработки сухопутной биомассы, небезынтересно сопоставить удельные энергозатраты на получение 1 т топливного этанола из различного растительного сырья (ГДж):

сахарный тростник	22,6...47,0
кассава (юкка).....	53,4
целлюлоза	84,0

Между тем теплота сгорания этой единичной тонны равна 27 ГДж. Иначе говоря, в большинстве случаев результаты переработки биомассы не окупают затрат энергии на переработку.

Наконец, самая биомасса и продукты ее переработки имеют во многих случаях пищевое значение. Очевидно, что использование развивающимися странами с нищим и полуголодным населением, например, растительных масел в качестве дизельного топлива (табл. 25) способно вызвать лишь самый медленный рост социальной напряженности. Выход из положения возможен в направлении культивирования т. н. энергетических плантаций для специального выращивания растительного сырья на топливо. Но, для сравнения, в Бразилии ради самообеспечения топливным этанолом следовало бы¹⁵⁾ занять 14 % площади страны энергетическими плантациями сахарного тростника и маниоки. В умеренном климатическом поясе площадь таких плантаций должна быть по необходимости много большей.

Сказанное позволяет согласиться с выводами авторов¹⁵⁾ относительно наилучших перспектив промышленно-топливного использования биомассы в странах, наделенных следующими благоприятными предпосылками:

- высоким плодородием почв;
- мягким климатом (тропическим, субтропическим);
- дешевой первичной энергией, необходимой для переработки биомассы.

В частности, в Бразилии, где перечисленные предпосылки, включая гидроэнергетические ресурсы, наличествуют, закономерно создано развитой индустрии топливного спирта. В других случаях биомасса играет и долго еще будет играть сугубо подчиненную роль. Здесь выработка УВсырья из биомассы производится и будет производиться лишь постольку, поскольку имеется острая необходимость утилизации «выбросной» биомассы.

Необходимо вкратце охарактеризовать именно остроту этой проблемы. В продуктах жизнедеятельности человека и домашних животных, слагающих основной объем поступающей на «выброс» биомассы, достаточно редко встречаются токсичные химические соединения и/или патогенные микроор-

ганизмы. Например, в составе домашнего мусора (рис. 71) преобладают, суммарно слагая $\frac{7}{10}$ объема, бумага и разнообразные остатки пищи⁷⁾. Твердая фаза канализационных вод или навоз скота являются, кроме того, богатым органоминеральным удобрением. Поэтому на первый взгляд утилизация «выбросной» биомассы может производиться с минимальными издержками: захоронением в почву, сбросом в реки и моря и т. п.

Эту точку зрения художественно выразил Э. Хемингуэй¹⁹⁾, описывая сброс в прибрежные воды Кубы твердых бытовых отходов Гаваны: «...плывут, такие маленькие, ничтожные, на волне единственно непреходящего — потока Гольфстрима».

В действительности уже самый объем сброса порождает негативные, порой совершенно неожиданные последствия нарушения установившегося экологического равновесия.

В первой половине 70-х гг. XX столетия твердая фаза канализационных вод городов Нью-Йорк и Филадельфия (США) сбрасывалась с барж во внутреннюю часть акватории Нью-Йоркской бухты²⁰⁾. Только в 1974 г. объем сброса составил ~ 4,7 млн. м³. Отстой, будучи тяжелее воды, распространился по дну на расстояние > 30 км от места глубоководной свалки. Аэробное разложение биомассы микроорганизмами повлекло за собой образование больших придонных слоев воды, лишенной растворенного кислорода. В этих слоях произошел «замор» двустворчатых моллюсков, креветок и пр.

Не меньшую опасность представляют могущие находиться в канализационном осадке болезнетворные вирусы (полиомиелита, гепатита и др.). Двустворчатые моллюски, всасывая их из воды, заражают людей, употребляющих моллюсков в пищу.

Во многом аналогично влияние на окружающую среду непрерывно растущих масс твердых бытовых отходов. В бывшем СССР по состоянию на



Рис. 71. Усредненный состав домашнего мусора. Исходные данные⁷⁾

¹⁹⁾ Хемингуэй, Э. Зеленые холмы Африки // Собрание сочинений в четырех томах. — М.: Художественная литература, 1968. — Т. 2. — С. 389.

²⁰⁾ Куллини, Дж. Леса моря. Жизнь и смерть на континентальном шельфе. — Л.: Гидрометеониздат, 1981. — С. 88–89, 177, 181, 257, 262.

1981 г. каждый житель ежегодно⁴⁾ производил от 20 до 380 кг мусора. В городе с трехмиллионным населением, столице Республики Перу Лиме, уже в конце 70-х гг. ежесуточно²¹⁾ образовывалось 3,5 тыс. т твердых бытовых отходов. На их уборку ежемесячно расходовалось 50...75 тыс. долларов США. Официальные и несанкционированные свалки мусора служили пристанищем для крыс. По некоторым оценкам, в Лиме обитало 20 млн. крыс, ежегодно поедавших до 100 тыс. т съестных припасов. Как видно, проблема твердых бытовых отходов, якобы решенная простейшим путем — вывозом мусора на свалки, возвратилась к человеку в виде уже проблемы крыс, обитающих на свалках...

В Европе и США в 1980 г. действовало 368 мусоросжигательных установок с производительностью котлоагрегатов 5...50 т/ч потребляемых твердых бытовых отходов. В Великобритании при выработке тепловой энергии мусор ежегодно замещал 1,5 млн. т угля, в США — 1,1 млн. т нефти.

«Выбросная» биомасса может перерабатываться в УВсырье и использоваться соответствующим образом. Подобный подход позволяет прекратить либо свести до минимума сброс биоорганических отходов, получив при этом газообразное и жидкое топливо. Далее речь пойдет об утилизации трех видов отходов:

- древесных;
- твердых бытовых;
- жидкой и твердой фаз канализационных вод.

Эта «выбросная» биомасса привлекает к себе внимание прежде всего огромным объемом прироста. В 1985 г. лесопильные и деревообрабатывающие предприятия СССР произвели⁴⁾ 90 млн. м³ древесных отходов. Утилизации подверглось только 6...8 % этого объема. Другим положительным качеством твердых/жидких бытовых отходов является высокая степень централизации их производства. Только в одном мегаполисе США, Нью-Йорке, ежесуточно образовывалось²⁰⁾ 37 тыс. т (1974 г.) мусора. Соответственно для переработки мусора и канализационных вод возможно и необходимо открывать крупные промышленные предприятия с развитыми механизацией и автоматизацией производственных процессов. Рентабельность переработки «выбросной» биомассы будет на подобных заводах существенно выше, чем на полкустарных.

²¹⁾ Листов В. В. В стране золотого туми. — М.: Мысль, 1985. — С. 47–49.

§ 1. Переработка древесных отходов

Поленья были как на подбор,
Округл и ровен был их распил,
И точно вонзавшийся в них топор
Ни щепки наземь не обронил...

Р. Фрост

Как говорилось выше, древесина — наиболее энергетически плотная и, следовательно, ценная для переработки разновидность биомассы. Возобновление потребленной древесины протекает в природных условиях достаточно медленно. Отсюда вытекает другой аспект переработки древесных отходов — природоохранный. Действительно, уже в 1981 г. заготовки⁴⁾ стволовой древесины и ее прирост достигли в мировом масштабе равновесия. При этом в ряде регионов Земли основной объем заготовленного дерева, — 78,8 % в Латинской Америке, 88,4 % в Африке, — идет на дрова. (Для сравнения, в США и Австралии данный показатель равен 4,7 и 7 % соответственно). Рост потребления стволовой древесины обгоняет ее естественный прирост. Положение могут изменить к лучшему возделывание массивов т. н. «энергетических деревьев» (сосны, ивы, ольхи) и использование отходов древесины.

Последние можно подразделить по месту и времени образования на лесосечные и переработочные. К лесосечным относятся главным образом порубочные остатки: сучья, ветви, хвоя, листья, вершины деревьев, пни и корни. В современном механизированном лесном хозяйстве лесосечные отходы составляют 15...20, реже до 30 % от объема древостоя. Численно это соответствует накоплению на 1 га вырубке нескольких десятков тонн (!) древесной биомассы. Согласно оценке В. А. Лямина²⁾, 60...70 % объема лесосечных отходов приходится на древесину в различных видах, от пней до обломков сучьев. 18...25 и 12...15 % составляют соответственно кора и щепка. В США⁷⁾ > 55 % объема лесосечных отходов — это пни и корни, т. е. наименее доступные для заготовки части дерева.

Объем переработочных отходов в лесопильной и деревообрабатывающих отраслях исчислялся на начало 50-х гг. XX века равным 32 % от объема производства ликвидной древесины¹⁰⁾. Структура переработочных отходов была тогда такой (в процентном отношении к объему отходов):

сучья.....	34,4
обрезки, стружка.....	31,2
кора.....	15,6

²⁾ Лямин В. А. Газификация древесины. — М.: Лесная промышленность, 1967. — С. 144.

опилки	12,5
неликвидные дровяные обрезки	6,2

Как видно, поэтически описанная в эпитафие экономная разделка древесины остается и до настоящего времени технологически недостижимым идеалом... Впрочем, щепа и переработочные отходы древесины служат в мире предметом достаточно оживленной торговли. В 1982 г. на экспорт, главным образом из США, пошло 14 млн. м³ этой древесной продукции. Основным импортером выступила Япония.

Использование древесной биомассы как таковой на топливо осложняется нерентабельностью перевозок на расстояние > 80 км. Поэтому выработка из древесных отходов УВсырья не имеет альтернативы в современном хозяйстве. При этом возможно творческое использование по крайней мере трех технологий.

Экстракция скипидара. Скипидар состоит в основном из терпенов состава C₁₀H₁₆. Экстракционный путь его извлечения из измельченной сосновой древесины состоит в обработке²³⁾ экстрагирующим агентом (петролевым эфиром, бензином, содовым раствором) и отгонке с паром. Во время второй мировой войны в СССР и Японии использовали скипидар плотностью 855...870 кг/м³ в качестве заменителя бензина, тяжелые фракции сосновой смолы — как суррогат автола. Этот опыт, вызванный дефицитом нефтепродуктов, не получил широкого развития.

Газификация. Древесный газ, содержащий по объему до 29 % оксида углерода (II) и 17...22 % метана, с давних пор применяется в качестве топлива, в т. ч. автомобильного. Газогенераторный транспорт (см. гл. 4) в СССР потреблял т. н. газочурку¹⁰⁾ из березовой древесины, со стандартными размерами и относительной влажностью 8 × 8 × 4 см и ≤ 15 % соответственно. Розжиг генератора и запуск двигателя длились 6,1...8,2 мин. Одной зарядки чурками хватало на 1,5 часа работы трактора при стабильной нагрузке.

В гитлеровской Германии к началу 1943 г. порядка 40 % парка городских автобусов перевели²⁴⁾ на использование генераторного газа. Снижение мощности двигателей из-за более низкой по сравнению с бензином/соляром теплотворной способности древесного газа не имело в данном случае существенного значения. В городском ездовом цикле двигатель автобуса 20...30 % времени работает на холостом ходу. Более серьезными затруднениями стали дефицит газочурки и необходимость частых остановок транспорта для зарядки и очистки генераторов.

²³⁾ Никитин Н. И. Химия древесины. — М.— Л.: изд-во АН СССР, 1951. — С. 408.

²⁴⁾ География нефти. — М.: ИЛ, 1954. — С. 259—260.

Показательная нерентабельность — газочурка даже в лесоизбыточном Советском Союзе обходилась более чем втрое дороже традиционного дизельного топлива — использования такого топлива вынудила в послевоенное время прекратить и самый выпуск газогенераторного транспорта.

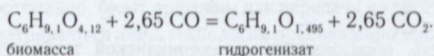
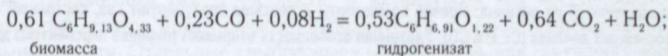
В настоящее время перспективна газификация древесных остатков путем гидрирования. Так, в США⁸⁾ подвергали гидрированию древесину ели-дуглас при атмосферном давлении и температуре 350...600 °С. В экспериментах использовали никелевый катализатор. Биомасса в процессе гидрирования практически полностью превращалась в газ, на 75 % состоящий из метана. Он может использоваться как заменитель природного газа.

Ожижение^{3), 7), 8)}. Данная технология привлекательна возможностью получения различных видов топлива — от котельного до моторного. В Канаде освоено гидрирование водной суспензии (концентрация твердой фазы 11...50 %) древесины тополя в различных условиях (табл. 26).

Табл. 26

Состав гидрирующего газа	Термобарические условия		Состав катализатора	Продукт гидрирования	Выход продукта, % масс. на сухую древесину
	температура, °С	давление, МПа			
CO + H ₂	340	22,4...44,4	Na ₂ CO ₃	УВжидкость	≤ 38,0
H ₂	325...375	10,0	Никель Реней	УВжидкость	15...20,6

Вязкость получаемой УВжидкости варьирует от 5 мПа · с до 55 Па · с при теплотворной способности 23...36 МДж/кг. Указанные характеристики определяются соотношением объемов гидрирующего газа и биомассы. Если это соотношение велико, гидрогенезит имеет пониженную (≤ 50 мПа · с) вязкость и высокую — до 40,8 МДж/кг — теплотворную способность. При малости соотношения, напротив, возрастает вязкость (≥ 17 Па · с) и снижается (не более 29 МДж/кг) теплотворная способность. Химизм процесса ожижения следующий:



В США предлагают ожижать с катализатором Na₂CO₃ истертую от щепы до частиц 100 мкм-в поперечнике древесную массу ели-дуглас. Древеси-

на предварительно осушается вплоть до влажности $\leq 10\%$. Далее она смешивается с частью (рециркулирующей) УВжидкости и поступает в реактор, где гидрируется смесью водорода и оксида углерода (II). Скорость и глубина преобразования биомассы зависят от термобарических условий процесса. При температуре и давлении $300\text{ }^\circ\text{C}$ и $2,9\text{ МПа}$ в течение часа преобразуется 99% от исходной массы древесины. Если же условия более жесткие ($340\text{ }^\circ\text{C}$ и 23 МПа), то за 20 минут будет преобразовано 70% . Выход УВжидкости плотностью 1100 кг/м^3 и теплотворной способностью $31,4\text{ МДж/кг}$ достигает $56\text{--}68\%$ масс. от взятой биомассы. Свыше $9/10$ объема гидрогенизата выкипает в интервале температур $230\text{--}400\text{ }^\circ\text{C}$. Сходство и различие составов древесины и гидрогенизата иллюстрирует табл. 27.

Табл. 27

Содержание, % масс.	Древесина	УВжидкость
Углерод	24,0	77,0
Водород	3,0	6,5
Азот	0,1	0,4
Кислород	22,9	8,4
Вода	50,0	отсутствует

Полученный по любой технологии гидрогенизат является аномально тяжелым, напоминающим по плотности остатки переработки нефтей БРВ, УВ-сырьем. Последнее как таковое может служить котельным топливом. Проведение гидроочистки и гидрокрекинга УВжидкости позволяет получать либо бензин, либо соляр. Состав древесных нефтепродуктов однороден — именно смесь аренов (алкилбензолы, индены) и циклоалканов (преимущественно циклогексан) в соотношении 1:1.

Канадскими экспериментами установлено, что жидкие продукты гидрирования биомассы образуются из лигнина. Прочие компоненты древесины продуцируют газ, состоящий из простейших алканов (C_{1-4}) и CO_2 . Указанная особенность открывает широкие перспективы для переработки гидролизного лигнина, о чем говорилось и прежде.

УВжидкость, образованная по американской технологии ожижения, имеет стоимость $157\text{--}346$ долларов США за 1 м^3 . Следовательно, в современных экономических условиях переработка древесных отходов на жидкое топливо обещает быть рентабельной.

§ 2. Переработка твердых бытовых отходов

Состав домашнего мусора (рис. 71) пестр. Однако основной его объем образует биомасса — бумага (т. е. древесная целлюлоза), пищевые отходы, много меньше древесина и текстиль (совместно 5 %).

Попадая в нетипичные природные условия, твердые бытовые отходы претерпевают существенные изменения. Так, в водоемах отдельные компоненты мусора растворяются, другие измельчаются волнами и течениями, третьи усваиваются водной флорой, фауной и микроорганизмами. Неопределенно длительное время сохраняются пластмассы. Изделия из них массами дрейфуют в Мировом океане, накапливаясь в т. ч. на берегах стран, слабое промышленное развитие которых в принципе исключает их собственный «вклад» в сброс пластиковых отходов. Как сообщает Е. Краснова²⁵¹, на побережье Мавритании «...лазурные воды Атлантики выносили на берег сотни пластиковых бутылок, и первые 20–30 км из двухсот машины ехали по сплошному пластику»... Этот пример подтверждает выход проблемы мусора за пределы государственных границ.

Поэтому переработка твердых бытовых отходов — это в главном и основном рациональное использование именно биомассы с одновременным выделением узких, но ценных компонент типа цветных металлов. Отсюда следует, что утилизация мусора простейшим способом: сжиганием в котлоагрегатах ради получения тепловой (выработка электрической менее рентабельна) энергии — не лучшее решение проблемы в силу низкой теплотворной способности биомассы вообще. Выработка из твердых бытовых отходов УВсырья, от газообразного до углистого твердого, более перспективна уже с энергетической точки зрения. Показательно, что полученные продукты отличаются много большей энергонасыщенностью по сравнению с исходной биомассой. (Например, ожижаемая по американской технологии древесина (§ 1) характеризовалась теплотворной способностью 9,64 МДж/кг. Для полученного гидрогенизата этот параметр превышал 35,6 МДж/кг.) Затем, мусор по определению остается топливом исключительно местного, узкого значения. Продукты же его переработки приобретают более широкое применение. Пиролизный газ, в частности, в металлургии как восстановитель; углистый остаток может служить наполнителем в резинотехнической промышленности. Отдельные «выбросные» производные, как газ гидрогазификации или пиротопливо, будут пригодны для передачи на расстояние. Поэтому ниже рассматриваются лишь технологии превращения мусора в полезные производные топливно-энергетического предназначения.

²⁵¹ Краснова, Е. Берберский след туарегов // Вокруг света. — 2006. — № 2. — С. 164.

Гидрогазификация. В работе¹⁵⁾ описывается переработка твердых бытовых отходов путем гидрирования при температуре 550 °С, под давлением 7 МПа. В результате получали газ преимущественно углеводородного, с содержанием метана и этана порядка 70 % (рис. 72, а), состава. Его теплотворная

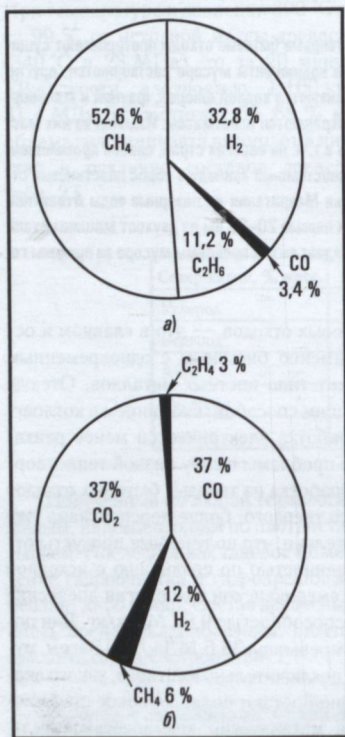


Рис. 72. Объемный состав газов гидрирования (а) и пиролиза (б) мусора. По данным^{15), 7)}

способность составляла 33,5 МДж/м³, т. е. практически $\frac{4}{5}$ таковой для чистого метана. Отсутствие в газе гидрогазификации т. н. кислых газов, — оксида углерода (IV) и сероводорода, — делает его пригодным для подачи в газопроводные сети и использования как топлива для двигателей внутреннего сгорания без дополнительной очистки. Существенная (> 30 % об.) водородная компонента газовой смеси улучшает экологические характеристики газа, поскольку водород — единственное в своем роде чистое топливо, выделяющее при горении только воду.

Пиролиз⁷⁾. В США разработана технология сухой перегонки твердых бытовых отходов при температуре 510 °С. Выход продуктов при ее реализации следующий (в процентном отношении к массе сухого мусора):

газ.....	30
пиротопливо.....	40
углистый остаток.....	20

Газ (рис. 72, б) низкоэнергетический, его высшая теплота сгорания равна 15 МДж/м³. Представляет интерес как местное топливо и/или восстановитель в процессах плавки металлов.

Пиротопливо, как упоминалось ранее, тяжелая (плотность 1 300 кг/м³), вязкая (28 м²/с при температуре 88 °С), нестабильная при хранении жидкость. Она на $\frac{4}{5}$ своего объема смешивается с водой, застывает при температуре + 32 °С. По коррозионной активности пиротопливо сравнимо с органи-

ческими кислотами, по низшей теплотворной способности значительно — 24,6 против 42 МДж/кг — уступает сырой нефти. Считается, что оно может заменить мазут, используемый на ТЭС. Переработка пиротоплива в топливо моторное принципиально возможна путем гидроочистки (содержание кислородных соединений превышает 25 % масс.) и каталитического крекинга/гидрокрекинга. Однако экономическая целесообразность этого процесса вызывает обоснованные сомнения.

Углистый остаток содержит стекло и цветные металлы — цинк, медь и алюминий. Отделение указанных примесей признается технологически эффективным и экономически выгодным. После сепарации стекла и металлической компоненты остаток может быть использован как твердое топливо с теплотворной способностью порядка 19 МДж/кг.

Перспективы переработки твердых бытовых отходов иллюстрирует следующий пример. В 1981 г. только в городах и рабочих поселках бывшего СССР образовалось > 50 млн. т мусора⁴¹. Исходя из предположений о реальной возможности переработки по технологии пиролиза $1/10$ данного объема и о выходе 40 % пиротоплива, производство только последнего следует оценить более чем в 2 млн. т ежегодно. Тогда одно лишь полученное пиротопливо заменило бы > 1,17 млн. т/год НЭ в выработке теплоэлектроэнергии.

§ 3. Канализационная биомасса — источник метана

Проблема переработки канализационных стоков поднялась перед коммунальным хозяйством крупных городов уже в начале XIX столетия. Ее коснулся, в частности, разносторонний ученый Карл Маркс. В третьем томе «Капитала» он писал: «В отношении их (стоков — С. Д.) использования капиталистическое хозяйство отличается колоссальной расточительностью; в Лондоне, например, оно не находит для испражнений $4\frac{1}{2}$ миллиона людей лучшего употребления, кроме как с огромными издержками загрязнять ими Темзу» (Маркс К., Энгельс Ф. Соч., т. 25, ч. 1, с. 112). Характерно, что век спустя в США подобное широкомасштабное загрязнение затронуло шельф Атлантики²⁰, и с теми же негативными последствиями... Непосредственное же использование (например, в качестве удобрения) этой специфической разновидности биомассы осложняется тем, что она представляет собой питательную среду огромного объема для микроорганизмов, в т. ч. болезнетворных. Та же особенность делает возможной утилизацию сточной биомассы на путях ее бактериального разложения с производством метана.

Продуктом аэробного сбраживания городских стоков является аэрационный газ⁵¹. В его составе превалирует метан (процентное отношение к объему):

CH₄.....60..64

углекислый газ	30...35
водород.....	≤ 2

После доведения теплотворной способности газовой смеси до 25 МДж/м³ и более, для чего удаляют СО₂, аэрационный газ может использоваться как топливо в двигателях внутреннего сгорания. В США и бывшей ЧССР ставились успешные эксперименты по переводу автомобилей на аэрационный газ. Продуцирование последнего протекает весьма интенсивно. В частности, на городской станции переработки канализационных вод при населении 100 тыс. человек ежедневно образуется 2 500 м³ газа. По теплотворной способности эквивалентом служит производство 2 м³/сут моторного бензина.

Анаэробная ферментация твердой фазы канализационных вод позволяет получать биогаз с выходом¹⁵⁾ в среднем 0,57 м³ на 1 кг сухого осадка. Темпы и результативность метанового брожения в данном случае близки к максимальным (рис. 69), тогда как содержание СН₄ в газе составляет 70 %. Для этой разновидности биомассы предпочтительнее¹⁶⁾ термофильный процесс ферментации, протекающий с большей скоростью и предусматривающий гибель патогенной микрофлоры. Для обогрева бродительных резервуаров (метантенков) затрачивается известная часть полученного биогаза.

Анаэробное сбраживание осуществляют²⁶⁾ главным образом микроорганизмы рода *Methanobacterium*. Скорость ферментации возрастает пятидесятикратно при внесении в канализационный отстой бактериальной закваски, содержащей штаммы *Methanosursina*, *Methanotrix* и вышеупомянутый.

В двигателях внутреннего сгорания, как указывалось выше, допустимо использование сырого биогаза. Как показывает опыт США⁴⁾, применение биогаза, содержащего до ³/₅ по объему метана, для выработки тепловой энергии обходится вдвое дешевле, чем с использованием газа пиролиза городского мусора. В зависимости от КПД генератора расход 1 м³ биогаза обеспечивает получение 1,5...1,9 кВт·ч электроэнергии. Осушенный и очищенный до 99%-ного содержания СН₄ биогаз может подаваться в коммунальные газораспределительные линии.

Характерными недостатками любых технологий сбраживания биомассы выступают периодичность процесса и трудность регулирования состава газа. Например, содержание СН₄ в биогазе анаэробной ферментации варьирует в пределах 50...80 % при соответствующих (рис. 70) вариациях теплотворной способности. Их крупнейшим преимуществом является возможность создания экологически замкнутой системы утилизации биомассы городских стоков с выработкой энергетических газов (био- и аэрационного), СО₂ для использо-

²⁶⁾ Ножевинкова А. Н. Метаногенез на отходах животноводства // Возобновляемые источники энергии. — Черноголовка: Институт химической физики АН СССР, 1985. — Т. 1. — С. 238.

вания в теплицах/оранжереях и твердых концентрированных удобрений. Кроме того, реализация ферментационных технологий не нуждается в большом производственном персонале при простоте автоматизации процессов.

Согласно оценке⁴¹, только в крупных городах бывшего Союза ССР ежегодно обрабатывалось на станциях очистки канализационных вод до 150 млн. м³ отстоя. Его сбраживание обеспечило бы получение объема горючего газа, эквивалентного 10...12 млн. т НЭ в год.

§ 4. Ближайшие перспективы развития переработки биомассы

Подобного рода оценки по необходимости весьма относительны. Одна из причин тому — интенсивная разработка оригинальных технологий. Например, сообщается²⁷ о переработке на биотопливо кокосового масла (Филиппины), гниющих бананов (Австралия), морского планктона (вероятно, растительного, т. е. фитопланктона) в Японии и пр. Делать же обоснованные выводы относительно практической ценности этих новаций из крайне скудных сведений о них невозможно. Далее автор ограничился описанием только двух, но бесспорно перспективных направлений развития переработки биомассы в УВсырье.

Добыча биогаза на захороненных свалках бытового мусора. Проникновение горючих газов анаэробного разложения биомассы в подвалы и цокольные этажи зданий, построенных на территории погребенных свалок мусора (колтостов), известно издавна. В ряде случаев выделяющийся биогаз пытались утилизировать, и подчас вполне успешно. Так, в Москве один из колтостов находился под таксопарком²⁸. Высачивающимся из-под почвы метаном отапливали вахтерское помещение.

Положительным качеством биогаза, продуцируемого захороненной биомассой, является стабильность — в продолжение нескольких лет — его притоков. Отбор метана²⁹ на одних только колтостах Нью-Йорка оценивался в 160 тыс. м³ ежегодно. В самом деле, крупная погребенная свалка мусора в Канаде продуцировала биогаз в объеме³⁰ > 736 тыс. м³/сут. Для сравнения, высокопродуктивные скважины³¹ Ямбургского газоконденсатного месторождения (Западная Сибирь) вступали в эксплуатацию с дебитами 350...900 тыс. м³/сут.

²⁷ Илюмжинов, В. Преддосылки энергетической революции // Нефть России. — 2004. — № 12. — С. 52–54.

²⁸ Зорькин Л. М., Суббота М. И., Стадник Е. В. Метан в нашей жизни. — М.: Недра, 1986. — С. 141.

²⁹ Ресурсы нефти и газа и перспективы их освоения. — М.: Недра, 1983. — С. 114–115.

³⁰ Финкельштейн М., де Брюн Р., Вебер Дж., Додсон Дж. Остаточные углеводороды: источник добычи биогенного метана // Нефтегазовые технологии. — 2005. — № 12. — С. 34.

³¹ Хафизов Ф. З. Повышение эффективности разведки залежей крупных нефтегазовых комплексов. — Л.: Недра, 1991. — С. 89.

Не исключено освоение в будущем следующей технологии подземной переработки твердых бытовых отходов. Последние после отделения неорганических и неразложимых составляющих (их суммарный объем (рис. 71) не превышает в среднем 25 %) станут захороняться на небольшой, порядка единиц и первых десятков метров, глубине в карьерах. Спрессованный мусор будет целенаправленно заражаться вышеупомянутыми³⁰⁾ культурами метанпродуцирующих бактерий, а на наиболее крупных колтостах — подогреваться до температуры 50...55 °С, обеспечивающей протекание термофильного процесса брожения. (Нагревание может быть реализовано, например, складной греющих нефтепромысловых кабелей.) Отбор биогаза в данном варианте производится из специальных скважин, возможно, с вакуумированием их устьев ради увеличения дебитов газовой смеси. По сути захороненная свалка играет здесь роль гигантского подземного метантенка.

Выращивание и переработка морской фитомассы. Человечество по мере своего развития закономерно перешло от первобытного собирательства съедобных дикоросов к земледелию, вплоть до прогрессивной современной агротехники, использующей передовые селекционно-генетические разработки. Несомненно, сбор перерабатываемой биомассы в перспективе должен смениться целенаправленным выращиванием исходного сырья. Последнее в результате селекционной работы и генной инженерии будет обладать необходимыми для получения УВсырья качествами — от быстрого прироста живой массы до высокого выхода смол, масел и т. п. Многие положительные примеры применения интенсивных агротехнологий биомассы получены в лесоводстве.

В Австралии годовой прирост древесины дикорастущих лесов исчисляется для различных древесных пород следующим образом (м³/га):

лиственные	0,8
хвойные.....	1,4

На плантациях, производящих экспортное пиловочное сырье, эвкалипт дает 10,5...28, сона замечательная — 14,5...24,5 м³/га.

В Республике Конго при помощи генной инженерии выведена³²⁾ уникальная быстрорастущая форма эвкалипта. В течение года дерево вырастает на 7 м (!). Для сравнения, дикая лиственница в Сибири достигает промышленных показателей только через 150...200 лет роста.

В этой области имеет будущее выращивание (см. § 1) специальных (вероятно, генетически измененных) «энергетических деревьев» на плантациях.

³²⁾ Эвкалипт // Лесная энциклопедия. — М.: Советская Энциклопедия, 1986. — Т. 2. — С. 570—571.

Но большее значение обнаруживает водная, преимущественно морская биомасса. Прежде всего, ее масса действительно грандиозна. О массе, например, рыбы промысловых пород дают понятие ее мировые уловы, в среднем равные²⁰⁾ ~ 55 млрд. т ежегодно при максимуме 70 млрд. т. Прирост же фитомассы одних лишь водорослей¹⁸⁾ превосходит $\frac{1}{4}$ всей биомассы Земли! Перспективность водорослей Мирового океана как сырья для переработки на УВ основывается на свойственным им широкой распространенности во всех морях (включая арктические и антарктические), большой массе, быстром приросте этой массы, относительно малом употреблении в пищу людьми и домашним скотом, а также опыте искусственного выращивания съедобных разновидностей. (В КНР на площади в 20 тыс. га ежегодно⁷⁾ снимали урожай в 150 тыс. т сухой массы ламинарии, известной в нашей стране как «морская капуста».)

Разработанные в США^{7), 20)} проекты извлечения из водорослевой биомассы УВтоплива предусматривают культивирование бурых водорослей двух порядков — ламинариевых (роды *Laminaria*, *Macrocystis*, *Nereocystis* и др.) и фукусовых (роды *Fucus*, *Sargassum* и т. п.). Особый интерес вызывает *Macrocystis pyrifera* (рис. 73), слоевища которой ежедневно отрастают на 3 дм, т. е. в среднем на 25 м в течение четырех месяцев. Слоевища поддерживаются в вертикальном положении благодаря множеству воздушных пузырьков у оснований листовидных пластинок. Поэтому возможно выращивание водорослей на т. н. «ложном дне» — натянутой на легкую складную раму нейлоновой сети с поддерживающим столбом в центре. «Ложное дно» похоже в плане на опрокинутый зонтик поперечником до нескольких сот метров, затопленный на глубине порядка 20 м. Согласно некоторым оценкам, ежегодный сбор биомассы с верхней части водоросли обеспечит получение 5,6...23,5 млн. т сухой массы на площади в 1 км². Темп прироста при этом составит 18 % ежесуточно, т. е. восстановление всего объема снятой массы произойдет в срок, меньший недели.

Переработку водорослевой биомассы на УВ предполагается⁷⁾ проводить путем анаэробного сбраживания с получением метана. Применение для этой цели бактерий культур, выделенных из жидкой и твердой фаз канализационных стоков, позволило добиться выхода 1,56 м³ СН₄ со 100 кг мокрых водорослей. Перед ферментацией биомасса измельчается, растирается и после добавления 5...10 % масс. воды поступает в метантенки. Брожение происходит в температурном режиме 35...55 °С. Разложение исходного сырья завершается за 10...20 суток. Бактериальное расщепление водорослей облегчается отсутствием в их тканях лигнина. Твердый остаток брожения, богатый калием, предполагается скармливать домашнему скоту, экологически замыкая производственный цикл. По расчетам, в отношении выхода метана при анаэробном сбраживании водоросли эффективнее, чем бытовой мусор, трава или навоз крупного рогатого скота.

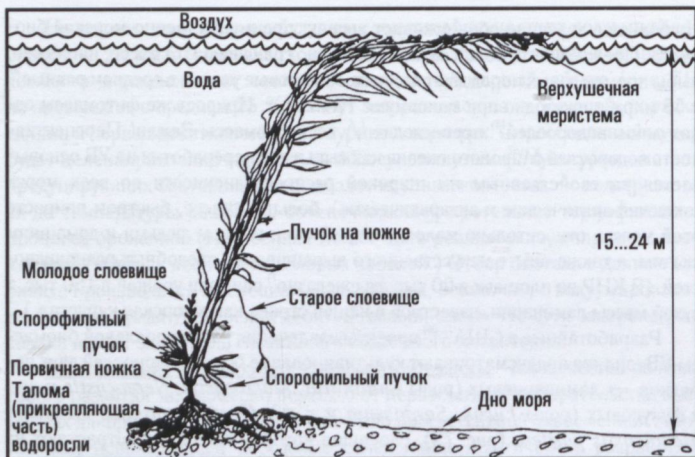


Рис. 73. Строение бурой водоросли *Macrocyctis pyrifera*. Заимствовано в работе⁷⁾

Дж. Куллини²⁰⁾ считает рациональным выращивать бурые водоросли на дрейфующих в океане полупогруженных основаниях. «Огромные дрейфующие морские леса, вероятно, будут обслуживаться людьми на небольших, но мореходных судах. Они будут постоянно следить за направлением движения этого большого, погруженного в море препятствия. Время от времени водоросли придется отводить буксирами от морских путей и островов... Сбор урожая и обработку можно будет производить на плавучих заводах (аналогах плавбаз в рыбной промышленности — С. Д.), после чего складные поля будут возвращаться в исходный пункт». Автор сообщает, что специалистами военно-морского флота США освоена технология сбрасывания водорослевой биомассы в жидкую смесь низкомолекулярных УВ и спиртов. Она может служить как горючим, так и заменителем нефти в изготовлении пластмасс. Относительно технологии ферментации сообщается только то, что для получения одного барреля (0,159 м³) жидкой смеси необходима переработка многих тонн водорослей.

Марикультура в открытом океане, подобно океаническому рыболовству, неизбежно включает в себя тяжелый и опасный труд людей, обязательно связана с содержанием и эксплуатацией флота. Последний аспект затрагивает проблему рентабельности затрат судового УВтоплива — дизельного, бункерного — на добычу водорослевой биомассы. Следует полагать, что бли-

жайшие перспективы освоения добычи и культивирования морской фитомассы будут связаны все-таки с прибрежными водами. Здесь бесспорный интерес представляют морские травы (*Thalassia*). Их натуральная биомасса содержит лишь 50...55 % масс. воды, что существенно меньше, чем у водорослей, и что значительно повышает ее ценность для переработки. Кроме того, они поселяются на относительно малых глубинах, поэтому доступны как для промысла, так и для разведения.

Как пример уместно рассмотреть т. н. черепашую траву, или сейбу (*Thalassia testudinum*), обитающую у побережий Центральной и Южной Америки. В прибрежных водах северо-западного побережья Кубы³³⁾ она развивается от берега до глубины 5...11 м. Плотность фитомассы морской травы в этом районе (рис. 74) равна в среднем ~ 4 кг/м², общая же масса такова (млн. т):

свежая.....	8
сухая.....	0,5

Прирост биомассы достаточно интенсивен. Стебли черепашей травы в благоприятных условиях отрастают еженедельно на 20 мм. Вполне очевидно, что целенаправленное разведение значительно повысит продуктивность *Thalassia testudinum*. В частности, в природных условиях черепашая трава на глубине ≤ 11 м усваивает лишь 2 % от объема падающей солнечной энергии. Культивирование на «ложном дне», в плавучих садках и т. п. позволит увеличить долю поглощаемой морской растительностью солнечной радиации, т. е. скорость и объем прироста.

Дальнейшим развитием марикультуры явится, по-видимому, выращивание микроводорослей на поверхности замкнутых водоемов с помощью специальных установок, утилизирующих солнечную энергию³⁴⁾. Затем эти водоросли будут сбраживаться в метан. При КПД установки, равном 8 %, на площади водной поверхности в 1 м² ежегодно генерируется 14,3 кг НЭ. Промышленная реализация проекта на поверхности Аральского моря (до прогрессирующего усыхания площадь 66...67 тыс. км²) приносила бы 1 млрд. т НЭ в год, или 1/10 мирового производства энергии на 1975 г. Однако описанный подход требует решения многих проблем, в т. ч. защиты солнечных установок от штормовых ветров и волн.

Крупные успехи в переработке морской биомассы на УВсырье, прежде всего жидкое топливо, достигнуты японскими специалистами³⁷⁾. Из 2 кг

³³⁾ Головань Г. А. По дну тропического моря. — М.: Мысль, 1978. — С. 101–103.

³⁴⁾ Алексеев В. В., Лямин М. Я. Перспективы развития солнечной биоэнергетики на установках «Биосоляр» // Возобновляемые источники энергии. — Черноголовка: Институт химической физики АН СССР, 1985. — Т. 1. — С. 215–216.

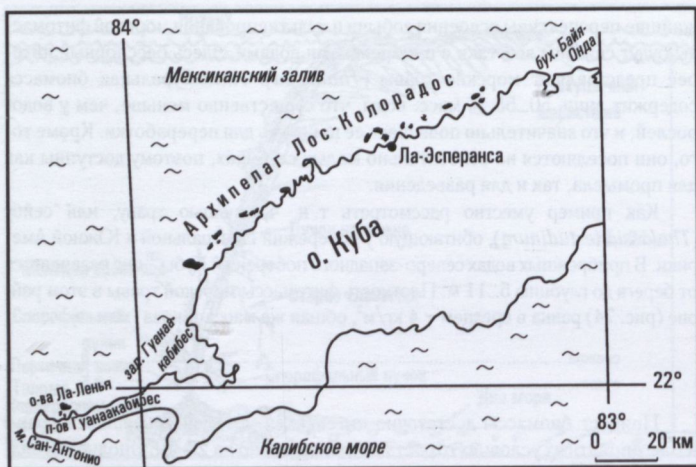


Рис. 74. Северо-западное побережье Кубы. Заимствовано из «Национального атласа Кубы» (1970 г.). Мелководье в районе полуострова Гуанаакаибес — естественный питомник черепашьей травы

планктона (неясно, идет речь о фито- или зоопланктоне; по-видимому, всё же о первом) получают 1 кг смеси жидких УВ с дальнейшим выходом по массе 6,2 % высокооктанового (число 95) бензина и 1,5 % керосина. Приняв данные пропорции для ежегодной переработки 300 тыс. т сухой массы черепашьей травы, т. е. $\frac{3}{5}$ годового естественного прироста *Thalassia testudinum* в кубинских водах, объем производства бензина и керосина оценим в 18,6 и 4,5 тыс. т соответственно. Сбраживание того же объема фитомассы даст > 8,4 млн. м³ метана ежегодно.

* * *

Биомасса служит источником энергии с тех незапамятных времен, когда в костре первобытного человека сгорала древесина. Еще в дореволюционной России на рубеже XIX и XX веков значительная часть локомотивного парка работала на дровах. Не составил исключения и паровоз, на котором В. И. Ленин в августе 1917 г. конспиративно уезжал в Финляндию³⁵⁾: «А что касается дров, то... Ильич, легко взобравшись на дровяной штабель, с необычайной

³⁵⁾ Ялава Г. Э. «Кочегар» паровоза № 293 // Воспоминания о В. И. Ленине. — М.: Политиздат, 1984. — Т. 2. — С. 426.

сноровкой и ловкостью начал аккуратно укладывать дрова в клетку». До сих пор биомасса, главным образом древесная, продолжает формировать топливно-энергетический баланс слаборазвитых стран. Например, в структуре данного баланса Республики Никарагуа (Центральная Америка) по состоянию на 1981 г. дрова, багасса и древесный уголь (также производное от древесины) составляли³⁶⁾ 46; 9; 1 % соответственно. Для сравнения следует привести аналогичные характеристики для нефти и электрической энергии — 38 и 6 %. Дефицит «традиционной» нефти, рост мировых цен на нее побуждает к использованию биомассы в топливно-энергетических целях и государства с передовой экономикой.

Показателен пример Западной Европы³⁷⁾, в которой ежегодно производится > 2 млн. т т. н. биодизельного топлива — метиловых эфиров растительных (в основном рапсового) масел. Цетановые числа биодизельного топлива в зависимости от исходного сырья варьируют в пределах 52...70. Широкому использованию этого продукта переработки биомассы в качестве моторного топлива препятствует ряд его свойств:

- недостаточная стабильность ввиду наличия непредельных соединений;
- ограниченная совместимость с традиционным нефтяным соляром;
- высокие ($-12\text{ }^{\circ}\text{C}$ для эфира подсолнечного масла) температуры застывания.

Кроме того, полный переход на метилэфиры требует серьезных изменений в структуре хранения и распределения топлива. Поэтому потребление биодизельного топлива главным образом сводится к подмешиванию (при концентрации $\leq 5\text{ \% об.}$) к традиционному соляру.

Вышеуказанных недостатков лишено дизельное топливо, получаемое из биомассы по технологии «BTL», сущность которой не раскрывается, исключая указание на использование в процессе свободного водорода. Данное биотопливо стабильно, совместимо (до концентрации в 65 % об.) с нефтяным соляром и обладает теплотворной способностью 44 ГДж/т. Для сопоставления, аналогичный показатель метилэфиров соответствует 38 ГДж/т. В г. Порво (Финляндия) строится установка, способная производить по методу «BTL» 170 тыс. т биотоплива ежегодно.

Отдельный, но весьма важный аспект использования биомассы — насущная необходимость утилизации «выбросной» биомассы. Согласно дан-

³⁶⁾ Никарагуа // Горная энциклопедия. — М.: Советская Энциклопедия, 1987. — Т. 3. — С. 496.

³⁷⁾ Коскинен М., Сурандер М., Нурминен М. Комплексный подход к биотопливам // Нефтегазовые технологии. — 2006. — № 6. — С. 104–107.

ным⁷⁾, в США ежегодно образуется 28,2 млн. т (в пересчете на 70%-ную влажность и по состоянию на начало 80-х гг.) только твердой фазы бытовых сточных вод. Анаэробная ферментация всего объема биомассы данного вида позволила бы получить не менее 8 млрд. м³ чистого метана в год. Выработанного биогаза должно было хватить для бытового обеспечения 80 млн. жителей. Биомасса, в отличие от традиционного и большей части нетрадиционного УВсырья, распространена повсеместно (что в отношении тех же канализационных стоков выливается в проблему), возобновляема и поддается искусственному возобновлению, не нуждается в реализации сложных геотехнологий добычи.

Однако широкое ее использование как промышленного источника УВсырья обусловлено случайным совпадением на данной территории благоприятных аграрно-климатических условий и богатой энергоресурсной базы углеводородного происхождения. Отсутствие хотя бы одного из этих слагаемых ограничивает роль биомассы до незначительной. В Бразилии возможность применить для дистилляции этанола дешевую гидроэлектрическую энергию и сжигание багассы решила вопрос крупномасштабного производства спиртового моторного топлива. Напротив, в бедном энергетическими ресурсами Таиланде дело не пошло дальше³⁸⁾ экспериментов по смешиванию нефтяного керосина с кокосовым маслом для получения дешевого (200 долларов США за 1 м³) заменителя соляра. Отсюда становится ясной объективная причина, благодаря которой грандиозный энергетический потенциал биомассы используется теперь лишь на ничтожную часть.

³⁸⁾ Тайцы научились заправлять машину кокосовым маслом // Советская Россия. — 2001. — № 60. — С. 6.