



Г. Я. Кабо, А. В. Блохин,
В. В. Сими́рский, О. А. Ива́шкевич

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

В последнее время во многих странах мира существенно возросла активность разработки технологий получения энергоносителей на основе растительной биомассы. Это связано с существенным удорожанием традиционных химических источников энергии, увеличением техногенного воздействия на окружающую среду, стремлением стран обеспечить достаточную энергонезависимость, необходимостью создания новых рабочих мест.

В ряде стран достигнут существенный технический прогресс в производстве энергии из биомассы. Так, в Австрии, Дании, Германии, Финляндии и Швеции производится от 5 до 20 % топлива из биомассы в общем энергетическом балансе этих стран. Активно разрабатываются технологии получения топлива из биомассы даже в таких странах, как Россия и США, которые обладают значительными запасами традиционных видов топлива: угля, нефти и природного газа [1].

В Беларуси существует ряд предприятий небольшой мощности, выпускающих топливные гранулы (пеллеты) из древесины, при этом используется модифицированное оборудование (сушилки и грануляторы-пресса), разработанное для выпуска гранулированных кормов. В 2007—2008 гг. Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь запланировало создание новых производств по выпуску древесных пеллет в Житковичах и Столбцах с мощностью установок до 15 тыс. т в год. Стоимость каждой установки составит около 450 тыс. евро [2]. НИИ ФХП БГУ совместно с концерном «Белнефтехим» в 2006—2007 гг. реализован проект по организации производства дизельного топлива (биотоплива) мощностью 5 тыс. т в год на основе переэтерификации рапсового масла [3].

В 2005—2006 гг. внутреннее потребление энергоресурсов Республики Беларусь составило 27,3—28,3 млн т у. т. [4, 5], где доля топлива из растительного сырья (за исключением древесных видов топлива, примерно 1 млн т у. т. в год [5]) остается неоправданно низкой.

Ресурсы имеющегося в нашей республике возобновляемого сырья позволяют радикальным образом увеличить мощности по выпуску топлива из растительной биомассы без уменьшения продовольственного потенциала. Из расти-

тельного сырья могут быть выпущены три вида топлива, различающихся по фазовому состоянию:

- твердое топливо;
- жидкое топливо, получаемое в результате переэтерификации масел и брожения углеводов;
- газообразное топливо, получаемое в результате термической переработки твердого топлива или сбраживания растительной биомассы.

В настоящей работе представлены результаты анализа технической целесообразности и экономической эффективности получения каждого из видов топлива на основе данных об имеющихся ресурсах растительной биомассы в Республике Беларусь, их физико-химических свойствах и возможности привлечения новых технологий и видов растительных культур для производства топлива.

РЕСУРСЫ РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

Наиболее доступными ресурсами для производства топлива из возобновляемых источников сырья являются древесина, солома зерновых культур, крахмалосодержащие сельскохозяйственные культуры (картофель, свекла) и масличные культуры (рапс).

Известно, что элементный состав и теплота сгорания различных видов растительной биомассы достаточно близки (табл. 1) [6]. Поэтому, например, при выборе источника растительного сырья для производства твердого топлива необходимо исходить из следующего: доступности различных ресурсов; их стоимости и технологической возможности производства данного вида топлива для эффективного технологического использования в котельных установках.

Таблица 1

**Элементный состав и энергия сгорания (высшая)
различных видов растительной биомассы**

Свойства/Биомасса	Целлюлоза	Лигнин	Древесина	Солома	Зерновые	Трава
Элементный состав:						
С, масс. %	44,5	65,9	47—51	42—47	43—60	37—47
Н, масс. %	6,2	4,9	5,7—6,3	5,1—6,0	6,4—7,2	5,1—6,2
О, масс. %	49,3	23,0	39—44	39,1—43,8	24—46	33—42
N, масс. %	0	0,7	0,13—0,54	0,4—1,1	1,7—3,9	0,7—1,5
Зола, масс. %	0	5,1	0,5—4,0	3,8—12,2	2,0—4,6	3,9—23
$\Delta_c U^\circ$, МДж · кг ⁻¹	17,4	20,6	18,4—19,2	15,8—17,7	17,0—26,5	14,1—17,6

Оценка энергетической эффективности различных видов растительной биомассы и их компонентов (табл. 2) выполнена на основании данных Министерства статистики и анализа Республики Беларусь по средней урожайности и валовому сбору сельскохозяйственных культур за 2007 г. [4] и значений высших энергий сгорания, полученных нами методом бомбовой калориметрии сгорания [3, 7, 8].

Средние выходы соломы зерновых культур и соломы рапса с 1 га оценены по данным работы [9]. Для расчета выхода стеблевой массы кукурузы (на зерно) с 1 га использовалось соотношение «масса стеблей/масса зерна» = 2,2 (по данным Центра аграрной экономики Института экономики НАН Беларуси). Количество картофельной ботвы с 1 га оценено исходя из того, что на 1 т сырых клубней приходится примерно 0,08 т ботвы [10]. В расчетах принято, что влажность соломы зерновых культур, соломы рапса и стеблевой массы кукурузы (на зерно) составляет 17 % [11—12], картофельной ботвы — 25 % [10].

Таблица 2

**Энергетические характеристики некоторых видов биомассы растений
 в расчете на сухое вещество**

Вид биомассы	Энергия сгорания (высшая), $-\Delta_c H^\circ$	Средняя урожайность/сухое вещество	Энергетическая эффективность биомассы на 1 га**		
	ГДж · т ⁻¹		т · га ⁻¹	ГДж · га ⁻¹	т у. т. · га ⁻¹
Основные ресурсы растительной биомассы в Республике Беларусь					
Солома зерновых	18,3	2,6/2,2	40,3	1,38	0,96
Стебли кукурузы (на зерно)	18,3	11,2/9,3	170,2	5,81	4,07
Ботва картофеля	15,0	1,7/1,3	19,5	0,67	0,47
Солома рапса	18,2	2,5/2,1	38,2	1,30	0,91
Клубни картофеля	16,2	21,2/5,3	85,9	2,93	2,05
Свекла	(16)1	38,7/9,7	155	5,3	3,7
Масло рапса	39,6	~0,37	14,7	0,50	0,35
Потенциальные эффективные источники растительной биомассы в условиях Республики Беларусь					
Стебли кукурузы (зеленая масса)	18,3	55/15	274,5	9,37	6,56
Стебли топинамбура	(18)*	95,7/27,5	495	16,9	11,8
Клубни топинамбура	(16)*	63,5/14,4	230	7,8	5,5

* Оценочные величины.

** т у. т. — тонна условного топлива (29,3 ГДж · т⁻¹), т н. э. — тонна нефтяного эквивалента (41,84 ГДж · т⁻¹).

Поскольку энергии сгорания различных видов растительной биомассы изменяются в пределах $\pm 15\%$ (см. табл. 2), энергетическая эффективность сельскохозяйственных культур в большей мере определяется урожайностью биомассы. Так, по данным табл. 2 следует признать наиболее энергоэффективными в условиях Беларуси стеблевые массы кукурузы и топинамбура. Даже в тех случаях, когда энергии сгорания компонентов биомассы различаются существенно:

$$39,6 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ (рапсовое масло)} > 18,2 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ (солома рапса)} > \\ > 16,2 \text{ МДж} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ (ботва картофеля),}$$

высокая урожайность обеспечивает значительно большую энергоэффективность данного компонента в расчете на 1 га:

$$38,2 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1} \text{ (солома рапса)} > 19,5 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1} \text{ (ботва картофеля)} > \\ > 14,7 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1} \text{ (рапсовое масло)}.$$

Другим существенно важным показателем является годовой объем производства растительной биомассы в Беларуси (рис. 1). Годовой энергетический ресурс данной культуры (или ее компонента) оценен как произведение «условного количества га», занятого данной сельскохозяйственной культурой (зерновые, рапс, кукуруза на зерно, картофель, свекла), на соответствующую величину энергетической эффективности, выраженной в т н. э. \cdot га⁻¹ (см. табл. 2). «Условное количество га» найдено как отношение валового сбора данной культуры (зерна, клубней) к ее средней урожайности за 2007 г. [4].

Если допустить, что 20 % урожая соломы зерновых культур и 100 % стеблевой массы кукурузы, выращенной на зерно, может быть полностью использовано для производства твердого топлива, то суммарный топливный ресурс соломы зерновых культур, соломы рапса, стеблевой массы кукурузы и ботвы картофеля (по сути отходов сельскохозяйственного производства) равен ~1,25 млн т н. э. в год или ~1,78 млн т у. т. в год, что составляет ~6,3 % от внутреннего энергопотребления нашей республики в 2006 г.

В последнее время в различных странах Европы проводятся работы по выращиванию энергоинтенсивных культур с большим выходом сухой биомассы с 1 га [1]. В качестве таких культур в условиях Беларуси целесообразно исполь-

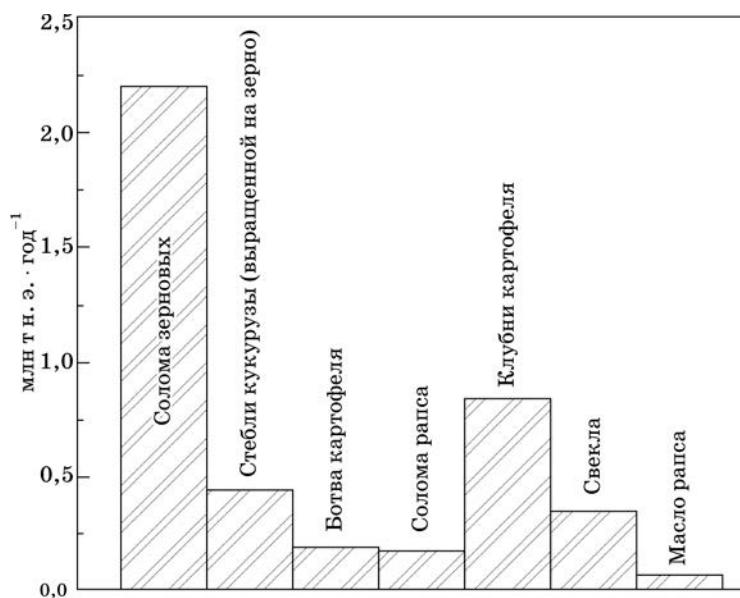


Рис. 1. Годовой энергетический ресурс биомассы некоторых растительных культур и их компонентов в Республике Беларусь (по данным 2007 г.)

зовать топинамбур и мискантус (слоновья трава), растения семейства гречишных — горец забайкальский, горец Вейриха, сильфейю пронзеннолистную и т. п. Согласно данным Центрального ботанического сада НАН Беларуси, на средних по плодородию почвах при низких дозах минеральных удобрений средний сбор сухого вещества надземной части топинамбура составляет $27,5 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$, а клубней — $14,4 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$. Таким образом, выход сухой массы стеблевой части топинамбура более чем в 10 раз превышает урожайность соломы зерновых и рапса и почти в 2 раза урожайность стеблей кукурузы в расчете на сухое вещество (см. табл. 2). Поэтому энергетическую ценность биомассы топинамбура, вероятно, следует считать наивысшей среди сельскохозяйственных культур, которые могут выращиваться на территории Беларуси.

СПОСОБЫ ПЕРЕРАБОТКИ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР В РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА

Существует принципиальная возможность получения из растительного сырья газообразного, жидкого и твердого топлива (рис. 2). Результаты анализа возможности, технической целесообразности и экономической эффективности получения каждого из видов топлива приведены ниже.

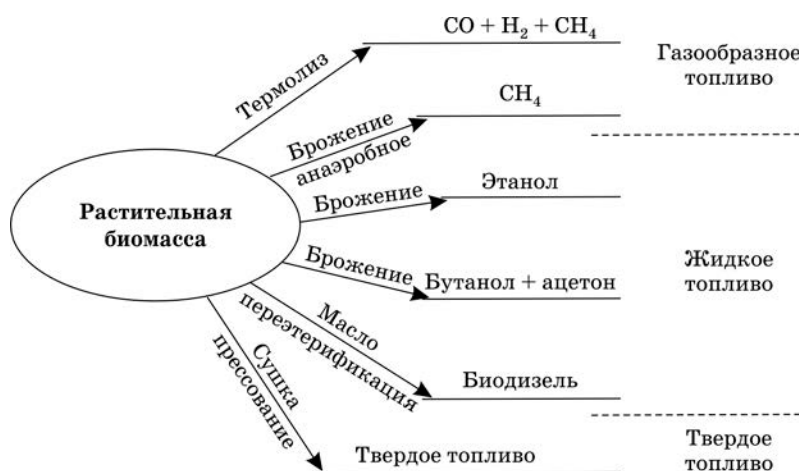


Рис. 2. Производство топлива из биомассы растительных культур

ГАЗИФИКАЦИЯ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

Известно большое число разработок, позволяющих получить из биомассы растительных культур топливные газы. При этом используются две принципиально различающиеся технологии:

- 1) анаэробное брожение — метановое сбраживание растительных культур;
- 2) термическая газификация в присутствии воздуха и водяного пара.

Микробиологическая газификация биомассы растений требует соблюдения ряда существенно важных условий:

- 1) поддержание стабильных температур;
- 2) отсутствие примесей, подавляющих активность микроорганизмов;
- 3) использование больших объемов биомассы из-за малой скорости процессов микробиологической газификации;
- 4) малый объем выхода топливных газов на 1 т исходной биомассы.

Анаэробная конверсия в метан

Биогаз, образующийся при метановом сбраживании биомассы, представляет собой смесь, состоящую из 50—80 % метана, 20—50 % углекислого газа, примерно 1 % сероводорода, а также незначительного количества некоторых других газов (азота, кислорода, водорода, аммиака, закиси углерода и др.). Выход биогаза при использовании различных типов растительного сырья представлен в табл. 3.

Таблица 3

Выход биогаза и содержание в нем метана
при использовании различных типов сырья [13]

Тип сырья	Выход газа, м ³ (на 1 кг сухого вещества)	Содержание метана, %	Выход метана в среднем, кг (на 1 кг сухого вещества)
Картофельная ботва	0,280—0,490	60—75	0,124—0,216
Свекольная ботва	0,400—0,500	85	0,222—0,278
Пшеничная солома	0,200—0,300	50—60	0,072—0,108
Солома ржи	0,200—0,300	59	0,077—0,116
Ячменная солома	0,250—0,300	59	0,097—0,116
Овсяная солома	0,290—0,310	59	0,120—0,120
Кукурузные стебли	0,380—0,460	59	0,147—0,178
Листья деревьев	0,210—0,290	58	0,080—0,110

Энергоемкость биогаза (с 60 % содержанием CH₄) равна 22,3 МДж · м⁻³ [14], что эквивалентно сгоранию 0,6 л бензина, 0,85 л спирта или 1,7 кг дров. Энергоемкость сухой биомассы составляет 15—18 МДж · кг⁻¹ (см. табл. 2). В среднем из 1 кг сухой биомассы возможно получить 0,300 м³ биогаза с содержанием метана около 60 % (~180 л или ~118 г метана). Энергоемкость данного количества биогаза составляет 6,7 МДж, т. е. по сравнению с прямым сжиганием наблюдается значительная (более чем в 2 раза) деградация энергосодержания 1 кг исходного продукта.

В Каменецком районе Брестской области в 1980-х гг. была построена установка КОБОС-1, которая перерабатывала 50 м³ навоза в сутки и производила 400—500 м³ биогаза, или (если принять, что содержание метана составляет 60 %) примерно 196 кг метана в сутки (8 кг метана в час).

К производству биогаза относится также получение лендфиллгаза, или биогаза из мусора со свалок [15]. В настоящее время во многих странах создаются специально обустроенные хранилища для твердых бытовых отходов (ТБО) с целью извлечения из них биогаза для производства электрической и тепловой энергии. При производстве лендфиллгаза путем газификации ТБО из 1000 кг отходов с добавлением кислорода и природного газа (514 кг) получается: лендфиллгаз (890 кг), минеральные вещества (230 кг), металлы (29 кг), сера (2 кг) цинковые соединения (3 кг), смесь солей (10 кг), вода (350 кг). В США к 2002 г. находилось в эксплуатации 350 заводов по производству лендфиллгаза, в Европе — 750, всего в мире — 1152. Общее количество производимой ими энергии — 3929 МВт, объем обрабатываемых отходов — 4548 млн т.

Термокаталитическая газификация

При термической газификации твердой биомассы часть энергии тратится на достижение высоких температур превращения, компенсацию эндотермических эффектов реакций, и в результате получаются газы с низким содержанием горючих компонентов (примерно 15—25 % CO и 12—15 % H₂, менее 5 % CH₄) и с большим содержанием азота, водяного пара и углекислого газа [16, 17]. Теплота сгорания генераторного газа не превышает 6 МДж · м⁻³, что примерно в 6 раз ниже соответствующего параметра для природного газа.

Удаленность источника газогенераторного топлива от установок ведет к существенным потерям топлива за счет снижения очень высокой температуры генераторного газа (до 1000 °С) при транспортировке. Процесс генерации газа обязательно сопровождается существенной энергетической деградацией исходного твердого топлива (до 50 %). В настоящее время рекомендуются к использованию котельные агрегаты, в которых газогенераторы соединяются непосредственно с котлами, в топках которых происходит дожигание топливного газа и конденсированных побочных продуктов газогенераторных процессов. Такие схемы сжигания фактически усложняют конструкцию топки и не могут дать существенных энергетических преимуществ по сравнению с прямым сжиганием твердого топлива.

Однако газогенераторные процессы позволяют получать смеси газов, которые после химической переработки можно использовать в качестве сырья для получения водорода, диметилового эфира, метанола и других спиртов. Для того чтобы эти процессы были экономически эффективны и экологически безопасны, следует (так же как в аналогичных процессах в нефтехимическом синтезе) провести детальное исследование термодинамических свойств различных видов растительной биомассы и термодинамический анализ различных способов газификации для обоснования наилучших условий переработки твердой биомассы в газообразные продукты необходимого состава.

На основании полученных нами значений значений сгорания и теплоемкости целлюлозы были выполнены расчеты равновесных составов продуктов ее термолитиза. Некоторые результаты расчетов представлены на рис. 3.

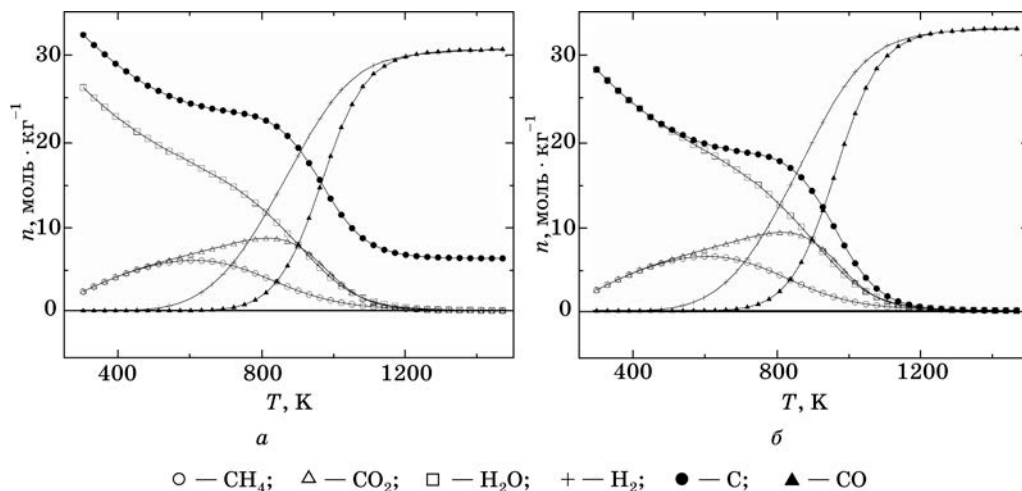


Рис. 3. Равновесные составы продуктов термолитза целлюлозы:
 а — пиролиз целлюлозы; б — гидротермальная газификация целлюлозы
 (целлюлоза : H_2O = 1 : 1)

Видно, что в условиях термодинамического контроля как в результате пиролиза, так и гидротермальной газификации целлюлозы максимальное содержание CO и H_2 в смеси достигается при проведении процессов при температурах выше 1200°C . Полученное в этих условиях количество CO и H_2 по энергии сгорания практически эквивалентно исходной целлюлозе (термодинамический выход близок к 90 %) без учета затрат энергии на достижение высоких температур превращения.

Таким образом, газификация растительной биомассы (микробиологическая и термокаталитическая) приводит к существенной энергетической деградации исходного сырья. Поэтому для получения топливного газа газификации следует подвергать такие субстраты, из которых получение твердых видов топлива высокого качества экономически и технически нецелесообразно. Однако газификация может служить способом получения газов для последующей химической переработки в химические реагенты и топлива высокой стоимости. Вероятно, основным направлением в газификации следует считать реализацию термокаталитических процессов с максимальными выходами синтез газа ($\text{CO} + \text{H}_2$). Эти процессы потребуют фундаментальных исследований термодинамических свойств биомассы в широких интервалах температур от 270 до 2000 K с последующим проведением термодинамического анализа процессов газификации с участием воздуха, водяного пара при различных температурах и давлениях для термодинамического обоснования режимов, позволяющих получить максимальный выход целевых компонентов. Такая работа проводилась при создании нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств и позволила достичь их высокой экономической эффективности и экологической безопасности.

ПРОИЗВОДСТВО ЖИДКИХ ВИДОВ ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

Из биомассы растительных культур могут быть получены следующие виды жидкого топлива:

- 1) эфиры жирных кислот как аналог дизельного топлива (биодизель) — перэтерификацией растительных масел;
- 2) этанол, биобутанол и ацетон как компоненты легкого моторного топлива — сбраживанием биомассы.

Получение этих видов жидкого топлива предполагает использование продовольственных ресурсов и поэтому нуждается в особенно тщательном экономическом анализе.

В Беларуси основной масличной культурой является рапс. В соответствии с программой развития масложировой отрасли Республики Беларусь на 2007—2010 гг. производство масла рапса должно быть доведено до 154 тыс. т в год. Из такого количества масла может быть получено до 150 тыс. т биотоплива, эквивалентного в среднем 207 тыс. т у. т. Такое количество топлива в годовом энергопотреблении Республики Беларусь составляет лишь около 0,7 % и не может существенным образом изменить структуру энергопотребления в государстве, тем более что значительную часть рапсового масла следует использовать в качестве продовольственного ресурса. Солома рапса с 1 га его посевов, превращенная в твердое топливо, обладает большей теплотой сгорания ($\sim 38,2$ ГДж \cdot га $^{-1}$, см. табл. 2), чем соответствующее количество рапсового масла или его метиловых эфиров ($\sim 14,7$ ГДж \cdot га $^{-1}$, см. табл. 2).

Потенциальными источниками сырьевых ресурсов для производства биоэтанола, биобутанола и ацетона в условиях Беларуси могут быть зерновые культуры, картофель, сахарная свекла, топинамбур. Технологии этих производств достаточно хорошо разработаны, но при обосновании выпуска жидких видов топлива из биомассы перечисленных культур следует принимать во внимание, что, по нашим оценкам, энергетический потенциал биомассы снижается в результате такой переработки более чем в два раза.

Так, например, энергетический эквивалент сухой массы клубней картофеля составляет 16,2 МДж \cdot кг $^{-1}$ (см. табл. 2). При урожайности клубней картофеля 21,2 т \cdot га $^{-1}$ [4] с учетом их 75 % влажности энергетическая эффективность клубней составляет $\sim 85,9 \cdot 10^3$ МДж \cdot га $^{-1}$, или $\sim 2,93$ т у. т. \cdot га $^{-1}$. Выход этанола из 1 т сырых клубней составляет ~ 80 л [18], что при плотности 0,79 т \cdot м $^{-3}$ соответствует 63 кг спирта. Удельная энергия сгорания этанола равна 29,7 МДж \cdot кг $^{-1}$ [19]. Тогда энергетическая эффективность этанола (1340 кг), получаемого из клубней с 1 га, составляет $\sim 39,8 \cdot 10^3$ МДж \cdot га $^{-1}$, или $\sim 1,36$ т у. т. \cdot га $^{-1}$. Следовательно, при переработке на этанол энергетический потенциал клубней картофеля снижается более чем в два раза.

Хотя клубневая масса свеклы содержит существенно большее количество углеводов и потенциально позволяет получить больший выход жидкого топлива в расчете на 1 га (табл. 4), тем не менее при переработке этой массы на этанол двукратная энергетическая деградация будет несомненной. Это обстоятельство необходимо учитывать при обосновании направлений переработки биомассы в различные виды топлива.

Таблица 4

Выход этанола из биомассы различных растительных культур Республики Беларусь

Культура	Средняя урожайность, т · га ⁻¹ (2007) [4]	Выход этанола*, т · га ⁻¹	Энергетическая эффективность, т н. э. · га ⁻¹
Картофель (клубни)	21,2	1,4	0,99
Сахарная свекла	38,7	2,4	1,7
Пшеница (зерно)	3,28	0,83	0,59
Кукуруза (зерно)	5,07	1,3	0,92

* Оценено по данным: Bramm A. Die Zuckerrube: ein nachwachsender Rohstoff // Neue Landwirtschaft. Berlin, 1993.

Принципиально биомасса клубневых культур может быть использована для переработки в твердые виды топлива в результате предварительного гранулирования (резки) и сушки. Образцы твердого топлива из клубней картофеля были получены в ЛТОВ НИИ ФХП БГУ, они имеют достаточно высокую плотность, не гигроскопичны и хорошо хранятся.

Имеющиеся в республике мощности по производству этилового спирта могут быть использованы для получения топливного биоэтанола. При этом должны быть разработаны ГОСТы на топливный этанол, которые позволяли бы увеличить выход топлива за счет снижения требований к необходимости очистки топливного этанола от метанола и других спиртов; разработаны стандарты на смесевые виды топлива, содержащие биоэтанол; проведены исследовательские и опытно-конструкторские работы по расширению сырьевой базы выпуска биоэтанола за счет энергоинтенсивных культур: сахарной свеклы, брюквы, топинамбура, сорго и т. п.

Следует иметь в виду, однако, что при существующих технологиях и высокой стоимости этанола на мировом рынке производство топливного этанола в Республике Беларусь экономически неэффективно: себестоимость 1 л белорусского этанола составляет 0,8—1,1 долл. США, а себестоимость 1 л этанола, производимого в Бразилии и США, не превышает 0,26—0,30 долл. США. Более целесообразно развивать исследования, направленные на разработку технологических процессов биосинтеза этанола, позволяющих без существенных материальных затрат значительно повысить производительность спиртовых заводов (Бобруйский РУП «Гидролизный завод», Мозырский РУП «Этанол») и снизить себестоимость целевого продукта.

Определенный интерес представляет возможность использования в качестве компонентов бензинов бутанола и ацетона, получаемых путем бутанольного брожения на штаммах *S. acetobutylicum*. Данные по выходу бутанола и ацетона в результате сбраживания биомассы многочисленны и противоречивы [14]. Максимальный теоретический выход растворителей при сбраживании глюкозы составляет всего лишь 0,39 г/(1 г глюкозы) [14]. Существенным недостатком ацетоново-бутанольной ферментации является также низкая концентрация целевых продуктов в бродильной массе (около 2 %), что усложняет технологию их выделения.

Тем не менее интерес к производству биобутанола в качестве добавки к бензину может быть обусловлен следующими обстоятельствами: бутанол имеет

более высокую удельную теплотворную способность и более низкое массовое содержание кислорода по сравнению с этанолом; смеси, содержащие бензин и бутанол, менее гигроскопичны и в меньшей мере склонны к расслаиванию, чем смеси бензина и этанола; для переработки в биобутанол может быть использован значительно больший спектр биоматериалов (в том числе сырье, не имеющее прямого продовольственного потенциала), чем при производстве биоэтанола.

Весьма существенным обстоятельством является то, что при использовании в качестве моторного топлива бензино-этанольных смесей существует потенциальная возможность получения спирта из смесей путем добавления соответствующего количества воды и применения опасного суррогата для питьевых целей. В случае использования бензино-бутанольных смесей такой проблемы не существует.

Таким образом, переработка биомассы растительных культур в жидкие виды топлива приводит к существенной деградации энергетического потенциала исходного сырья и требует более дорогостоящих технологий, чем при производстве твердых видов топлива.

ПРОИЗВОДСТВО ТВЕРДЫХ ВИДОВ ТОПЛИВА ИЗ БИОМАССЫ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР

Непосредственное сжигание растительной биомассы затруднено вследствие ее низкой плотности и высокой влажности. Кроме того, без специальной обработки биомасса многих растений подвержена гниению, что снижает ее энергетическую и технологическую ценность. Поэтому существенной задачей при получении твердых видов топлива является производство его в форме, обладающей высокой физической ($\sim 1 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$) и насыпной плотностью ($> 0,5 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$).

Производство твердого топлива из биомассы растительных культур включает в себя следующие технологические операции: измельчение биомассы, сушка, сортировка биомассы, прессование, упаковка (складирование) топлива. Эта схема производства твердого топлива достаточно универсальна, но при использовании различных видов растительного сырья должны быть модифицированы некоторые технические параметры установок. Так, при использовании соломы, стеблей кукурузы и других видов сырья, высушенных на воздухе, чаще всего исключается необходимость их дополнительной сушки. Конечным продуктом производства являются топливные таблетки, или пеллеты, диаметром 6—20 мм с физической плотностью 0,8—1,1 $\text{т} \cdot \text{м}^{-3}$ и насыпной плотностью более чем 0,5 $\text{т} \cdot \text{м}^{-3}$. Кроме того, могут выпускаться полученные путем шнекового прессования топливные брикеты («евродрова» диаметром около 5 см с внутренним отверстием 2 см и длиной порядка 30 см или брикеты длиной 5 см и высотой около 5 см). Топливные пеллеты (брикеты) называют «улучшенным» или «рафинированным» топливом из биомассы, так как они получены путем переработки и имеют улучшенные свойства (например, конечная влажность 8—10 %, уплотнение исходного материала в 5—10 раз).

Топливные гранулы из растительной биомассы обладают высокой энергией сгорания при незначительном занимаемом объеме. При сжигании 1 т топлив-

ных гранул из соломы (10 % влажности) выделяется столько же энергии (16,5 ГДж), сколько при сжигании 460 л дизельного топлива (стоимостью 345 долл. США) или 490 м³ природного газа (стоимостью 75 долл. США).

По оценкам специалистов и производителей древесных топливных гранул [20], себестоимость одной тонны произведенной продукции составляет 50—80 долл. США в зависимости от мощности завода, качества исходного сырья и его удаленности от места переработки, при этом цена реализации 1 т пеллет достигает 170 долл. США. Примерно 30 % себестоимости древесных пеллет обусловлено стоимостью исходного сырья (20—30 долл. США за количество, необходимое для производства 1 т пеллет).

С учетом меньшей стоимости соломы (15—20 долл. США за тонну) и ее меньшей влажности (17 % в сравнении с 25—60 % влажностью древесного сырья) при сохранении основных стадий гранулирования биомассы себестоимость 1 т топливных гранул из соломы составит 50—60 долл. США при цене ее реализации до 120 долл. США.

Топливные пеллеты и брикеты могут быть крайне привлекательны для небольших производств, ферм, загородных домов и офисов. Котельные установки, работающие на пеллетах (котел, оборудованный автоматической горелкой, и бункер), являются наиболее современными и экологически чистыми по сравнению с установками, работающими на традиционных видах топлива. При этом отопление, основанное на пеллетах, полностью автоматизировано, гарантируется полная взрывобезопасность. Из сравнения затрат на эксплуатацию различных котельных мощностью 25 кВт (табл. 5), достаточных для отопления помещений площадью до 200 м², следует, что отопление на пеллетах почти в три раза дешевле по сравнению с отоплением, основанным на дизельном топливе, а затраты на приобретение биотопливной котельной окупаются в течение двух отопительных сезонов.

Для обеспечения сырьем завода по производству топливных гранул из соломы (влажность 10 % по норме) мощностью 15 тыс. т в год (аналогичного заводом по производству древесных пеллет в г. Столбцы и г. Житковичи [2]) требуется 18 тыс. т соломы в год (с учетом 17 % влажности исходной соломы и 10 % потерь при измельчении, сушке и сортировке биомассы). При средней

Таблица 5

Сравнение отопительных установок, работающих на различных видах топлива, мощностью 25 кВт

Сравнительная характеристика	Дизельное топливо	Пеллеты из соломы
Ориентировочная стоимость котельной	2500 долл. США	7000 долл. США
Условный КПД установки	70 %	70 %
Расход топлива при полной мощности	3,56 л/ч	7,79 кг/ч
Потребность в топливе за сезон	7690 л	16,8 т
Стоимость единицы топлива	0,751 долл./л	0,12 долл./кг*
Затраты на отопление за сезон (180 суток, коэффициент загрузки 0,5)	5780 долл. США	2020 долл. США

* Цена, вдвое превышающая себестоимость производства пеллет из соломы.

урожайности соломы $2,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}$ (см. табл. 2) и переработке в твердое топливо только 20 % урожая соломы площадь посевов зерновых культур, необходимая для обеспечения работы завода, равна

$$(18\,000 \text{ т} / 2,6 \text{ т} \cdot \text{га}^{-1}) / 0,20 = 34,6 \cdot 10^3 \text{ га},$$

что составляет примерно 1,5 % от общей площади посевов зерновых в Республике Беларусь.

Площадь пахотных земель, необходимая для обеспечения биомассой завода мощностью 15 тыс. т пеллет в год, может быть сокращена в 30—50 раз при условии создания «энергетических плантаций». На этих площадях будут выращиваться с целью переработки в топливо энергоинтенсивные растительные культуры (топинамбур, мискантус и др.), обеспечивающие в условиях Республики Беларусь максимальный выход энергии с 1 га («энергетический гектар»).

Для работы одной биотопливной котельной мощностью 1 МВт на отопительный сезон (180 суток; коэффициент загрузки 0,5; КПД установки 70 %) требуется ~670 т пеллет. Таким образом, один завод по производству пеллет (брикетов) из соломы мощностью 15 тыс. т в год может обеспечить работу биотопливных котельных суммарной мощностью ~22 МВт.

Следует также отметить, что соломенные пеллеты лишь незначительно уступают по качеству древесным (табл. 6), а по совокупности экологических показателей превосходят традиционные виды топлива (уголь, торф, дизельное топливо и мазут).

Таблица 6

Сравнительные характеристики различных видов топлива [20]

Вид топлива	Теплота сгорания, МДж · кг ⁻¹	Содержание серы, масс. %	Содержание золы, масс. %	Дополнительное количество углекислого газа, кг · ГДж ⁻¹
Каменный уголь	15—25	1—3	10—35	60
Дизельное топливо	42,5	0,2	1	78
Мазут	37—39	1,2	1,5	78
Торф (пеллеты, брикеты)	17—18	0,2—0,3	5—15	70
Древесные пеллеты	16,9	0,1	1	0
Соломенные пеллеты	16,5	0,1—0,2	3—5	0
Природный газ	34 МДж · м ⁻³	0	0	57

Конкурентом соломенных и древесных пеллет является в настоящее время природный газ, однако его стоимость постоянно увеличивается. Особо следует отметить то, что при сгорании твердого биотоплива не выделяется в атмосферу дополнительного количества углекислого газа: CO₂, накопленный в вегетативный период, выделяется при сжигании. Соломенные пеллеты (брикеты) обладают невысокой зольностью (до 5 %), причем зола может использоваться в качестве удобрения (при сжигании угля, например, шлака образуется примерно в 7 раз больше и его нельзя использовать в качестве удобрения). При сжигании пеллет из соломы образуются безвредные продукты сгорания — в настоящее время это один из самых комфортных и экологически чистых видов топлива.



Рис. 4. Сопоставление энергетического выхода для различных способов переработки растительной биомассы в топливо

Обоснование стратегии переработки биомассы в твердое, жидкое или газообразное топливо должно базироваться на точных расчетах энергетических свойств исходных продуктов, энергетических свойств получаемых видов топлива и затрат на их производство. Такая работа требует специального финансирования и должна предшествовать принятию детальной программы развития производства различных видов топлива на основе растительного сырья.

Результаты сопоставления различных способов переработки растительной биомассы в топливо представлены на рис. 4.

Поскольку твердые виды топлива можно получать из биомассы практически без энергетической деградации, то работу по созданию комплексного производства твердого топлива и установок по его эффективному сжиганию можно считать первоочередной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Василенко Т. А. // Природ. ресурсы. 2007. № 4. С. 95.
2. Официальный сайт Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mlh.by>.
3. Ивашкевич О. А., Кабо Г. Я., Антонова З. А. и др. // Энергоэффективность. 2005. № 6. С. 18.
4. Официальный сайт Министерства статистики и анализа Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by>.
5. Официальный сайт Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by>.
6. Osowski S., Neumann J., Fahlenkamp H. // Chem. and Eng. Technol. 2005. Vol. 28, № 5. P. 280.

7. *Ивашкевич О. А., Кабо Г. Я., Блохин А. В. и др.* // Весці НАН Беларусі. Сер. хім. навук. 2006. № 4. С. 37.
8. *Ивашкевич О. А., Кабо Г. Я., Блохин А. В. и др.* // Докл. НАН Беларуси. 2007. Т. 51, № 6. С. 53.
9. *Кадыров М. А., Булавин Л. А., Бачило Н. Г. и др.* // Земляробства і ахова раслін. 2004. № 5. С. 26.
10. Энциклопедический словарь Брокгауза и Ефрона. Ст. «Ботва». [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://gatchina3000.ru/brockhaus-and-efron-encyclopedic-dictionary/014/14459.htm>
11. *Пугачев А. И.* Контроль качества уборки зерновых культур. М., 1990.
12. *Надточаев Н. Ф., Тетеркина А. М.* // Земляробства і ахова раслін. 2006. № 1. С. 22.
13. *Дубровский В., Виестур У.* Метановое сбраживание сельскохозяйственных отходов. Рига, 1988.
14. *Варфоломеев С. Д., Калюжный С. В., Медман Д. Я.* // Успехи химии. 1988. Т. 57, вып. 7. С. 1201.
15. *Willumsen H.* Landfill gas recovery plants. Waste management world. 2004.
16. *Паушкин Я. М., Головин Г. С., Липидус А. Л. и др.* // Химия тверд. топлива. 1994. № 3. С. 111.
17. *Панцхава Е. С., Пожарнов В. А., Зысин Л. В. и др.* // Возобновляемая энергия. 2004. Т. 199, № 3. С. 85.
18. Переработка картофеля — стратегический путь развития картофелеводства России / М-во сельского хоз-ва РФ, ГНУ «Всероссийский НИИ картофельного хозяйства им. А. Г. Лорха». М., 2006.
19. TRC Thermodynamic Tables — Hydrocarbons and Non-Hydrocarbons — TRC/NIST. Boulder, 2003.
20. *Овсянко А. Д.* Топливная гранула: Россия, Беларусь, Украина: справочник // Санкт-Петербург, Биотопливный портал WOOD-PELLETS.COM, 2007.