

УДК 662.636.3 + 633.11 + 633.853.494

О.А. ИВАШКЕВИЧ, Г.Я. КАБО, А.В. БЛОХИН, В.В. СИМИРСКИЙ, Ю.Н. ЛУГОВИК

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ РАСТИТЕЛЬНЫХ КУЛЬТУР ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ТОПЛИВА В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ

The results of analysis of biomass energy resources in Belarus have been presented. The energy efficiency for various components of biomass for the traditional crops (cereals, potatoes, beet, rape) and for the promising crops of high energy efficiency (earth apple and corn) have been determined. The technical appropriateness and the efficiency of different ways of biomass treatment into the gaseous, liquid and solid fuel have been compared. These results allow us to justify the scientific and technical programs, and the main effective directions for treatment of biomasses into fuel in Belarus.

Известно, что растительные культуры являются эффективными аккумуляторами солнечной энергии, позволяющими получать химическое топливо с минимальным техногенным воздействием на окружающую среду. Создание такого топлива обеспечит определенную энергонезависимость государствам, не обладающим достаточными запасами нефти, газа и угля [1].

В Республике Беларусь внутреннее потребление энергоресурсов составляет около 28 млн т у. т. в год (т у. т. – тонна условного топлива) [2, 3], при этом доля топлива из растительного сырья (древесины) – примерно 1 млн т у. т. [3]. В 2006–2007 гг. НИИФХП БГУ совместно с концерном «Белнефтехим» и Гродненским ПО «Азот» запущена установка по производству дизельного биотоплива из рапсового масла мощностью 5 тыс. т в год [4]. Министерством лесного хозяйства эксплуатируются две установки (г. Житковичи, г. Столбцы) мощностью по 15 тыс. т в год по выпуску древесных топливных таблеток, или пеллет [5]. Успешно работают также несколько негосударственных предприятий, производящих древесные топливные гранулы (Бобруйск, Борисов, Могилев и др.).

Однако ресурсы имеющегося в сельскохозяйственном производстве растительного сырья позволяют радикальным образом увеличить мощности по выпуску топлива за счет использования непродовольственных и некормовых частей растительных биомасс. Существующие технологии сельскохозяйственного производства обеспечивают возможность заготовки и хранения растительной биомассы для ее последующей переработки в топливо.

Из растительного сырья могут быть получены три типа топлива, различающихся по фазовому составу: твердое (топливные гранулы или брикеты), жидкое и газообразное.

Для технико-экономического обоснования выбора наиболее рациональных технологий переработки растительного сырья в топливо необходима оценка возможных сырьевых ресурсов сельскохозяйственных биомасс, их энергетической эффективности и степени энергетической деградации сырья при получении различных видов топлива.

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 стране, их физико-химических свойствах и возможности привлечения новых технологий и видов растительных культур для производства топлива.

1. Ресурсы растительной биомассы

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

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

Таблица 1

Элементный состав и энергии сгорания (высшие) различных видов растительной биомассы

Свойства	Биомасса	Целлюлоза	Лигнин	Древесина	Солома	Зерновые	Трава
Элементный состав, мас. %							
C		44,5	65,9	47÷51	42÷47	43÷60	37÷47
H		6,2	4,9	5,7÷6,3	5,1÷6,0	6,4÷7,2	5,1÷6,2
O		49,3	23,0	39÷44	39,1÷43,8	24÷46	33÷42
N		0	0,7	0,13÷0,54	0,4÷1,1	1,7÷3,9	0,7÷1,5
Зола, мас. %		0	5,1	0,5÷4,0	3,8÷12,2	2,0÷4,6	3,9÷23
$-\Delta_c U^o$, 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. [2] и значений высших энергий сгорания $\Delta_c U^o$, полученных нами методом бомбовой калориметрии сгорания [4, 7, 8].

Таблица 2

Энергетические характеристики некоторых видов биомассы растений в расчете на сухое вещество

Вид биомассы	Энергия сгорания (высшая), –ΔсН°, ГДж·т ^{–1}	Средняя урожайность / сух. в-во, т·га ^{–1}	Энергетическая эффективность биомассы на 1 га**		
			ГДж·га ^{–1}	т у. т.·га ^{–1}	т н. э.·га ^{–1}
Основные ресурсы растительной биомассы					
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)*	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					
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

Примечание. * Оценочные величины; ** т у. т. – тонна условного топлива (29,3 ГДж·т⁻¹), т н. э. – тонна нефтяного эквивалента (41,84 ГДж·т⁻¹).

Средние выходы соломы зерновых культур и соломы рапса с 1 га оценены по [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]. Было принято, что влажность соломы зерновых культур, соломы рапса и стеблевой массы кукурузы (на зерно) составляет 17 % [11, 12], картофельной ботвы – 25 % [10].

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, наиболее энергоэффективными в условиях Беларуси следует признать стеблевые массы кукурузы и топинамбура. Даже в тех случаях, когда энергии сгорания компонентов биомассы различаются существенно:

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

высокая урожайность обеспечивает существенно 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 (рис. 1), энергетический ресурс которой (или ее компонента) оценен как произведение «условного количества гектаров», занятых данной сельскохозяйственной культурой (зерновые, рапс, кукуруза на зерно, картофель, свекла), на соответствующую величину энергетической эффективности, выраженной

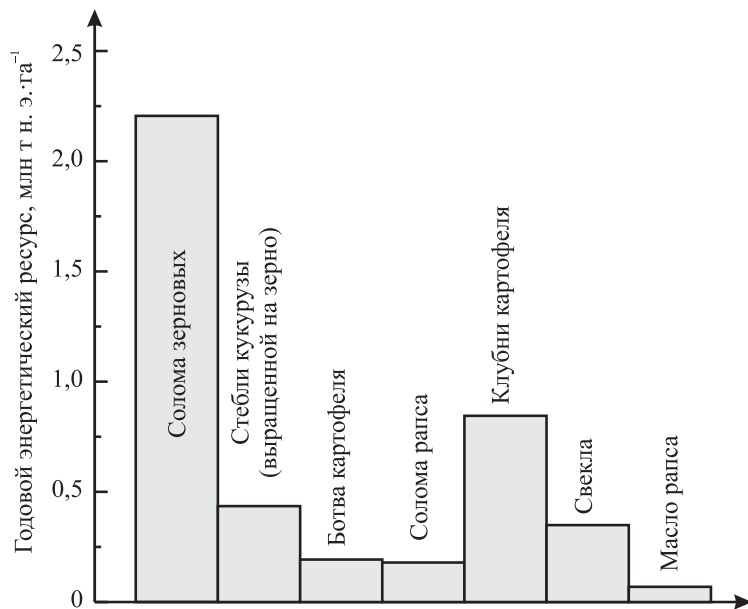


Рис. 1. Годовой энергетический ресурс биомассы некоторых растительных культур и их компонентов в Республике Беларусь (по данным 2007 г.)

ных культур с большим выходом сухой биомассы с 1 га [1]. В качестве таких культур в условиях Беларуси целесообразно использовать топинамбур и мискантус (слоновья трава), растения семейства гречишных – горец забайкальский, горец Вейриха, сильфией пронзеннолистную и т. п. Согласно данным Центрального ботанического сада НАН Беларуси, на средних по плодородию почвах при низких

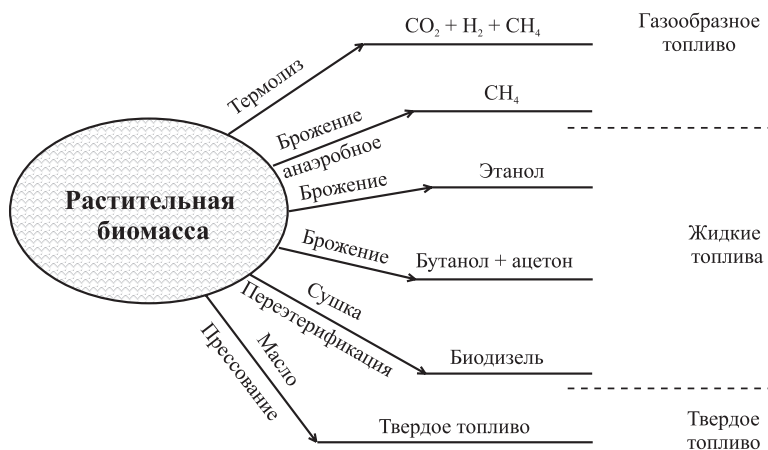


Рис. 2. Производство топлива из биомассы растительных культур

ного сырья газообразного, жидкого и твердого топлива (рис. 2). Проанализируем техническую целесообразность и экономическую эффективность получения каждого из видов топлива.

3. Газификация биомассы растительных культур

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

в тоннах нефтяного эквивалента на гектар (т н. э. га⁻¹) (см. табл. 2). «Условное количество гектаров» найдено как отношение валового сбора данной культуры (зерна, клубней) к ее средней урожайности за 2007 г. [2].

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 и 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 страны 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 использовать топинамбур и мискантус (слоновья трава), растения семейства гречишных – горец забайкальский, горец Вейриха, сильфией 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 т·га⁻¹, а клубней – 14,4 т·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).

2. Способы переработки биомассы растительных культур в различные виды топлива

Существует принципиальная возможность получения из растительного сырья газообразного, жидкого и твердого топлива (рис. 2). Проанализируем техническую целесообразность и экономическую эффективность получения каждого из видов топлива.

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

Микробиологическая газификация биомассы растений требует выполнения 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 в расчете на 1 т исходной биомассы.

3.1. 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 сух. в-ва)	Содержание метана, %	Выход метана в среднем, кг (на 1 кг сух. в-ва)
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 CH_4) 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 можно получить 0,3 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 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 энергии – 3929 МВт, объем обрабатываемых отходов – 4548 млн т.

3.2. Термокаталитическая газификация

При термической газификации твердой биомассы часть энергии тратится на достижение высоких температур превращения и компенсацию эндотермических эффектов реакций. В результате получаются газы с низким содержанием горючих компонентов (~ 15÷25 % CO , ~ 12÷15 % H_2 , менее 5 % CH_4) 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.

Использование газогенераторного топлива вдали от установок ведет к существенным потерям за счет снижения исходной очень высокой температуры генераторного газа (до 1000 °С) при транспортировке. Процесс генерации газа обязательно сопровождается существенной энергетической дегра-

дацией 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 усложняют конструкцию топки и не могут дать существенных энергетических преимуществ по сравнению с прямым сжиганием твердого топлива.

Однако в газогенераторных процессах образуются смеси газов, которые могут служить сырьем для химической переработки с целью получения водорода, диметилового эфира, метанола и других спиртов. Чтобы эти процессы были экономически эффективны и экологически безопасны необходимо (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 энергии сгорания и теплоемкости целлюлозы были выполнены расчеты равновесных составов продуктов ее термолитиза (некоторые результаты представлены на рис. 3).

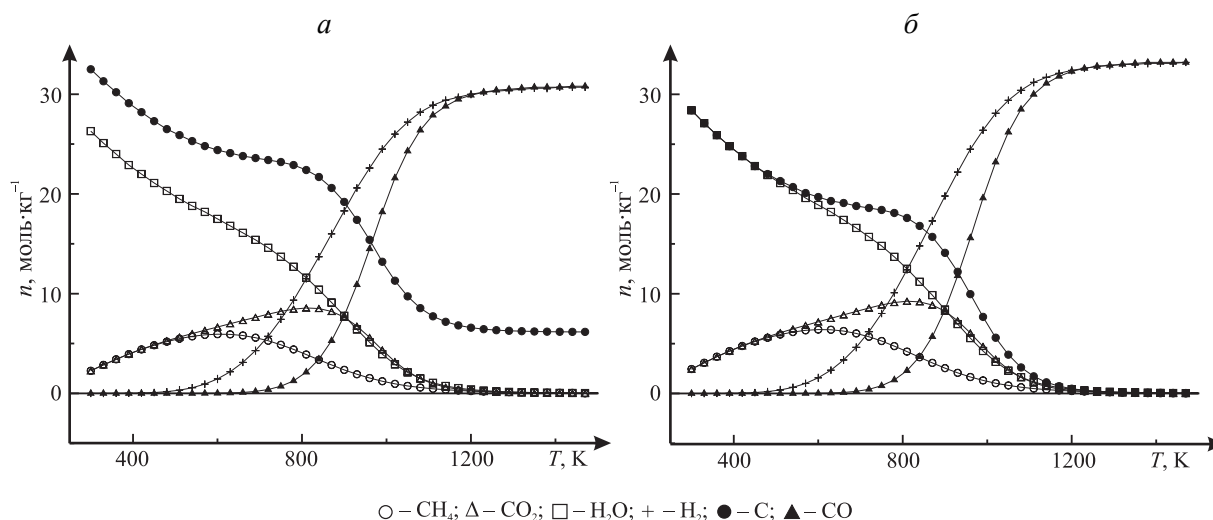


Рис. 3. Равновесные составы продуктов термолитиза целлюлозы (n – число моль веществ в 1 кг равновесной смеси):
а – пиролиз целлюлозы; б – гидротермальная газификация целлюлозы (целлюлоза : H_2O = 1 : 1)

Видно, что в условиях термодинамического контроля как при пиролизе, так и при гидротермальной газификации целлюлозы максимальное содержание CO и H_2 в смеси достигается в случае проведения процессов при температурах выше 1200 °С. Полученное при этом 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 топливо высокой стоимости. Вероятно, следует считать основным направлением в газификации реализацию термокаталитических процессов с максимальными выходами синтез-газа ($CO + H_2$). Такие процессы потребуют фундаментальных исследований термодинамических свойств биомассы в широких интервалах температур 270÷2000 К с последующим проведением термодинамического анализа 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.

4. Производство жидкого 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 в стране масложировой отрасли 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 составляет лишь около 0,7 % и не может существенным образом изменить структуру энергопотребления в государстве, тем более что значительная часть рапсового масла будет использоваться в качестве продовольственного ресурса. Солома рапса с 1 га посевов, превращенная в твердое топливо, обладает большей теплотой сгорания ($\sim 38,2 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$, см. табл. 2), чем соответствующее количество рапсового масла или его метиловых эфиров ($\sim 14,7 \text{ ГДж} \cdot \text{га}^{-1}$, см. табл. 2).

Потенциальными источниками сырьевых ресурсов для производств 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 жидкого топлива из биомассы перечисленных культур следует принимать во внимание, что, по нашим оценкам, энергетический потенциал биомассы снижается в результате такой переработки более чем в 2 раза.

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

Таблица 4

Выход этанола из различных растительных культур

Культура	Средняя урожайность, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$ (2007) [4]	Выход этанола*, $\text{т} \cdot \text{га}^{-1}$	Энергетическая эффективность, т н. э. $\cdot \text{га}^{-1}$
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

Примечание. *Оценено по данным [20].

Принципиально биомасса клубневых культур может быть переработана на твердое топливо после предварительного гранулирования (резка) и сушки. Образцы твердого топлива из клубней картофеля, полученные в ЛТОВ НИИФХП БГУ, имеют достаточно высокую плотность, не гигроскопичны и хорошо хранятся.

Имеющиеся в стране 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 очистке топливного этанола от метанола и других спиртов; разработаны стандарты на смесевые 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.

Однако следует иметь в виду, что при существующих технологиях и ценах на этанол на Мировом рынке производство топливного этанола в нашей стране экономически неэффективно: себестоимость 1 л белорусского этанола составляет $0,8 \div 1,1$ долл., а себестоимость 1 л этанола, производимого в Бразилии и США, не превышает $0,26 \div 0,30$ долл. Целесообразнее развитие исследований, направленных

на разработку технологических процессов биосинтеза этанола, позволяющих без существенных материальных затрат значительно повысить производительность существующих 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 *C. acetobutylicum*. Данные по выходу бутанола и ацетона в результате сбраживания биомассы многочисленны и противоречивы [14]. Максимальный теоретический выход растворителей при сбраживании 1 г глюкозы составляет 0,39 г [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.

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

5. Производство твердого 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 твердого топлива является производство его в форме, обладающей высокой физической ($\sim 1 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$) и насыпной плотностью ($> 0,5 \text{ т} \cdot \text{м}^{-3}$).

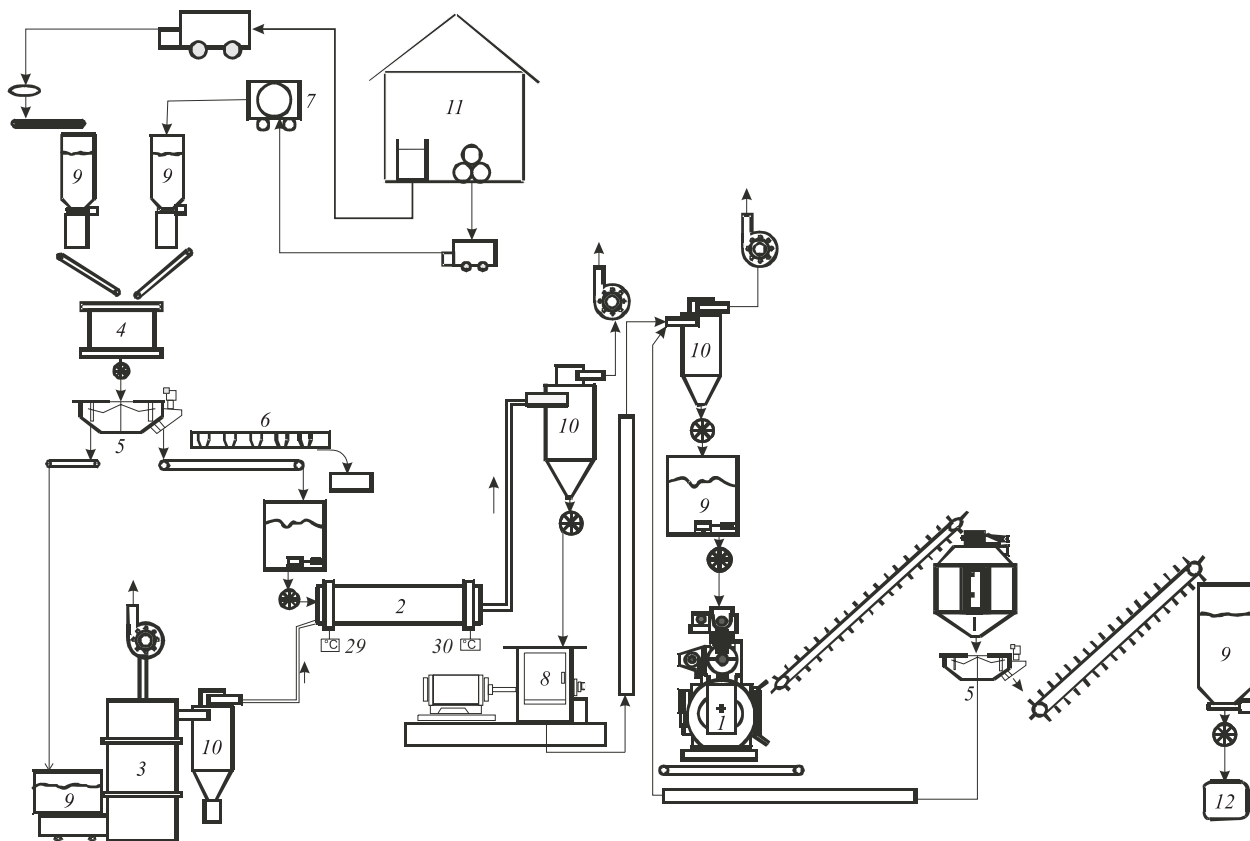


Рис. 4. Технологическая схема производства смесевых топливных гранул из растительного сырья: 1 – пресс-гранулятор; 2 – сушильный барабан; 3 – теплогенератор; 4 – смеситель; 5 – вибросито; 6 – магнитный сепаратор; 7 – измельчитель рулонов; 8 – молотковая дробилка; 9 – бункеры; 10 – циклоны; 11 – склад сырья; 12 – фасовочный агрегат

Процесс производства твердого топлива из биомассы растительных культур (рис. 4) включает в себя следующие технологические операции: измельчение, сушка, сортировка биомассы, прессование, упаковка (складирование) топлива. Эта схема производства достаточно универсальна, но технические параметры установок должны соответствовать различным видам растительного сырья. Так, при использовании соломы, стеблей кукурузы и т. п., высушенных на воздухе, чаще всего исключается необходимость их дополнительной сушки. Конечным продуктом производства являются топливные пеллеты диаметром $6\div 20$ мм с физической плотностью $0,8\div 1,1 \text{ т}\cdot\text{м}^{-3}$ и насыпной плотностью выше 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 около 30 см или брикеты длиной 5 см и высотой около 5 см. Топливные пеллеты (брикеты) считаются рафинированным топливом из биомассы, так как они получены путем переработки и имеют улучшенные свойства (например, конечная влажность $8\div 10$ %, уплотнение исходного материала в $5\div 10$ раз).

Топливные гранулы из растительной биомассы обладают высокой энергией сгорания при незначительном объеме. При сжигании 1 т топливных гранул из соломы (10 % влажности) выделяется столько же энергии (16,5 ГДж), как при сжигании 460 л дизельного топлива или 490 м³ природного газа.

По оценкам специалистов и производителей древесных топливных гранул [21], себестоимость тонны произведенной продукции составляет $50\div 80$ долл. в зависимости от мощности завода, качества исходного сырья и его удаленности от мест переработки, при этом цена реализации 1 т пеллет достигает 170 долл. Примерно 30 % себестоимости древесных пеллет составляет стоимость исходного сырья ($20\div 30$ долл. за количество, необходимое для производства 1 т пеллет).

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

Топливные пеллеты и брикеты могут быть крайне привлекательны для небольших производств, ферм, загородных домов. Котельные установки 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 процесс отопления полностью автоматизирован, гарантируется полная взрывобезопасность и исключается возможность разлива топлива. Из анализа затрат на эксплуатацию различных котельных мощностью 25 кВт (табл. 5), достаточных для отопления помещений площадью до 200 м², следует, что использование пеллет почти в 3 раза удешевляет отопление по сравнению с дизельным топливом, а затраты на приобретение биотопливной котельной окупаются в течение двух отопительных сезонов.

Таблица 5

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

Сравнительные характеристики	Дизельное топливо	Пеллеты из соломы
Ориентировочная стоимость котельной	2500 долл.	7000 долл.
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 сут, коэффициент загрузки 0,5)	5780 долл.	2020 долл.

Примечание. *Цена, вдвое превышающая себестоимость производства пеллет из соломы.

Для обеспечения сырьем завода по производству топливных гранул из соломы (влажность 10 % по норме) мощностью 15 тыс. т в год (аналогичного заводам по производству древесных пеллет в Столбцах и Житковичах [5]) требуется 18 тыс. т соломы в год (с учетом 17 % влажности исходного сырья и 10 % потерь при измельчении, сушке и сортировке биомассы). При средней урожайности соломы $2,6 \text{ т}\cdot\text{га}^{-1}$ (см. табл. 2) и переработке в твердое топливо только 20 % площадь посевов зерновых культур, необходимая для обеспечения работы завода, равна $34,6\cdot 10^3$ га, что составляет примерно 1,5 % от общей площади посевов зерновых в Беларуси.

Площадь пахотных земель, необходимая для обеспечения биомассой завода мощностью 15 тыс. т пеллет в год, может быть сокращена в $30\div 50$ раз при условии создания «энергетических плантаций». Это значит, что здесь будут выращиваться энергоинтенсивные растительные культуры (топинамбур,

мискантус и др.), обеспечивающие в условиях Беларуси максимальные выходы энергии с 1 га («энергетический гектар»).

Для работы одной биотопливной котельной мощностью 1 МВт на отопительный сезон (180 сут; 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 особо 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

Характеристики различных видов топлива [21]

Вид топлива	Теплота сгорания, МДж·кг ⁻¹	Содержание серы, мас. %	Содержание золы, мас. %	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	0,3÷0,4	4÷5	0
Природный газ	34 МДж·м ⁻³	0	0	57

При сгорании твердого биотоплива в атмосферу не выделяется дополнительного количества углекислого газа: CO₂, накопленный в вегетативный период, выделяется при сжигании. Соломенные пеллеты (брикеты) обладают невысокой зольностью (до 5 %), причем зола может быть использована в качестве удобрения (при сжигании угля, например, шлака образуется почти в 7 раз больше и его нельзя использовать как удобрение). Пеллеты из соломы в настоящее время – один из самых комфортных и экологически чистых видов топлива.

* * *

Обоснование стратегии переработки биомассы на твердое, жидкое или газообразное топливо должно базироваться на точных расчетах энергетических свойств исходных продуктов и получаемого топлива, затрат на их производство, обоснованном выборе мощности и типа энерготеплогенерирующих установок. 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. 5.



Рис. 5. Сопоставление энергетического выхода для различных способов переработки растительной биомассы в топливо

Поскольку твердое топливо может быть получено из биомассы практически без энергетической деградации, то работу по созданию комплексов по его производству и установок по его эффективному сжиганию можно считать первоочередной.

1. Василенко Т. А. // Природ. ресурсы. 2007. № 4. С. 95.
2. Официальный сайт Министерства статистики и анализа Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.belstat.gov.by>
3. Официальный сайт Департамента по энергоэффективности Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://energoeffekt.gov.by>
4. Ивашкевич О. А., Кабо Г. Я., Антонова З. А. и др. // Энергоэффективность. 2005. № 6. С. 18.
5. Официальный сайт Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.mlh.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. Статья: «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., Лapidус А. Л. и др. // Химия твердого 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., 2006.
19. TRC Thermodynamic Tables – Hydrocarbons and Non-Hydrocarbons – TRC/NIST. Boulder, 2003.
20. Bramm A. // Neue Landwirtschaft. Berlin, 1993.
21. Овсянко А. Д. Топливная гранула: Россия, Беларусь, Украина: Справ. СПб., 2007.

Поступила в редакцию 18.12.08.

Олег Анатольевич Ивашкевич – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, директор НИИФХП БГУ.

Геннадий Яковлевич Кабо – доктор химических наук, профессор, заведующий лабораторией НИИФХП БГУ.

Андрей Викторович Блохин – доктор химических наук, профессор кафедры физической химии.

Владимир Викторович Самирский – кандидат химических наук, заместитель директора НИИФХП БГУ.

Юрий Николаевич Луговик – директор НП РУП «Унихимпром БГУ».