Георгий Гелетуха,
председатель правления Биоэнергетической ассоциации Украины

Татьяна Железная,
член экспертного совета Биоэнергетической ассоциации Украины

Александра Трибой,
консультант отдела общих вопросов биоэнергетики НТЦ «Биомасса»

Топливные характеристики
энергетических культур

(Продолжение. Начало см. в № 1/2015 г.)

Энергетические культуры используются для получения твердых, жидких и газообразных биотоплив. В данной Аналитической записке рассматриваются культуры, предназначенные для производства твердых биотоплив — щепы, гранул, брикетов. Топливные характеристики нескольких таких культур представлены в *Таблице 6*. Для сравнения в таблицу также включены данные для соломы зерновых культур и щепы лесной древесины.

Анализ данных таблицы показывает, что характеристики ивы и тополя в целом близки к показателям древесной щепы. Основное отличие — большее содержание азота, что, по-видимому, связано с применением удобрений при выращивании этих культур. Мискантус характеризуется повышенной зольностью, примерно такой, как у соломы. Все рассмотренные энергокультуры имеют достаточно высокую температуру плавления золы, что выгодно отличает их от соломы.

Табл. 6

Топливные характеристики энергетических культур и других биотоплив

Показатели	Мискантус	Ива	Тополь	Солома зерновых культур (для сравнения)	Древесная щепа (для сравнения)
Влажность при сборе, %	15 15–23	53 50	49 50–55	15–20	40
$Q_н^р$, МДж/кг (сух. мас.)	17,5 17–19,5	18,5	18,7	~18	~19
Содержание летучих веществ, %	>78	79	83	>70	>70
Зольность, %	3,7 2,3	2,0 1,5–2	1,5 0,5–1,9	3–4	0,6–1,5
Элементарный состав, %:					
C	46,97	50,28	47,95	42–43	50
H	5,57	5,98	5,92	5	6
O	45,82	42,65	45,29	37–38	43
Cl	0,04	0,02 0,03	0,03 0,04	0,2–0,75	0,02
K*	0,46 %	123,3 г/кг золы	0,21 % 28,6 г/кг золы	0,22–1,18 % 0,2–0,98 %	0,13–0,35 % ~81 г/кг золы
N*	0,16 0,57	0,5–1,0 0,74	0,77 0,9	0,35–0,41	0,3
S	0,28	0,34 0,03	0,03 0,2	0,13–0,16	0,05
Температура плавления золы, °C	1250 [6] 1385 [13]	>1500 1528	1200–1500 1160	950–1000	1000–1400

** Содержание зависит от объема вноса удобрений*

Предлагаем вам ознакомиться с результатами нескольких работ, посвященных изучению топливных характеристик ряда энергетических культур.

В работе ***B.A. Gudka. Combustion characteristics of some imported feedstocks and short rotation coppice (SRC) willow for UK power stations, 2012*** (http://etheses.whiterose.ac.uk/3352/1/Combustion_Characteristics_of_some_Imported_Feedstocks_and_SRC_willow_for_UK_power_stations.pdf)

на лабораторном оборудовании выполнено детальное исследование топливных свойств 6 генотипов биомассы ивы с точки зрения возможности их совместного сжигания с углем на электростанциях Великобритании. Отмечено, что положительным свойством ивы как топлива является сравнительно небольшое содержание золы (1,5–2%) и азота (0,0[1]–0,4[2] сух. мас. %).

Применение удобрений при выращивании культуры должно быть оптимальным, так как оно оказывает влияние на элементный состав биомассы. Например, совместное использование азотных и калийных удобрений приводит к увеличению содержания углерода, что, в свою очередь, положительно влияет на калорийность биомассы. С другой стороны, использование этих же удобрений влияет на содержание азота и калия в иве, что может привести к росту выбросов оксидов азота при сжигании и снижению температуры плавления золы за счет большого количества в ней оксида калия K_2O. Из шести изученных генотипов ивы пять показали очень высокую температуру плавления золы (> 1500 °С) и низкую тенденцию к ошлакованию элементов энергетического оборудования.

Также была исследована податливость биомассы ивы к измельчению, что имеет значение при совместном сжигании с углем и при изготовлении гранул. Установлено, что необработанная биомасса плохо поддается измельчению, тогда как показатели торрефицированной[3] биомассы ивы по размеру и распределению частиц могут приближаться к углю *(Рис. 4)*. Энергозатраты на измельчение торрефицированной биомассы составляют 10–20 % от необходимых для необработанного сырья. Это объясняется тем, что в процессе торрефикации происходит разрушение гемицеллюлозы и сформированных ею структурных связей, в результате чего образуется материал с более «слабыми» связями, податливый к измельчению.

Изучение элементного и биохимического состава образцов ивы показало, что генотип с наивысшим содержанием

---

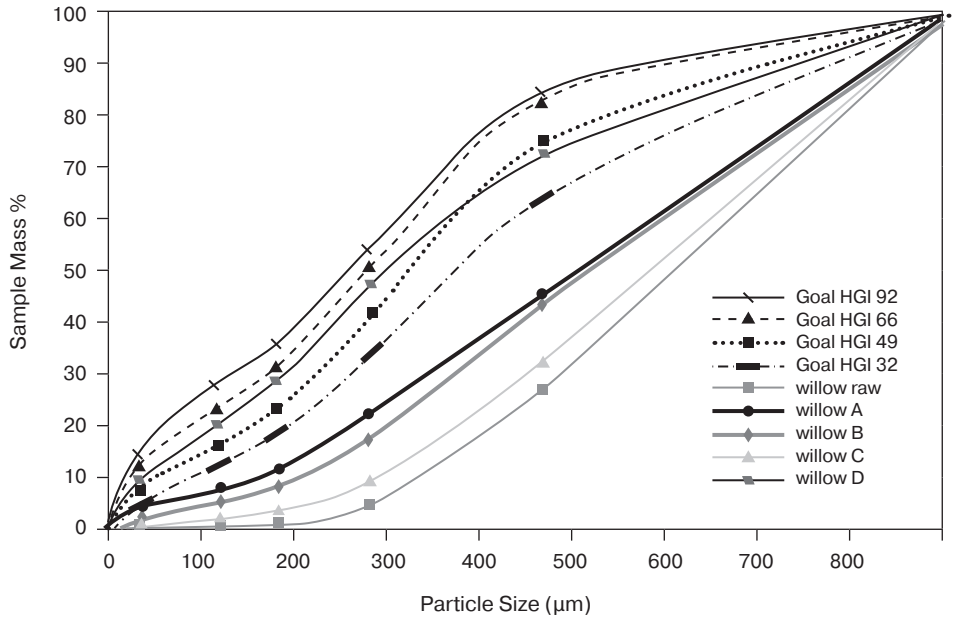
[1] Для случая отсутствия внесения азотных удобрений.

[2] Для случая вноса 150 кг N/га в виде NH4(NO3).

[3] Торрефикация (torrefaction) — термохимическая обработка биомассы при температурах 200–320 °С при атмосферном давлении в отсутствии кислорода. Называют также «мягкой» формой пиролиза.

Рис. 4

Распределение частиц (мас. %)
для измельченной биомассы ивы и для угля



A, B, C, D *— биомасса ивы, торрефицированная при различных условиях (**A** — наименьшая температура, **D** — наибольшая температура);* ***willow raw*** *— необработанная биомасса ивы;* ***coa*** *— уголь*

лигнина (27,13% — генотип *F*, *Таблица 7*) имеет наибольшую зольность (2,88–3,25 %). И наоборот, генотип с наименьшим содержанием лигнина (15,49 % — генотип *B*) имеет минимальную зольность (1,11–1,37 %). Наибольшую теплоту сгорания имеют генотипы с высоким содержанием углерода и малым содержанием кислорода (например, генотипы *A, B*). В целом, в работе сделан вывод о хороших топливных характеристиках биомассы ивы (за исключением генотипа *S. elaeagnos Scop.*) и перспективности выращивания и использования этого вида биотоплива.

Авторы ***J. Dahl, I. Obernberger. Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops*** (Arundo Donax, Cynara Cardunculus, Miscanthus x Giganteus and Panicum Virgatum). Proc. of 2nd World Conference on Biomass

Табл. 7

Топливные характеристики различных генотипов ивы

Показатели	*S.aurita L.* *A*		*S.viminalis x S.schwerinii* *B*		*S.eriocephala Michx.* *C*		*S.drummondiana Barratt ex Hook.* *D*		*S.mielichhoferii Saut.* *E*		*S.elaeagnos Scop.* *F*	
	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
Элементный состав, % сух. мас. без золы												
C	53,65	49,33	53,58	49,52	53,68	49,57	51,98	51,00	46,13	50,62	54,27	51,01
H	6,73	6,00	6,81	5,99	6,34	5,95	6,47	6,03	5,80	6,12	6,85	6,36
N	0,95	0,57	0,81	0,45	1,02	0,36	0,86	0,85	0,57	0,66	0,89	1,25
O	38,67	44,10	38,80	44,04	38,96	44,12	40,69	42,12	47,50	42,60	37,99	41,38
Топливные свойства												
Влажность, %	6,16	2,73	6,59	2,72	4,96	2,89	4,74	2,72	5,46	2,26	6,05	5,65
Выход летучих веществ, %	75,77	78,35	75,89	79,09	77,28	79,53	75,25	76,70	76,00	79,00	73,94	73,31
Связанный углерод, %*	16,57	17,33	16,40	16,82	16,20	15,57	18,31	18,95	16,95	16,97	17,13	17,79
Зольность, %	1,5	1,59	1,11	1,37	1,56	2,01	1,71	1,63	1,59	1,77	2,88	3,25
$Q_в^р$, МДж/кг сух. мас.**	21,50	19,28	21,61	19,39	21,33	19,24	20,56	20,00	17,98	19,81	21,41	19,74
Биохимический состав, %												
Гемицеллюлоза	7,35	15,07	13,29	13,95	9,14	14,70	13,77	11,51	15,09	11,47	9,80	н.д.
Целлюлоза	50,02	43,92	52,98	47,80	54,06	48,03	33,52	38,34	42,22	43,57	46,56	н.д.
Лигнин	18,40	18,41	15,49	15,46	18,05	14,79	22,17	18,42	18,62	18,35	27,13	н.д.

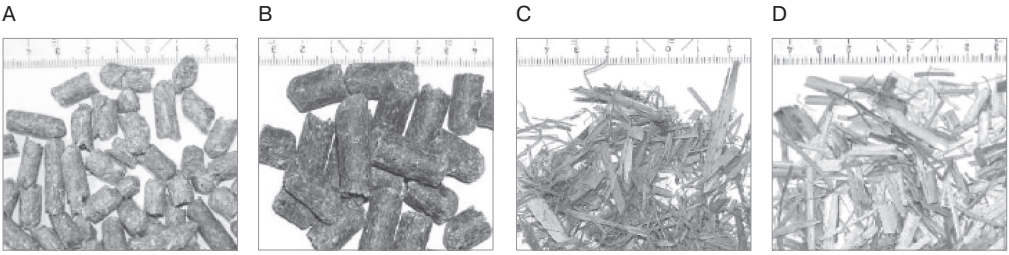
* Рассчитано по разнице.

** Получено расчетным путем.

I – исследование, проведенное в декабре 2008 г., II – исследование, проведенное в феврале 2011 г.

for Energy, Industry and Climate Protection, 10–14 May 2004, Rome, Italy, p. 1265–1270) исследовали топливные характеристики четырех многолетних травянистых энергетических культур — мискантуса, проса прутьевидного, арундо тростникового, артишока испанского *(Рис. 5)* в сравнении с «эталонным» топливом — древесными гранулами австрийского производства.

Рис. 5



***A** — гранулы из проса прутьевидного, **B** — гранулы из артишока испанского, **C** — измельченный арундо тростниковый, **D** — измельченный мискантус*

По сравнению с древесиной, исследованные многолетние энергокультуры имеют гораздо большую зольность, из них наименьшая — у мискантуса (2,3 % сух. мас.) (*Таблица 8*). Повышенная зольность объясняется метаболизмом быстрого роста (накапливание питательных веществ) и отличной от древесины органической структурой (SiO_2-фитолиты 4[4]). Кроме того, на зольность большое влияние оказывает сезон сбора урожая и применяемая технология сбора. Как правило, основными элементами, формирующими золу, являются (в порядке уменьшения значимости) Si, K, Ca, Cl, S. Из *Таблицы 8* видно, что у мискантуса по сравнению с другими культурами содержание Si, K, Ca наименьшее.

Кроме того, исследованные энергокультуры (кроме проса прутьевидного) по сравнению с древесными гранулами характеризуются повышенной потенциальной способностью вызывать коррозию элементов энергооборудования, что отражается показателем Cl/S > 1. Формирование

[4] Фитолиты – кристаллы кремния, сформировавшиеся в волокнах растения.

свободного газообразного хлора при сульфатации щелочных или тяжелых металлов в отложениях на трубах котла приводит к явлению коррозии. Особенно неблагоприятным является сочетание Cl/S > 1 при высоком содержании Ca (как у артишока испанского). Для древесных гранул отношение Cl/S < 1. Также энергетические культуры имеют более высокое содержание азота, чем лесная древесина, что приводит к большим выбросам NO_x при горении. Наблюдается тенденция к ошлаковыванию элементов оборудования.

Табл. 8

Топливные характеристики многолетних травянистых энергокультур

Показатели	**Просо прутьевидное** (гранулы)	**Арундо тростниковый** (щепа)	**Мискантус** (щепа)	**Артишок испанский** (гранулы)	**Древесные гранулы** (для сравнения)
Зольность, % сух. мас.	8,3	6,1	2,3	17,4	0,50
Содержание N, % сух. мас.	0,67	0,71	0,16	1,1	0,08
Элементный состав, мг/кг сух. мас.					
Si	14,99	13,92	7,30	21,14	<400
Ca	6,55	3,25	1,77	19,02	938
K	12,75	6,49	1,44	21,54	485
Na	924	331	58	10,33	30
Mg	2,22	1,62	644	3,93	152
Al	763	919	82	4,44	н.д.
S	735	2,16	390	1,56	73
Cl	1,51	2,24	880	17,78	53
Cl/S*	0,002	1,04	2,25	11,39	0,73
$Q_в^р$, МДж/кг сух. мас. без золы	17,8	19,8	19,6	20,3	20,3
Объемная плотность, кг сух. мас./м^3	585	116	117	561	644

* Показатель потенциальной способности топлива вызывать коррозию элементов энергетического оборудования.

Несмотря на недостатки биотоплива из энергетических культур по сравнению с древесными гранулами, в целом они являются неплохим топливом, требующим тщательного подхода к использованию. Во многих случаях эти биотоплива могут соответствовать существующим нормам по выбросам загрязняющих веществ (если только они не являются необоснованно завышенными). Так, например, из данных *Таблицы 9* видно, что показатели горения щепы мискантуса полностью находятся в пределах австрийских лимитов для эмиссии твердых частиц, оксидов азота и CO.

Табл. 9

Средние показатели эмиссии при горении биотоплива из многолетних травянистых энергетических культур, мг/нм³ (13% O_2, сух. мас.)

Загрязняющие вещества	Просо прутьевидное	Арундо тростниковый	Мискантус	Древесные гранулы (для сравнения)	Австрийские нормы по выбросам для установок 100–350 кВт
Твердые частицы, всего	8	102	**27**	21	150
в том числе < 1 µm (аэрозоли)	50	67	**16**	16	
NO_x	368	363	**187**	106	350* / 250**
HCl	18	67	**59**	3	
SO_2	91	278	**53**	3	
CO	145	443	**55**	1	250

* Для химически необработанных древесных отходов
** Для лесной древесины

Для решения проблемы ошлаковывания поверхностей котла при сжигании энергетических культур авторы предлагают снижать температуру горения путем использования охлаждаемых решеток и стенок топки. Другой подход может заключаться в предварительной обработке биомассы — выщелачивание (для удаления проблематичных химических элементов) или добавление извести для повышения температуры плавления шлаковых отложений. Еще один возможный метод — совместное сжигание энергокультур с древесиной, в результате чего снизится эмиссия HCl, SO_2, NO_x и твердых частиц.

В работе ***E. Karampinis, D. Vamvuka, S. Sfakiotakis et al. Comparative Study of Combustion Properties of Five Energy Crops and Greek Lignite*** // Energy & Fuels, 2012, № 26 (2), p. 869–878 (http://www.researchgate.net/publication/224437353_A_Comparative_Study_of_Combustion_Properties_of_Five_Energy_Crops_and_Greek_Lignite) изучены характеристики горения биомассы нескольких энергетических культур, в том числе ивы, тополя, мискантуса. В основном полученные результаты совпадают с выводами приведенных выше исследований (данные по топливным характеристикам представлены в *Таблице 6*). Ива имеет высокую температуру плавления золы (>1500 °С) и наименьшие проблемы с ошлакованием поверхностей энергооборудования. Зольность мискантуса (6,74 %) заметно выше зольности ивы (1,93 %) и тополя (1,71 %). Это же относится и к содержанию азота. Наихудшие топливные свойства из рассмотренных культур имеет артишок испанский. В отличие от авторов предыдущей рассмотренной работы, авторы считают, что при сжигании энергетических культур (кроме артишока испанского) не будет возникать серьезных проблем с коррозией элементов энергооборудования, поскольку содержание хлора в этих культурах низкое (<0,1 %).

ВЫРАЩИВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КУЛЬТУР В УКРАИНЕ

На сегодня в Украине есть несколько компаний, занимающихся выращиванием энергетических культур на коммерческом уровне. Еще ряд компаний планируют в ближайшее время выйти на этот рынок. Некоторые из них кратко описаны ниже.

Компания «Salix Energy», основанная в 2010 году, имеет наибольшие в Украине плантации энергетической ивы (Salix Viminalis), расположенные в Волынской и Львовской областях (> 1500 га). Разводятся 6 сортов ивы, в том числе польские и шведские. В 2013 г. компания зарегистрировала свой собственный сорт «Марцияна» (единственный официально зарегистрированный в Украине). В 2014–2015 гг. запланировано расширение плантаций ивы до 2,5–3 тыс. га и начало промышленного сбора урожая. «Salix Energy» планирует

собирать щепу из энергетической ивы для производства тепловой и электрической энергии на территории Украины.

Компания «Phytofuels» выращивает целый ряд энергетических культур (просо прутьевидное, мискантус, ива, сорго сахарное и др.) на площади более 35 тыс. га в Полтавской области. Брикеты и гранулы, произведенные из этих культур «Phytofuels» поставляет отечественным и зарубежным потребителям. В научных вопросах компания тесно сотрудничает с Институтом биомассы и устойчивого развития (г. Полтава) и Университетом Вагенингена (Нидерланды).

Агрохолдинг KSG Agro, владеющий 65 тыс. га земель в Днепропетровской области, развивает новое направление своего бизнеса — выращивание мискантуса. В 2013 году на 33 га агрохолдинга успешно взошли маточные плантации культуры. В 2014 г. планируется высадка еще 400 га мискантуса, а еще через год общая площадь под эту энергокультуру должна превысить 2000 га. Биомасса мискантуса будет использоваться для производства твердого биотоплива.

ООО «Аграрное Содружество» в 2011 г. приступило к реализации проекта по выращиванию энергетической ивы (Salix Viminalis) и производству топливных гранул из нее. Земельный фонд проекта — 2000 га, расчетная производственная мощность завода — 24 тыс. т/год.

В Украине также проводится широкая научно-исследовательская работа, посвященная энергетическим культурам. Большой вклад в это направление вносит Институт биоэнергетических культур и сахарной свеклы НААН Украины. Так, например, в Институте ведется работа по изучению генофонда ивы рода *Salix L.* различного эколого-географического происхождения по характеристикам продуктивности, пригодности к механизированному уходу и сбору, энергетической ценности. На опытном участке Института высажено 11 видов и 3 гибрида *Salix L*. Исследуются вопросы урожайности сахарного сорго, мискантуса и других культур. Подготовлен Атлас высокопродуктивных биоэнергетических культур.

Проблемы национального производителя

Несмотря на довольно активное развитие в последние годы выращивания энергетических культур в Украине, существует ряд проблем, требующих разрешения. Одна

из них — отсутствие энергокультур в классификаторе сельскохозяйственных культур. На сегодня энергетическая ива включена в классификатор как техническая культура, тогда как мискантуса и других энергокультур там нет вообще. Это может создать юридические и другие проблемы на определенном этапе хозяйственной деятельности производителей этих культур. Кроме того, случается, что производители энергокультур сталкиваются с необходимостью уплаты НДС при оформлении своих отношений с инвестором, тогда как они еще не произвели никакой продукции. Это связано с тем, что продукцией считаются саженцы, выращенные самой компанией для использования на своих же плантациях. Еще одна проблема заключается в том, что производитель энергокультур не считается «сельхозпроизводителем» и не имеет соответствующих льгот (например, по аренде техники), пока он не произвел первую продажу своего урожая. Учитывая, что урожай ивы и тополя собирается каждые 3–4 года, период до первой продажи является достаточно длительным.

Для ускорения развития данного сектора в Украине Биоэнергетическая ассоциация Украины считает необходимым внедрить механизмы государственного стимулирования выращивания энергетических культур. Один из предлагаемых механизмов — субсидирование энергоплантаций на уровне 10 тыс. грн./га. Другим инструментом может быть частичное покрытие государством процентных ставок коммерческих банков. Рекомендуется предусмотреть соответствующее финансирование из Госбюджета Украины в 2015–2017 гг.

(Продолжение следует)