

УДК 620.92

ЖЕЛЕЗНАЯ Т.А., МОРОЗОВА А.В.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ КУЛЬТУРЫ КАК ЭФФЕКТИВНЫЙ ИСТОЧНИК ВОЗОБНОВЛЯЕМОЙ ЭНЕРГИИ

Проанализовано возможности использования энергетических культур для производства энергии в странах Европы и США. Рассмотрены существующие виды энергетических культур и их основные характеристики. Проанализована ситуация в Украине и выполнено технико-экономическое обоснование проекта по выращиванию и утилизации энергетической тополя. Показано возможные пути повышения экономической доцельности таких проектов в условиях Украины.

Проанализирована возможность использования энергетических культур для производства энергии в странах Европы и США. Рассмотрены существующие виды энергетических культур и их основные характеристики. Проанализирована ситуация в Украине и выполнено технико-экономическое обоснование проекта по выращиванию и утилизации энергетического тополя. Показаны возможные пути повышения экономической целесообразности таких проектов в условиях Украины.

The possibility of using energy crops for energy production in Europe and the USA is analyzed. Different types of energy crops and their main properties are considered. The current situation in Ukraine is analyzed, and the techno-economic substantiation of a project for growing and utilization of energy poplar is performed. Possible ways to improve economic indicators of such projects in Ukraine are shown.

ЕС – Европейский Союз;
ТЭС – тепловая электростанция;
ТЭЦ – теплоэлектроцентраль;

н.э. – нефтяной эквивалент;
у.т. – условное топливо.

Энергетические культуры представляют собой растения, которые специально выращиваются для использования в качестве топлива или для производства биотоплива. В Европе интерес к энергетическим культурам возник в 1970-е годы в связи с неожиданно разразившимся энергетическим кризисом. Начались поиски альтернативных источников энергии, включая энергетические культуры. В настоящее время выращивание и утилизация энергетических культур остается актуальным вопросом как для Европейских стран, так и для Украины.

Потенциал энергетических культур для стран ЕС-27 оценивается в 46 млн. т н.э./год при условии использования 10% пахотных земель и сравнительно низкой урожайности. Если же исходить из использования 20% пахотных земель и более высокой урожайности (20 т сухой массы/га), то потенциал составляет 182 млн. т н.э./год (табл. 1). За счет этого можно покрыть около 9% общей энергетической потребности Европы в 2030 г., которая оценивается в 2000 млн. т н.э. [1–3].

Виды энергетических культур

Энергетические культуры можно разделить на несколько видов: однолетние травы, многолетние травы, быстрорастущие деревья и древовидные растения. К энергетическим можно также отнести обычные сельскохозяйственные культуры при их выращивании для производства жидких топлив – биодизеля (рапс, подсолнечник) и биоэтанола (сахарная свекла, кукуруза). Однако эти виды культур не являются предметом рассмотрения данной статьи.

Однолетние травы (сорго, кенаф и др.) могут быть легко интегрированы в обычный сельскохозяйственный севооборот. С точки зрения выращивания и сбора они близки к традиционным культурам. Например, сорго медвяное – культура с большим объемом фитомассы, содержащей много сбраживаемых сахаров и горючей органики (волокнистая масса). В зависимости от местности и условий выращивания его урожайность составляет 70...140 т/га, или 20...49 т сухой массы/га (если специально не указано, то речь идет о

Табл. 1. Потенциал энергетических культур в странах ЕС-27 [1], млн. т н.э./год

Урожайность, т сухой массы /га	Площадь земель под выращивание энергетических культур, % от общей площади пахотных земель		
	10%	20%	30%
10	46	91	137
20	91	182	274
30	137	274	410

Табл. 2. Характеристики Европейских плантаций быстрорастущих деревьев

Показатель	ива	тополь	акация
Плотность посадки, тыс. стволов/га	18...25	6...17	8...12
Оборот, лет	3...4	2...5	2...4
Диаметр ствола при уборке, мм	15...30	20...120	20...40
Высота при уборке, м	3,5...5	2,5...7,5	2,0...5,0
Урожайность, т/га (за уборочный цикл)	30...60	40...100	20...40
Влажность, % масс.	50...55	50...55	40...45

“свежей” биомассе, т.е. влажностью порядка 50%). Растение легко приспосабливается к различным почвенным и погодным условиям, наибольшая урожайность наблюдается в странах южной Европы, например, в Греции. В отличие от медвяного, волокнистое сорго включает относительно мало сбраживаемых сахаров, и его энергетический потенциал основан на большом содержании лигноцеллюлозного волокна.

Многолетние травы (мискантус, просо прутьевидное, двуклосточник тростниковидный и др.) существенно отличаются от обычных сельскохозяйственных культур. Их севооборот составляет 10...15 лет, они практически не требуют подготовки почвы, а дальнейшая обработка не требует больших затрат. Урожай собирается ежегодно с применением обычной сельскохозяйственной техники. При использовании правильной технологии посадки и ухода многолетняя трава может улучшить состояние истощенной почвы. Глубокие корни укрепляют структуру почвы, увеличивают содержание органических веществ в ней и служат своего рода фильтрами для грунтовых вод. Отсутствие ежегодного вспахивания также оказывает положительное влияние на почву (например, уменьшается эрозия).

Типичным представителем многолетних трав является мискантус – древовидная трава с мощной корневой системой (до 2,5 м в глубину), происходящая из Азии. После посадки траву можно собирать ежегодно на протяжении около 15 лет. К третьему году урожай составляет 10...16 т сухой массы/га. Для культуры характерен быстрый рост, особенно жарким летом, и морозостойкость. Теплота сгорания мискантуса составляет 17 МДж/кг (сухой массы), содержание золы – 2,7%. Исследования, проведенные в Греции, показали, что при благоприятных климатических условиях (не очень сухое лето), урожайность может достигать 28...30 т сухой массы/га. Наилучшие результаты были получены при плотности посадки 10 тыс. и более саженцев на гектар и внесении азотного удобрения массой 50 кг/га [4].

Плантации быстрорастущих деревьев и древовидных растений (ива, тополь, акация и др.) также существенно отличаются от традиционных сельскохозяйственных или лесных посадок. Такие растения высаживают примерно на 10...15 лет и собирают урожай каждые 2...5 лет. Густота посадки очень высокая, до 25 тыс. саженцев на гектар (в среднем порядка 10 тыс./га) (табл. 2). Ива выращивается в основном в скандинавских

странах и Великобритании, тополь – в Центральной Европе, акация – в Средиземноморском регионе.

Биомасса с плантаций энергетических культур может использоваться как биомасса другого происхождения (солома, лузга подсолнечника, отходы древесины), а именно, для получения тепловой и электрической энергии (прямое сжигание, совместное сжигание с ископаемыми топливами, газификация), для производства биогаза (анаэробное сбраживание), гранул и брикетов. Наиболее перспективным сегодня представляется совместное сжигание с углем, производство биогаза и гранул.

Энергетические культуры в странах Европы и США

Согласно новой политике ЕС в сфере сельского хозяйства, с 2003 г. выращивание энергетических культур субсидируется в размере 45 евро/га в год. До 2006 г. субсидия распространялась на площадь 1,5 млн. га без разделения по отдельным странам. В 2006 г. Европейская Комиссия предложила увеличить эту площадь до 2 млн. га и разрешить дополнительные национальные субсидии на выращивание энергетических культур [5, 6].

Италия

Интересным и достойным подражания примером является Италия, где выращивание быстрорастущего тополя и поставка биомассы на электростанции представляет собой хорошо отлаженный коммерческий процесс. Рынок контролируется несколькими частными корпорациями, каждая из которых включает компанию по созданию новых клонов растения и несколько консультационных фирм. Типичным примером является Национальный консорциум по возобновляемой энергетике (CNER), который состоит из компании Alasia New Clones и четырех консультационных компаний, отвечающих за разные области страны: Consorzio GBE Ltd. – северо-запад, R-Innova Ltd. – центр и север, Biomasse Europa Ltd. – северо-восток, Atena Ltd. – центр и юг. Консорциум помогает фермерам получать субсидии на выращивание тополя, централизованно закупает урожай с плантаций и поставляет био-

массу на электростанции согласно заключенным контрактам. Эта модель используется и другими корпорациями, а также “экспортируется” в другие страны, поскольку итальянские корпорации предлагают свои услуги в Австрии, Чехии и Венгрии [7].

Развитие плантаций быстрорастущих деревьев в Италии связано с большой потребностью в древесной биомассе как топливе. Установленная мощность ТЭЦ и ТЭС на древесине в стране составляет более 200 МВт и 400 МВтэ, суммарное потребление древесного топлива достигает 4 млн. т/год. Только за последние несколько лет на севере Италии высажено более 5 тыс. га новых плантаций тополя. Основная часть (4 тыс. га) находится в Ломбардии, которая первой ввела дополнительные гранты на выращивание энергетических культур. Урожайность достигает 30...35 т/га в год. Себестоимость биомассы с учетом транспортировки потребителю не превышает 25 евро/т, что хорошо согласуется с максимальной закупочной ценой, установленной местными электростанциями (45 евро/т). Технико-экономические расчеты показывают, что при себестоимости более 25 евро/т выращивание энергетического тополя становится экономически нецелесообразным. Дальнейшими путями снижения себестоимости являются использование новых клонов с улучшенными показателями урожайности, совершенствование технологии сбора урожая и т.п. Например, Alasia New Clones вывела новые клоны тополя со средней урожайностью 45 т/га в год.

Дания

В Дании плантации энергетических культур начали развиваться еще в 1997 г., согласно четырехлетней демонстрационной программе, в которой участвовали семь исследовательских институтов и одна электростанция. Целью программы было создание основ для широкомасштабной утилизации энергетических культур после 2005 г. с достижением показателя 3 млн. т к 2030 г. Программа была сориентирована на такие растения, как ива, пеннисетум красный (слоновья трава), двукисточник тростниковидный, конопля и др. и охватывала весь спектр вопросов, связанных с плантациями: высадка растений и уход за ними;

Табл. 3. Выращивание и утилизация энергетических культур в Дании [9]

Вид культуры	Площадь выращивания, га	Способ утилизации биомассы
Рапс	58555	Производство биодизеля
Ива	1501	Прямое сжигание
Тополь	67	Прямое сжигание
Низколесье	1610	Прямое сжигание
Двукосточник тростниковидный	12	Прямое сжигание
Мискантус	64	Прямое сжигание
Злаковые травы и клевер	100	Производство биогаза
Кукуруза	75	Производство биогаза

сбор, хранение и транспортировка урожая; выбор сортов культур; характеристики биомассы как топлива и проведение тестов по сжиганию; воздействие плантаций на окружающую среду и ландшафт; углеродный баланс почвы; экономические показатели проекта [8].

В настоящее время энергетические культуры в Дании выращиваются на 62 тыс. га, что составляет 2,2% общей площади сельскохозяйственных земель. Наибольшую территорию занимает рапс, используемый для производства биодизеля (табл. 3). Основным способом утилизации биомассы энергетических культур является прямое сжигание, хотя все большее внимание уделяется производству биогаза. Общая схема процесса получения биогаза следующая. Смесь биомассы энергетических культур, навоза, навозных стоков и жира подвергается санитарной обработке и подается в метантенк. Произведенный биогаз используется для выработки тепловой и электрической энергии. Сброженная масса из реактора подвергается дегидратации, в результате чего образуются жидкая и твердая фракция. Жидкость представляет собой ценное органическое удобрение, твердая биомасса может использоваться для компостирования или прямого сжигания [9].

По оценке специалистов, производство биогаза из энергетических культур является выгодным с точки зрения соотношения затраченной и полученной энергии. Например, для мискантуса полученная энергия (20 ГДж/га) в 2,86 раз превышает затраченную на выращивание (7 ГДж/га).

Для кукурузы это соотношение составляет 1,92, клевера – 1,22. Общий потенциал энергетических культур для производства биогаза, при условии использования 10% сельскохозяйственных земель, составляет в Дании 27 ПДж/год. За счет этого можно покрыть до 4% общего энергопотребления страны.

США

Выращивание энергетических культур динамично развивается в США при поддержке федеративного и местных бюджетов. По оценке экспертов из Национальной лаборатории “Оук Ридж” (Oak Ridge National Laboratory), для выращивания проса прутьевидного в стране может быть использовано 16,8 млн. га с ежегодным урожаем порядка 188 млн. т сухой массы. При этом себестоимость 1 т сухой массы составит менее 50 долларов с учетом транспортировки. Используя потенциал энергетических культур и отходов растениеводства, США могут покрыть 14% своей потребности в электроэнергии. Выращивание и утилизация энергетических культур является важной составляющей нового Плана развития биоэнергетики до 2030 г., принятого в конце 2007 г. [10].

В стране действует программа по консервации и восстановлению сельскохозяйственных земель, согласно которой более 13 млн. га было выведено из оборота. Часть этих земель может быть использована для выращивания многолетних энергетических трав. Так, в штате Айова на 2,2 тыс. га выращивается просо для совместного сжигания

Табл. 4. Электростанции, практикующие совместное сжигание проса и угля в США [12]

Название ЭС	Мощность котла, МВт _т	Производство электроэнергии из биомассы, %
Ottumwa	700	5
Gadsden	70	5
Blount St.	50	10

с углем на крупной электростанции возле г. Оттамуа. Планируется расширить плантацию до 20 тыс. га с ежегодным урожаем 200 тыс. т, что даст возможность заместить 5% (масс.) топлива на электростанции. Уже сейчас несколько крупных ЭС практикуют совместное сжигание проса с углем, при этом доля биомассы в производстве электроэнергии составляет от 5 до 10% (табл. 4). Планируется внедрение технологий совместного сжигания проса с природным газом [11, 12].

Ситуация в Украине

В Украине выращивание энергетических культур находится на исследовательской стадии. НИИ экобиотехнологий и биотехники Национального аграрного университета Украины достиг успехов в выведении новых клонов тополя и имеет собственные экспериментальные плантации. Интересные наработки имеет Национальный ботанический сад по видам энергетических культур, которые могли бы выращиваться в Украине. Эксперимент с плантацией мискантуса начался в 2007 г. в Харьковской области. Культура высажена на 10 га земли, первый урожай будет собран через три года. За это время в г. Первомайском планируется построить завод по производству гранул из мискантуса [13].

Технико-экономический анализ показывает, что в условиях Украины целесообразность выращивания энергетических культур во многом зависит от цены, по которой можно продать выращенную биомассу. Выполнена оценка затрат и прибыли для плантации энергетического тополя (клон с улучшенными показателями) с общим периодом существования 10 лет и сбором урожая каждые 2 года (всего 5 циклов). Согласно результатам расчета, при закупочной цене на биомассу 29 евро/т и выше затраты полностью окупаются

уже после первого сбора урожая, т.е. через 2 года. Рассмотрено 4 варианта потребителя для выращенной биомассы, каждому из которых соответствует своя максимальная закупочная цена. Цена 29 евро/т соответствует случаю коммерческого потребителя природного газа (например, котельная). Во всех вариантах за максимальную принята цена, по которой потребитель покупает ископаемое топливо с учетом разницы теплотворной способности газа/угля и энергетического тополя. Считается, что биомасса поставляется потребителю для совместного сжигания с традиционным топливом. Наилучшие результаты получены для случая коммерческой угольной котельной (цена биомассы 39 евро/т), когда уже после первого цикла проекта прибыль составляет 44% вложенных средств. Наименее привлекательные результаты получены для коммунального потребителя природного газа (цена биомассы 18 евро/т).

Результаты расчетов представлены в табл. 5, 6. Для сравнения в табл. 5 приведены также данные для восточноевропейских стран ЕС по оценке итальянской компании Alasia New Clones (поэтому все показатели приведены в евро). Анализ результатов показывает, что выращивание энергетического тополя в условиях Восточной Европы является более выгодным, чем в Украине, учитывая ежегодные субсидии для стран ЕС и более высокую стоимость биомассы. Для случая, приведенного в табл. 5, отношение общая прибыль/общие затраты составляет 1,45 для восточноевропейских стран ЕС и 1,07 – для Украины.

Экономические показатели проекта по выращиванию энергетических культур в Украине могут быть улучшены при использовании т.н. “зеленого” тарифа на электроэнергию и подготовке проектов совместного осуществления в рамках Киотского протокола. Проект закона о “зеле-

Табл. 5. Техничко-экономические показатели выращивания энергетического тополя в Украине (расчет на 1 га)

Показатели	Восточная Европа (ЕС)	Украина
Посадка (покупка саженцев, вспахивание почвы, внесение удобрений, механическая посадка, применение гербицидов после посадки), евро/га	1415	833
Первый цикл (годы 1-2):		
- уход за плантацией (культивация, боронование, полив), евро/га	550	337
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю, евро/га	1080	450
- урожайность, т/га	60	60
- закупочная стоимость биомассы, евро/т	45	29
- доход от продажи биомассы, евро/га	2700	1740
Второй цикл (годы 3-4):		
- уход за плантацией (боронование, полив, применение пестицидов), евро/га	430	315
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю, евро/га	1440	600
- урожайность, т/га	80	80
- закупочная стоимость биомассы, евро/т	45	29
- доход от продажи биомассы, евро/га	3600	2320
3-5 циклы (годы 5-10):		
- уход за плантацией, евро/га	1290	944
- сбор урожая и доставка биомассы потребителю, евро/га	4320	1800
- урожайность, т/га	80	80
- закупочная стоимость биомассы, евро/т	45	29
- доход от продажи биомассы, евро/га	10800	6960
- удаление пеньков после завершения срока существования плантации, евро/га	350	54
Весь период существования плантации (10 лет):		
- средняя урожайность за год, т/га	38	38
- суммарные затраты, евро/га	10875	5333
- суммарный доход, евро/га	26630*	11020
- общая прибыль (разность затрат и дохода), евро/га	15755	5687
- общая прибыль/общие затраты	1,45	1,07

* с учетом субсидий для стран ЕС

ных” тарифах прошел первое чтение в Верховной Раде в апреле 2007 г. Ожидается, что в ближай-

шем будущем он снова будет вынесен на рассмотрение. Если электростанция использует энерге-

Табл. 6. Сравнение вариантов расчета технико-экономических показателей выращивания энергетического тополя в Украине при разной закупочной цене на биомассу

Экономические показатели	Потребитель (вид основного топлива)				
	ТЭС (энергетический уголь)	Коммунальная котельная (уголь)	Коммерческая котельная (уголь)	Коммунальная котельная (природный газ)	Коммерческая котельная (природный газ)
Стоимость традиционного топлива, евро/т евро/тыс. м ³	47,55	81,52	122,28	93,21	149,46
Закупочная цена биомассы, евро/т	20,42	25,94	38,90	17,84	28,61
Суммарные затраты на выращивание энергетического тополя и сбор урожая, евро/га	5333	5333	5333	5333	5333
Суммарный приход, евро/га	7600	9880	14820	6840	11020
Суммарная прибыль, евро/га	2267	4547	9487	1507	5687
Прибыль/затраты	0,43	0,85	1,78	0,28	1,07

тический тополь или другой вид биомассы в качестве дополнительного топлива, то соответствующий объем выработанной электроэнергии может быть продан по повышенному тарифу, а часть дохода от этого – потрачена на приобретение биомассы по более высокой цене. Аналогично единицы снижения выбросов парниковых газов, полученные от использования биомассы в качестве топлива, могут быть проданы, а доход – использован на увеличение закупочной цены биомассы. Предварительные оценки показывают, что особенно эффективным является использование “зеленого” тарифа.

Выводы

1. Энергетические культуры являются надежным и эффективным источником биомассы для использования в качестве топлива. Энергетические плантации динамично развиваются в Ев-

ропе и США, все более выходя на коммерческий уровень. Выращивание энергетических культур имеет также положительный экологический эффект в плане улучшения состояния и структуры почвы.

2. Украина имеет большой потенциал для выращивания и использования энергетических культур в первую очередь таких, как тополь, ива, мискантус и др. Он оценивается в 5 млн. т у.т./год. Предварительные расчеты показывают, что энергетические плантации могут быть экономически рентабельными в Украине при наличии надежного потребителя биомассы, который может приобрести ее по коммерческой цене. Экономические показатели проектов по выращиванию энергетических культур могут быть улучшены за счет введения соответствующих государственных субсидий, использования “зеленых” тарифов и механизмов Киотского протокола.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Holm-Nielsen J.B., Oleskowicz-Popiel P., Al Seadi T.* Energy crop potentials for bioenergy in EU-27. Proceedings of 15th European Biomass Conference and Exhibition (CD), 7-11 May 2007, Berlin, Germany.
2. *Perlack R.D., Wright L.L., Turhollow A.F., Graham R.L., Stokes B.J., Erbach D.C.*: Biomass as feedstock for a bioenergy and bioproducts industry: the technical feasibility of a billion-ton annual supply (DOE/GO-102005-2135, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, 2005).
3. *Biofuels* in the European Union. A vision for 2030 and beyond. Final draft of the Biofuels Research Advisory Council. (2006).
4. *Danalatos N.G., Archontoulis S.V.* Influence of plant density and N-fertilisation on the growth and biomass productivity of *Miscanthus Sinensis* under Central Greek conditions. Proc. of Second World Biomass Conference, Rome, Italy, 10-14 May 2004, vol.1, P. 327-330.
5. Council Regulation (EC) No 1782/2003.
6. *Report* from the Commission to the Council on the review of energy crops scheme. 2006/0172 (CNS).
7. *Spinelli R.* Short rotation coppice (SRC) production in Italy. CNR – Ivalsa, Sesto Fiorentino. Austrian Biomass Union website www.biomasseverband.at.
8. *Nikolaisen L. et al.* Straw for Energy Production. Technology – Environment – Economy. Trojborg Bogtryk 1998, – 53 p.
9. *Moller H.B.* Energetic and environmental potentials for using energy crops to biogas in Denmark – introductory results of Nordic project. BiogasOresund website <http://www.biogasforum.se>.
10. *Biomass* Multi Year Program Plan. Office of the Biomass Program Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. November 2007.
11. *Growing* Energy on the Farm: Biomass Energy and Agriculture. Union of Concerned Scientists website <http://www.ucsusa.org>.
12. *Hughes E.E.* Biomass cofiring in the U.S. – status and prospects. Proc. of Third Chicago/Midwest Renewable Energy Workshop, June 19-20, 2003. Illinois Institute of Technology website www.iitcare.org.
13. *Ракитова О., Овсянко А.* Мискантус пришел в Украину и вскоре появится в России // Международная биоэнергетика. – 2007. – № 3. – С. 18–19.

Получено 21.04.2008 г.