

экспериментов, используя осадки сточных вод других предприятий данной отрасли промышленности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Тиунов, А.В. Вермикомпост, вермикомпости-рование и компостные черви: направление научных исследований в последнее десятилетие / А.В. Тиунов // Материалы II Международной конф. «Дождевые черви и плодородие почв». – Владимир, 2004. – С. 3-6.
2. Терещенко, Н.Н. Эколого-микробиологические аспекты вермикультивирования / Н. Н. Терещенко. – Новосибирск: Наука, 2003. – 113 с.

3. Янисов, Р. А. Совершенствование технологии производства вермикомпоста с разработкой и обоснованием оптимальных параметров устройства для формирования гряд и распределения подкормки: дис... канд. техн. наук / Р. А. Янисов. – Саратов, 2003. – 185 л.

4. Отходы целлюлозно-бумажной промышленности и утилизация их в земледелии: ч. I. / И.И. Лиштван [и др.] // Природопользование. – 2012, №21. – С. 229 – 235.

5. Удобрения органические. Общие правила к методам анализа: ГОСТ 26712. – 1994. – Введ. 01.01.1996. – М: Межгос. стандарт, 1994. – 64 с.

УДК 633.2:620.95

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 10.01.2012

ЭКОЛОГО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ТЕХНИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БИОМАССЫ НА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗЕМЛЯХ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ

Т.В. Кулаковская, докт. с.-х. наук, профессор (БГЭУ)

Аннотация

Развитие многофункционального сельского хозяйства в Европе способствовало появлению новых научных направлений, исследующих вопросы производства кормов, продуктов питания и биомассы для энергетики в целях сохранения биоразнообразия и рационального использования природных ресурсов. Климатические изменения и высокая стоимость ископаемого топлива способствовали развитию производства биомассы на энергетические цели. Влияние видового состава травостоя, интенсивности использования и силосования на производство биогаза и биотоплива исследованы в полевых и лабораторных экспериментах.

Development of multifunctional agriculture in Europe contributed to the emergence of new scientific fields, exploring the issues of production of feed, food and biomass for energy in order to protect biodiversity and natural resources. Climatic change and the high cost of fossil fuels contributed to the development of production of biomass for energy purposes. The influence of the species composition of vegetation, intensity of use and silage production of biogas and biofuels were investigated in field and laboratory experiments.

Введение

Активный процесс роста народонаселения, сокращение разведанных запасов первичных энергетических ресурсов и отсутствие стабильности в ценовой политике, а также состояние окружающей природной среды в свете климатических изменений определили новые пути получения и использования энергетических ресурсов при снижении негативного воздействия на биосферу. В этой ситуации большое значение приобретает использование нетрадиционных энергетических источников, и в частности, выращивание биомассы для получения биогаза, твердого и жидкого топлива. Производство растительных ресурсов на сельскохозяйственных землях и последующее использование на энергетические цели требует определенных финансовых затрат и приводит к измене-

нию структуры посевных площадей в секторе сельскохозяйственного производства. В настоящее время на сельскохозяйственных землях Европы существует конкуренция между производством сельскохозяйственной продукции и биомассы на энергетические цели, так как использование пахотных земель ограничено существующей структурой земельных угодий. Это вызывает необходимость привлечения новых земель, и в частности, лугопастбищных угодий, которые играют ключевую роль с точки зрения сельскохозяйственного производства и экологических аспектов в Европе. В странах Европейского Союза лугопастбищные угодья занимают общую площадь в 69 млн га, что составляет 36 % всех сельскохозяйственных земель. Согласно расчетам, теоретический потенциал этих территорий для производства энергетических культур составляет от 9 до 15 млн га [1, 2].

Производство биоэнергетических культур актуально и перспективно, но при этом оно не должно конкурировать с другими культурами. Для этого требуется решить следующие задачи: оптимизировать производство и использование биомассы для установления баланса между потребностями в энергетических ресурсах и возможностями сельскохозяйственного производства; повысить эколого-экономическую эффективность производства энергоресурсов из биомассы при снижении негативного воздействия на окружающую природную среду согласно принципам рационального природопользования.

В данной статье сделано обобщение результатов научно-практических исследований и проектов за последние 5 лет в области производства и использования биомассы на энергетические цели. Все проанализированные материалы изданы в книгах статей и тезисов под руководством Европейской Федерации Лугопастбищного Хозяйства Европы и были представлены на разных научных форумах, участником которых была автор статьи.

Основная часть

Теоретические аспекты производства и использования биомассы на энергетические цели

В настоящее время сформирован основной видовой состав растений, используемых на энергетические цели. Существует 2 группы культур, которые уже исторически относят к первому и второму поколениям растений, используемых для производства агропелли. Сельскохозяйственные культуры первой группы выращиваются в чистом виде на плодородных пахотных почвах. Они способны производить биоэтанол из крахмала или сахара зерна кукурузы, пшеницы, ячменя, тритикале, сахарного тростника, сахарной свеклы или используются для производства биодизеля (экстрагирование масла из семян рапса и сои, а также пальмовое масло). Ко второй группе растений относятся виды с высоким содержанием целлюлозы и лигнина, которые используются для получения агропелли. В эту группу входят однолетние и многолетние культуры, кукурузный силос и травы, относящиеся к группе C4 (мискантус, просо), а также быстро отрастающие при интенсивном использовании и нетребовательные к плодородию почвы, различные виды тополя и ивы. К ним также относятся высокопродуктивные многолетние травы, произрастающие на культурных лугопастбищных угодьях, и многолетние растения с естественных лугов и пастбищ из различных хозяйственно-ботанических групп (злаковые – двукосточник тростниковый (*Phalaroides arundinacea* Rausch.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.), тимофеевка луговая (*Phleum pratense* L.), райграс пастбищный (*Lolium perenne* L.) и высокий (*Arthenatherum elatius* L.), овсяница тростниковидная (*Festuca arundinacea* (Hack.) Tzvel.), луговая (*Festuca pratensis* Huds.) и красная (*Festuca rubra* L.), лисохвост луговой (*Alopecurus pratensis* L.), экзотический вид растений – мискантус (*Miscanthus* spp.); бобовые –

различные виды люцерны (*Medicago* L.), козлятник восточный (*Galega orientalis* Lam.), клевер луговой (*Trifolium pratense* L.); естественные травостои – различные виды высокорослого разнотравья, трищетинник (*Trisetum* Pers.), белоус (*Nardus* L.) [1-4]. Лугопастбищные растения используются на энергетические цели, как в чистом виде, так и в травосмесях.

В последнее время большое внимание уделяется производству и использованию интенсивно развивающихся древесных растений (разные виды тополя и ивы), выращиваемых для получения энергетических ресурсов на сельскохозяйственных землях. Опубликованы результаты исследований по выращиванию этих видов для получения энергетических ресурсов на землях, подверженных радиоактивному загрязнению, где практически нельзя производить сельскохозяйственную продукцию. В этом случае конкурентные отношения между растениями нивелируются, а получение экономического эффекта гарантировано.

Пути и возможности трансформации биомассы лугопастбищных угодий в биотопливо

В настоящее время существуют два основных направления в использовании биомассы с лугопастбищных угодий для энергетических целей: анаэробная ферментация (производство биогаза) и термальная обработка (сжигание сена). Однако и в первом и во втором случае имеют место недостатки и преимущества. Процесс сжигания сена осложняет высокое содержание минеральных веществ, и особенно накопление золы, которая вызывает ряд проблем. Травы содержат большое количество сырого азота, серы, хлора, калия, которые осложняют процесс сжигания (задержка массы в реакторе и коррозия металла) и могут способствовать образованию оксидов азота (парниковый газ). Данные технологические недостатки нивелируются более ранним периодом скашивания травостоя, при котором содержание этих элементов уменьшается. Анаэробная ферментация биомассы растений, используемых для производства биогаза, может проходить с осложнениями в результате высокого содержания лигнина, который увеличивает время присутствия биомассы в реакторе. В этом случае необходимо учитывать, что биомасса растений, полученная при экстенсивной системе ведения лугопастбищного хозяйства, характеризуется высоким содержанием лигнина, так как растения скашиваются в период цветения. Следовательно, необходима новая концепция развития производства биомассы для энергетических целей с использованием инновационных решений и разработкой последующих перспектив. Предложения ученых Германии, которые сформулированы в 2008 году, носят инновационный характер. Исследователи предложили использовать процесс механического обезвоживания (прессование сырой массы) до процесса анаэробного разложения, что способствует повышению качества исходного растительного сырья (силос). Исследователи разработали принципиально новую схему получения интегрированного биогаза и твердо-

го топлива на основе биомассы сельскохозяйственных растений (табл. 1).

Таблица 1. Схема производства биогаза и твердого топлива из биомассы [3, 4]

Биомасса (силос)	
Механическое обезвоживание (прессование)	
Жидкая фракция	Твердая фракция
Производство биогаза (брожение)	Сушка
СНР	Твердое топливо
Электричество, тепло	

Согласно предложенной схеме, после процесса обезвоживания травяные брикеты пригодны для термической обработки, а жидкость, выделенная в процессе прессования, используется для производства биогаза. При более детальном изучении вышеуказанной схемы обнаружили специфические особенности, которые необходимо учитывать в последующих технологических процессах. При прямом сжигании биомассы растений с обильным содержанием разнотравья возникают проблемы из-за большого содержания минеральных веществ. Механическое обезвоживание биомассы значительно повышает качество производимой продукции, так как уменьшается содержание воды и снижается содержание золы. В результате образуется субстанция твердого топлива с улучшенными качествами для сжигания. Более того, предотвращаются повреждения от коррозии, которые возникают при избытке хлора и калия. Уменьшение азота в брикетах способствует сокращению выброса оксидов азота в результате сжигания, что способствует снижению эмиссии парниковых газов в целом. Энергия, сконцентрированная в брикетах, соответствует необходимым требованиям и может быть использована также для электрификации процесса при получении биогаза.

Жидкая фракция содержит компоненты, которые легко подвергаются ферментации, и продуцирует количество биогаза от 450 до 500 литров СН₄ на кг органической сухой массы [3]. При дегидратации кукуруза и травяной силос подвергаются ферментации на 90 % и этот процесс занимает период не более недели. Результаты свидетельствуют о значительном воздействии данного технического решения на получение желаемого результата, и подтверждают возможность использования растительных сообществ, произрастающих на лугопастбищных угодьях, в качестве возобновляемых энергетических ресурсов.

Развернутые научные исследования экспериментальных травостоев, включающих от одного до 60 видов растений (злаковые, бобовые, высокорослое и низкорослое разнотравье), были проведены в Германии с целью определения их теплотворной способности и ценности (количество тепла, выделенного в процессе сжигания), а также определения валового выхода энергии [3, 4]. В процессе исследований установили, что видовое разнообразие растений позитивно воздействует на валовой выход (сбор) энергии, диапазон колебаний которого составляет 56-116-152 GJ на га

в год в зависимости от количественного состава травостоя и хозяйственно-ботанической группы растений. Видовое обилие не оказывает влияния на повышение теплотворной способности, однако бобовые культуры играют важную роль в увеличении этого показателя и валового сбора энергии. Состав травостоя оказывает положительное влияние на теплотворное качество топлива (16,3- 19,2 MJ на кг сухой массы) при уменьшении дозы внесения азота. Содержание золы было достаточно высоким и в различных травостоях составляло 53-220 г на кг сухой массы. Зола является физическим остатком после сжигания, который негативно коррелирует с уровнем теплотворной ценности. В исследуемых травостоях отмечен повышенный уровень азота (источник эмиссии NOx), содержание которого колебалось от 9 до 38 г на кг сухой массы. Необходимо отметить, что высокий уровень золы и азота требуют специальной обработки топлива для улучшения горючих качеств и повышения процесса горения.

Производство биогаза и сбор метана на лугопастбищных угодьях определяют различные факторы: фенологическая фаза растений и их видовой состав, интенсивность использования травостоя и система управления, способ и метод консервирования (использование инокулянтов). В этой ситуации необходимо определить влияние вышеуказанных факторов и тщательно изучить процессы для оптимизации производства биогаза из биомассы.

При характеристике производства биогаза используют разные показатели: производство биогаза в м³, кг или л на единицу произведенного урожая сухой массы, или использованных удобрений.

В условиях проведения первого укоса на зеленую массу были получены результаты (табл. 2), подтверждающие воздействие видового состава травостоя на производство метана.

Таблица 2. Сбор метана в зависимости от видового состава травостоя [1]

Растение (первый укос, зеленая масса)	Сбор метана	
	1N	1 кг-1 оТМ
<i>Festuca arundinacea</i> (Hack.) Tzvel.	329	
<i>Alopecurus pratensis</i> L.	338	
<i>Phleum pratense</i> L.	366	
<i>Dactylis glomerata</i> L.	366	
<i>Lolium perenne</i> L.	398	
<i>Festuca pratensis</i> Huds.	401	
<i>Festuca rubra</i> L.	456	

Максимальные показатели производства метана обеспечили райграс пастбищный, овсяница луговая и овсяница красная, а минимум определили – овсяница тростниковая и лисохвост луговой, при равных значениях у растений тимофеевки луговой и ежи сборной.

Учеными Латвии проведены исследования производства биогаза из растений козлятника восточного и травосмесей (ежа сборной, райграс пастбищный, овсяница луговая) с участием данного вида. Козлятник восточный многолетнее (более 30 лет), высокопродуктивное растение с высокой азотфиксирующей

способностью (200–450 кг с га). Смесь биомассы различных травостоев с органическими удобрениями (навоз КРС) в соотношении 75 % : 25 % обеспечила выход биогаза 628 м³ на кг сухой массы, при содержании метана 61,2 % [3,4].

В процессе исследований установили, что увеличение содержания сырой клетчатки сдерживает потенциал максимального производства биогаза. Содержание сырой клетчатки определяют содержание гемицеллюлозы и лигнина, но эти вещества с трудом подвергаются биоразложению в анаэробных условиях. В связи с этим необходимо проводить исследования биомассы на предмет содержания клетчатки, гемицеллюлозы и лигнина. В условиях Северо-Запада России (южная Карелия) проведены исследования растительных образцов (фаза начала цветения), принадлежащих к разным семействам и группам (бобовые, злаковые, разнотравье) и произрастающих на культурном сенокосе и естественном пастбище. В биомассе определяли: содержания нейтрально-детергентной клетчатки (NDF), кислотно-детергентной клетчатки (ADF) и кислотно-детергентного лигнина (ADL). Аналитическая работа выполнена в университете г. Дебрецен (Венгрия) с использованием метода NIRS (Near infrared spectroscopy). Результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3. Фракционный состав клетчатки в различных травах, г/кг [1]

Растение	NDF г/кг	ADF г/кг	ADL г/кг
Злаковые			
<i>Alopecurus pratensis</i> L.	572	320	20
<i>Poa pratensis</i> L.	568	308	12
<i>Dactylis glomerata</i> L.	572	330	27
<i>Phalaroides arundinacea</i> Rausch.	583	288	29
<i>Phleum pratense</i> L.	680	352	16
Бобовые			
<i>Trifolium pratense</i> L.	344	262	25
<i>Trifolium hybridum</i> L.	249	199	15
<i>Trifolium repens</i> L.	313	230	7
<i>Galega orientalis</i> Lam.	423	292	24
Разнотравье			
<i>Achillea millefolium</i> L.	348	267	17
<i>Taraxacum officinale</i> Wigg.	171	149	6
<i>Urtica dioica</i> L.	270	209	24

Диапазон колебаний содержания нейтрально-детергентной клетчатки, кислотно-детергентной клетчатки и кислотно-детергентного лигнина в растениях характеризуется широкой амплитудой вариативности в пределах семейства и при сравнении разных хозяйственно-ботанических групп, что подтверждает существование видовой специфики. Результаты проведенных исследований подтверждают разные потенциальные возможности биомассы разных видов растений для производства биогаза.

Данные сравнительных опытов по определению режима использования травостоя на процесс образования биогаза подтвердили, что при проведении трех-

четырех скашиваний травостоя было получено от 2746 до 3459 м³/га метана, а в условиях экстенсивного использования от 649 до 1108 м³/га метана. В экспериментах установлено, что по мере созревания растений сокращается эмиссия метана. Так, в период вегетации уровень метана составлял 221–362 л N kg⁻¹ VS, а в фазу цветения 171–153 л N kg⁻¹ VS [3]. Результаты исследований по производству биогаза в процессе силосования, при воздействии различных культур инокулянтов (*L. plantarum*, *L. rhamnosus*, *L. brevis*, *L. Buchnerie*, *P. Pentasaceus*,) свидетельствовали о различной степени их воздействия на производство метана. В эксперименте определили экономическую целесообразность использования вышеуказанных инокулянтов для приготовления качественного силоса и создания благоприятных условий для процесса анаэробного разложения и получения биогаза [4].

Практическая реализация производства и использования биомассы на энергетические цели

Теоретические аспекты и практическая реализация различных гипотез в виде проведения поисковых научно-исследовательских работ по вопросам производства биомассы на энергетические цели способствовали разработке и проведению широкомасштабных проектов в данной области.

Научно-практический опыт Швеции. С 2003 года в Швеции развивается демонстрационный Европейский проект внутри 5 структурной программы AGROPTI-gas для производства растений, продуцирующих биогаз. Согласно плану собрано 14 000 тонн сепарированных органических отходов производства с 14 000 ферм (домашних хозяйств), 4 000 тонн сточных осадков и 5 000 тонн продукции биомассы с лугопастбищных угодий, производимых на основе контрактов в фермерских хозяйствах. Вся собранная масса подвергается брожению для производства биогаза, который в последующем используется для получения электричества, тепла и транспортного топлива. Суммарное количество произведенного газа эквивалентно 23 000 МВт электричества и 2 300 000 литров горючего топлива [1].

В Шведском университете сельскохозяйственных наук разработана и функционирует научная программа MicroDrive, которая развивает новое направление для устойчивого производства биоэтанола и биогаза на основе биомассы. Традиционно биоэтанол производится из таких культур, как сахарный тростник, сахарная свекла, пшеница и кукуруза. Существует возможность производить биоэтанол из биомассы, содержащей высокий уровень целлюлозы (солома и древесина). Однако биомасса растений с высоким уровнем содержания целлюлозы должна пройти предварительную обработку кислотой или ферментами до процесса дрожжевой ферментации для получения экономически обоснованного количества этанола.

Научно-практический опыт Германии. Развитие процесса производства биотоплива наиболее активно и прогрессивно происходит в Германии. С 2004 года в Германии форсируется развитие направлений в поиске и использовании различных видов растений и

растительного сырья для увеличения получения биогаза, электрической и тепловой энергии. Согласно прогнозам, к 2030 году приблизительно 3 млн га общей площади сельскохозяйственных земель будет производить биомассу на энергетические цели, что в потенциале составит около 25 % площади [3].

С учетом этого разрабатываются общая стратегия в стране и научно-практические программы по изучению существующего биоразнообразия с целью привлечения новых культур для производства биоэнергии. Немецкое федеральное агентство охраны природы German Federal Agency for Nature Conservation взяло на себя обязательства по развитию научного проекта «Стандарты по охране природы при производстве биомассы». Последние разработки ученых Германии находятся в области создания интегрированной системы (IFBB – Integrated generation of solid Fuel and Biogas from Biomass) производства топлива и биогаза из растительных ресурсов при использовании экстенсивной системы на лугопастбищных угодьях в целях сохранения биоразнообразия. Эта концепция практически реализуется в многочисленных исследованиях на различных уровнях: фермы, локальном, региональном. Ученые разработали стратегию предотвращения потери лугопастбищных угодий, используемых для животноводства и производства продуктов питания, а также сохранение биоразнообразия в результате происходящего увеличения производства биомассы на энергетические цели. Данная стратегия включает разработку и решение следующих задач и основных направлений:

1. Определить научно-практические инструменты качественного использования сельскохозяйственных земель в связи с изменением их структуры для многоцелевого использования, чтобы приостановить процесс интенсификации на лугопастбищных угодьях и предотвратить их превращение в пахотные земли.

2. Сохранить баланс между количеством животных и их потребностями в корме, производством продуктов питания и выращиванием необходимого количества биомассы на энергетические цели в соответствии с рациональной структурой землепользования.

3. Разработать действенные инструменты введения и использования региональных, национальных и международных стандартов сертификации при производстве биомассы с обязательным включением экологических аспектов биоразнообразия и баланса парниковых газов.

4. Финансировать научные программы и проекты по проведению сравнительной оценки различных систем хозяйствования (интенсивная, экстенсивная, органическая) в соответствии с балансом парниковых газов и производством биомассы для энергетических целей в целях ослабления воздействия климатических изменений на состояние биосферы.

Заключение

Будущее использования разных систем управления в сельском хозяйстве должно быть основано на

уменьшении энергетических потребностей и затрат. Исследования должны базироваться на разработке балансов между стоимостью энергетических ресурсов и эмиссией парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) при использовании разных систем производства сельскохозяйственной продукции. Необходимо проведение экспериментов в различных агроклиматических условиях, которые должны включать комплексные исследования процессов усвоения и эмиссии углерода растениями и почвой (в контексте парниковых газов) на протяжении всего жизненного цикла с учетом вертикальной и горизонтальной миграции. Совершенствование процесса интеграции разных систем земледелия и управления на пахотных землях и лугопастбищных угодьях сокращает расход энергетических ресурсов и соответствует принципам рационального природопользования.

В Республике Беларусь существуют условия для реализации проектов по выращиванию биомассы в энергетических целях на землях, где отсутствует производство сельскохозяйственной продукции. Практически весь спектр вышеуказанных энергетических растений произрастает на территории страны. Использование биомассы в сочетании с органическими отходами и сточными осадками в целях получения биогаза, а также адаптация схемы производства биогаза и твердого топлива из биомассы являются актуальными для разных регионов Беларуси.

ЛИТЕРАТУРА

1. Biodiversity and Animal Feed Future Challenges for Grassland Production. Proceeding of the 22 th General Meeting of the European Grassland Federation Uppsala, Sweden 9-12 June, 2008, Edited by A. Hopkins, T.Gustafsson, J.Bertilsson, G. Dalin, N. Nilsson-Linde, E. Sporndly SLU Repro Uppsala, vol.13, 2008. – 1032 p.

2. Biodiversity and Animal Feed Future Challenges for Grassland Production Book of abstracts of the 22 th General Meeting of the European Grassland Federation Uppsala, Sweden 9-12 June, 2008, Edited by A. Hopkins, T.Gustafsson, J.Bertilsson, G. Dalin, N. Nilsson-Linde, E. Sporndly, 2008. – 201 p.

3. Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions. Proceeding of the 16th Symposium of the European Grassland Federation Gumpenstein, Austria August 29th - August 31st 2011, Edited by Erich M.Pötsch, Bernhard Krautzer, Alan Hopkins, Walling Ennstaller Druckerei und Verlag Ges.m.b.H.Grobming vol.16, 2011. – 632 p.

4. Grassland Farming and Land Management Systems in Mountainous Regions. Book of Abstracts of the 16th Symposium of the European Grassland Federation Gumpenstein, Austria August 29th - August 31st 2011, Edited by Erich M.Pötsch, Bernhard Krautzer, Alan Hopkins, Walling Ennstaller Druckerei und Verlag Ges.m.b.H.Grobming, 2011. – 123 p.