

Охрана окружающей среды

УДК 6.31.4

Энергоэффективность использования биомассы *Miscanthus sinensis* в качестве биотоплива

Г.А. Булаткин, д.б.н., Институт фундаментальных проблем биологии РАН

На серых лесных почвах Подмосквья выявлена высокая биологическая и энергетическая эффективность возделывания биомассы мискантуса китайского (*Miscanthus sinensis* Anderss.), что дает возможность рекомендовать выращивание этой культуры с целью производства биотоплива. Сравнение пяти видов теплоносителей при использовании на локальном уровне показало, что пеллеты из биомассы мискантуса уступают только магистральному природному газу, которым ещё не в полной мере обеспечено население России.

Ключевые слова: мискантус китайский, *Miscanthus sinensis* Anderss., энергетическая эффективность, биотопливо, альтернативная энергетика, растительная биомасса, почвенное плодородие.

В период резкого роста мировых цен на углеводородные энергоносители во многих странах делались интенсивные попытки использования растительной биомассы в качестве промышленных и бытовых энергоносителей, получения жидкого топлива. В основном этанол и бутанол как экологически чистые добавки к углеводородному топливу и получения смеси, которую называют биотопливом, производятся из зерна, корнеплодов сахарной свёклы, клубней картофеля, сахарного тростника. Перечисленные источники сырья являются продуктами питания и необходимы для растущего населения планеты.

Всё шире используются для получения энергии растительные отходы деревообрабатывающей промышленности и сельского хозяйства, биомасса энергетических лесов, специально посаженных однолетних и многолетних непродуктивных полевых культур. Например, в Италии твёрдая биомасса в виде пеллет составила половину всей возобновляемой тепловой энергии [1].

В США при президенте Б. Обаме делались попытки разработать подходы и полностью отказаться от импорта нефти из стран Персидского залива за счёт использования возобновляемых источников энергии, в т.ч. и целлюлозного этанола [2]. Однако в 2015 г. из целлюлозы было получено только 3,6% от объявленной величины. Основным же источником производства этилового спирта в США является зерно кукурузы [3]. В 2015 г. этого

возобновляемого энергоносителя было произведено около 12,2 млрд галлонов. Новый президент США Д. Трамп заявлял, что не собирается поддерживать альтернативную энергетику, предпочитая солнцу и ветру уголь и природный газ [4]. В чём же причина таких резких колебаний в политике производства энергии в одной из главных стран земного шара?

Основная причина таких противоречий, на наш взгляд, заключается в слабом научном обосновании проблемы производства альтернативной энергии во всех её видах. Действительно, при производстве возобновляемой энергии должна ставиться в первую очередь задача получения дополнительной энергии, т.е. энергии сверх затрат технической энергии на производство энергоносителя [5]. Если в конечном объёме, например, жидкого органического топлива, содержится энергии меньше, чем затрачено технической энергии на его получение на всех этапах производства, — процесс абсолютно энергетически не эффективен и получение данного энергоносителя в больших масштабах не целесообразно. В целом любые дотации при производстве возобновляемой энергии свидетельствуют о том, что в конечном энергоносителе содержание энергии меньше, чем затрачено на его производство. Начальным этапом в оценке целесообразности производства альтернативных носителей энергии из растительного сырья должен служить вывод об энергетиче-

ской эффективности производства растительной продукции в сельскохозяйственном предприятии, то есть оценка соотношения накопленной энергии в биомассе и затрат технической энергии на получение этой биомассы, уборку и хранение.

При расчете энергетических затрат на производство урожая агроэкосистем следует также учитывать, что виды сельскохозяйственных культур, интенсивность применения удобрений, способы обработки почв по-разному влияют на компоненты плодородия почв, устойчивость почвы к эрозийным процессам.

Длительное использование почв без восстановления вещественно-энергетического состава и физических свойств приводит к деградации почвенного покрова и в дальнейшем к значительным потерям продуктивности агроэкосистем.

Поэтому при анализе потоков технической энергии в земледелии необходимо учитывать не только затраты энергоресурсов на производство культуры, но и энергозатраты на воспроизводство почвенного плодородия после той или иной культуры. Эти две величины в сумме составляют совокупные затраты антропогенной энергии в данной агроэкосистеме [5].

Наши исследования на серых лесных почвах Подмосковья в полевом севообороте показали, что наибольшие затраты технической энергии на воспроизводство параметров свойств почв нужны после возделывания пропашной культуры кукурузы. После кукурузы на варианте $N_{90}P_{60}K_{40}$ на простое воспроизводство почвенного плодородия нужно затратить 9857 МДж/га в среднем за год, что соизмеримо с суммой прямых и косвенных энергозатрат на производство надземной биомассы кукурузы на варианте «контроль» (9371 МДж/га).

На втором месте по затратам энергии на восстановление почвенного плодородия стоят зерновые культуры. Опыты с мискантусом китайским показали, что он не оказывает отрицательного влияния на параметры агрономически важных свойств почв и при его возделывании не требуются значительные энергетические затраты на восстановление плодородия. Мискантус — род многолетних травянистых растений семейства Злаки, может ежегодно на протяжении 15-20 лет продуцировать на одном поле. Происходит из стран Юго-Восточной Азии и районов Дальнего Востока.

Посадка мискантуса, даже на части, не занятой сельскохозяйственными культурами площади пашни России, позволит получить большое количество растительной биомассы, сохранить и даже повысить содержание гумуса в почве, предотвратить зарастание пашни кустарником и редколесием. Биомасса может быть использована в начале эксплуатации насаждений для производства топливных пеллет и брикетов, получения целлю-

лозы, а после строительства биоэлектростанций — и для производства жидкого биотоплива.

Исследования на серых лесных почвах показали, что в среднем за пять лет урожай надземной биомассы мискантуса на варианте без удобрений составил 7,0 т/га сухого вещества (с колебаниями от 5,0 до 11,2 т/га). При внесении удобрения — 12,1 т/га с колебаниями от 5,3 до 19,4 т/га в год.

Мискантус является экологически эффективной полевой культурой. Начиная с второго-третьего года произрастания (в зависимости от плотности посадки), мискантус образует сплошной покров из корней на поверхности почвы, что предотвращает водную почвенную эрозию. Кроме того из-за отсутствия механической обработки поля плугами и культиваторами в почве под мискантусом сокращаются интенсивные процессы окисления гумуса. Исследования показали, что за пятилетний период в серой лесной почве под мискантусом содержание гумуса существенно увеличилось. На варианте «контроль» (без удобрений) содержание гумуса в слое почвы 0-20 см повысилось с 1,74% до 2,05%, в слое 20-40 см — с 1,20% до 1,46%. Увеличение произошло за счёт большого поступления в почву корневых выделений органического вещества и корнепада, которые в 1,5 раза больше, чем у кукурузы [6]. С учётом влияния на сохранение почвенного плодородия, энергетическая эффективность (соотношение накопленной в надземной биомассе энергии с затраченной технической на возделывание и уборку) у мискантуса в среднем за 5 лет имела высокое значение и составила на контроле — 10,9, на удобренном варианте — 13,0, а у кукурузы — только 6,7 — на контроле и 5,9 — на удобренных вариантах или в 2 раза ниже, чем на мискантусе.

Более низкая эффективность кукурузы связана с тем, что требуются большие затраты технической энергии на восстановление почвенного плодородия после её возделывания, которые достигают 30-50 % от затрат на производство продукции.

Высокая биологическая продуктивность и энергетическая эффективность мискантуса даёт возможность в первую очередь рассмотреть его в качестве источника тепловой энергии. В некоторых странах уже делаются успешные попытки использовать биомассу мискантуса для изготовления пеллет и сжигания их для получения тепла или электроэнергии [7, 8, 9]. Биомасса мискантуса имеет высокую теплотворную способность — 17-19 МДж/кг [10] и равноценна по этому показателю пеллетам (прессованным опилкам) из древесины.

На Украине проведены сравнительные исследования энергетической эффективности пяти различных видов энергоносителей на примере отопления индивидуального дома [11]. Показано,

что самым экономически выгодным топливом по прямым затратам в 2015 г. являлись древесные пеллеты.

Учёт содержания энергии в единице энергоносителя позволяет более объективно сравнить различные виды топлива.

Наш анализ показал, что наименьшая стоимость 1 МДж энергии в энергоносителях для Московской области приходится на природный газ – 0,14 руб. Обращает на себя внимание очень высокая стоимость 1 МДж энергии (0,60 руб./МДж) в сжиженном природном газе по сравнению с магистральным. На втором месте по стоимости 1 МДж энергии находится электроэнергия по ночному тарифу т 2. Однако ночной тариф действует только с 23 часов ночи до 6 часов утра и в холодные периоды зимы не может обеспечить достаточно комфортную температуру в помещении. При совместном использовании электроэнергии по тарифам т 2 и т 3 средневзвешенная стоимость 1 МДж энергии составляет 0,74 руб., что сравнимо со стоимостью энергии в древесных пеллетах. Из-за высокой стоимости дизельного топлива оно в настоящее время по эффективности находится ниже древесных пеллет. Следует отметить большие затраты по доставке древесных пеллет с заводов изготовителей до потребителя в южном Подмоскovie. Стоимость перевозки оказывается равной 1/2 стоимости самих древесных пеллет. В пеллетах, произведённых вблизи потребителя, стоимость 1 МДж энергии будет равна цене электроэнергии по ночному тарифу.

У каждого типа топлива присутствуют собственные преимущества и недостатки. Цена на тот или иной тип топлива связана в определённой степени с его потребительскими свойствами, а так же с величиной розничных цен на энергоноситель в данный момент времени. Однако простое сравнение энергоносителей по стоимости 1 МДж является недостаточным для конечных объективных выводов об их эффективности, так как необходимо учитывать так же сопутствующие затраты: на подключение к энергосетям, приобретение и доставка котлов, их установку и сроки амортизации этих затрат.

В настоящее время по всей России строится большое количество различных коттеджных и дачных поселков, частных домов, на территориях, расположенных в различных природных и инфраструктурных условиях.

Поэтому более детально рассмотрим сравнительную эффективность применения различных видов топлива на примере модельного коттеджа в южном Подмоскovie. Площадь коттеджа 200 м², построен из деревянного бруса, толщиной 20 см. Средний расход на отопление рассчитывался как необходимое количество энергии для компенсации теплопотерь здания при средней температуре

отопительного сезона, которая в Московской области составляет –2°С. Температура самой холодной пятидневки в области равна –28°С. Величина необходимой тепловой энергии за отопительный сезон для экспериментального коттеджа составляет 187 ГДж.

Для сравнительного анализа нами взяты наиболее распространённые в России отопительные котлы мощностью около 20 кВт: для природного и сжиженного газа – марки Vaillant turbo TEC plus vi 282/5-5, древесных пеллет – Stropuva S20P, для работающем на электроэнергии – Vaillant eloBLOCK VE 21, котёл для дизельного топлива – Kiturami TURBO-17R. Эксплуатационный срок работы отопительных котлов принят в 5 лет. Суммарные затраты на подключение от магистрального газопровода (на расстояние не более 50 м) с учётом проектирования по данным ГУП МО Мособлгаз в настоящее время равны 350 тыс. руб. Срок амортизации этих затрат нами принят в 50 лет. Срок эксплуатации газгольдера – 25 лет.

В таблице приведены расчёты суммарных затрат на отопление модельного коттеджа. Как видно из данных, наименьшие суммарные затраты на отопление (при отсутствии магистрального природного газа) приходятся при использовании пеллетного топлива из растений мискантуса, выращенного недалеко от потребителя. Пеллетные котлы проигрывают только газовым. Пеллетные котлы как раз и предназначаются для домов, где отсутствует магистральное газоснабжение. А при таких условиях обычно используют либо электроэнергию (что очень дорого и нерационально), либо твердотопливные котлы, а это просто одна из разновидностей пеллетных. Высокоэффективные отопительные котлы, работающие на пеллетном топливе, обладают массой преимуществ. Очень важное преимущество – автономность. В непростых климатических условиях Подмоскovie или отдаленных от газовых магистралей местностей это приобретает особое значение. Они работают в автоматическом режиме, требуется только периодический профилактический осмотр и подсыпание гранул в бункер [12].

Выращивание биомассы мискантуса недалеко от потребителя, например, от коттеджного посёлка, и изготовление пеллет даст возможность сократить почти 50% суммарных затрат на пеллеты за счёт экономии на дальних перевозках. В этом случае отопление на пеллетах становится в 1,7 раза экономически эффективнее, чем использование дизтоплива. Для отопления коттеджного посёлка в 100 домов необходима площадь земли около 100 га, чтобы вырастить необходимое количество биомассы мискантуса. Члены коттеджного кооператива могут создать ООО с ограниченной ответственностью для выращивания энергетической плантации из мискантуса, изготовления пел-

Затраты на отопление модельного коттеджа площадью 200 м² в южном Подмоскowie

Вид	Энергоресурсы			Амортизация подсоединения, стоимости котлов, газголдера, тыс. руб. / сезон	Сумма затраты на отопление, тыс. руб. / сезон
	количество топлива за сезон: т, тыс. м ³ , тыс. кВт × час	цена топлива: руб. / кг, руб. / кВт × час	стоимость энергоресурсов с учётом КПД котлов, тыс. руб. / сезон		
Пеллеты древесные светлые	11,1 т	11,2 руб. / кг с доставкой	124,3	17,6	141,9
Пеллеты древесные серые	11,3 т	10,7 руб. / кг с доставкой	120,9	17,6	138,5
Пеллеты из мискантуса	11,6 т	7,0 руб. / кг	81,2	17,6	98,8
Природный газ	5,8 тыс. м ³	5,14 руб. / м ³	29,8	19,9	49,7
Сжиженный газ, зимняя смесь	7 500 л	15 руб. / л	112,5	22,7	135,2
Дизтопливо	4,6 т	36 руб. / кг	165,7	5,4	171,1
Электроэнергия, ночной тариф т ₂	52,5 тыс. кВт × час	1,37 руб. / кВт × час	71,9	7,7	79,6
Электроэнергия, полупиковый тариф т ₃	52,5 тыс. кВт × час	3,37 руб. / кВт × час	176,9	7,7	184,6
Электроэнергия, тарифы т ₂ + т ₃	52,5 тыс. кВт × час	2,66 руб. / кВт × час	139,6	7,7	147,3

лет и отпускать топливо кооперативу по себестоимости. Избыток пеллетного топлива можно будет включать в запасной или переходный фонд или реализовать по рыночной стоимости для сторонних покупателей. Создание плантации и предприятия по изготовлению гранул безусловно требует определённых инвестиций. Но реализация такого проекта смогла бы не только удешевить отопление, но и обеспечить энергетическую независимость поселений во многих местностях России.

Необходимо сказать, что в странах Западной Европы с каждым годом увеличивается использование биомассы растений для отопления и растёт число пеллетных котлов. Довольно высокие цены на углеводородное топливо делают всё более привлекательными его замену пеллетами. Отопление пеллетным котлом в Германии в последнее десятилетие было на 28-48% дешевле, чем жидкотопливным котлом, и на 20-30% дешевле, чем газовым. В Австрии подобное соотношение еще больше: на 46% и 40% соответственно [13].

Следует подчеркнуть, что использование пеллет, в том числе и из мискантуса, имеет важное значение и в связи с проблемами потепления климата на Земле за счёт поступления в атмосферу парниковых газов. Опрос представителей экологического экспертного сообщества России об актуальности борьбы с антропогенными факторами глобального потепления показал [14], что почти половина респондентов считает данную проблему приоритетной, которую необходимо решать немедленно даже при нынешней экономической

ситуации в стране. Парижское соглашение по климату считает борьбу с потеплением важнейшей для человечества на ближайшую перспективу [15]. Для достижения цели, поставленной в Соглашении, а именно не превышать уровень средней температуры на Земле более 2°C над доиндустриальным периодом, необходимо ранжировать способы сокращения потоков выбросов парниковых газов. Соглашение начинает действовать с 2020 г. Одной из задач является проведение эколого-энергетической оценки основных альтернативных источников энергии, чтобы установить величины получаемой дополнительной энергии, а отсюда и оценить возможные размеры сокращения фактических выбросов парниковых газов. Уже сейчас автор [16], анализируя современную стратегию борьбы с глобальным потеплением, пришёл к выводу, что снижение индустриальной эмиссии углекислого газа техническими средствами недостаточно для приостановления роста температуры на нашей планете.

Таким образом, наши исследования показали, что новая для России культура мискантус китайский по продуктивности в Подмоскowie находится на высоком уровне и соизмерима с продуктивностью другой высокоурожайной культурой — кукурузой.

Выявлена высокая энергетическая эффективность возделывания мискантуса, что дает возможность рекомендовать выращивание этой культуры с целью производства пеллет или брикетов, а в дальнейшем компонентов биотоплива второго поколения.

Исследования показали, что мискантус китайский оказывает положительное влияние на плодородие почв за счёт трёх процессов: предотвращение водной эрозии почв, снижения интенсивности окисления почвенного гумуса и дополнительного накопления гумуса в почве от поступления в почву корневых выделений и корнепада. Расчёты свидетельствуют, что использование биомассы мискантуса в качестве сырья для изготовления пеллет вблизи места их потребления при существующих ценах на энергоносители уступает по экономической эффективности только магистральному газу, который доступен не во всех местах и с каждым годом дорожает. Сжиженный природный газ и другие исследованные энергоносители являются менее экономически эффективными, чем пеллеты из мискантуса.

Полевые опыты показали также, что мискантус китайский оказывает благоприятное влияние на почвенно-экологические условия, снижая температуру почвы во время вегетации до глубины 40 см по сравнению с зерновыми культурами.

При возможной аридизации и увеличении общей температуры на планете, культура мискантуса может использоваться для уменьшения температуры почвы тремя способами: 1) путем конструирования двухвидовых агроэкосистем в форме полосного земледелия; 2) применением биомассы мискантуса для изготовления топливных пеллет и, таким образом, снижения дополнительного поступления в атмосферу Земли окиси углерода по сравнению с ископаемым углеводородным топливом; 3) производством из биомассы мискантуса этанола и использованием его в составе биотоплива для автотранспорта с целью снижения выбросов парниковых газов.

Дальнейшее проведение натуральных исследований в различных почвенно-климатических условиях даст возможность оценить фактическую биологическую и энергетическую эффективность этой культуры и её влияние на компоненты экосистем.

Литература

1. Italy — a rapidly growing market for residential wood pellets // The bioenergy international, 2012. №3. — P. 36.
2. <http://ecology.md/page/vozobnovljaemaja-energetika-programm>
3. <https://www.agroXXI.ru/mirovye-agronovosti/proizvodstvo-yetanola-v-ssha-ustanovilo-record.html>
4. www.gazeta.ru/business/2016/11/10/10320353.shtml#
5. Булаткин Г.А. Оценка эффективности производства нетрадиционных и возобновляемых источников энергии // Вестник РАН, 2009. Т. 79. №7. — С. 608-616.
6. Katja Schneckenberger, and Yakov Kuzyakov. Carbon sequestration under Miscanthus in sandy and loamy soils estimated by natural ¹³C abundance // Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2007. №4. — Pp. 538-542.
7. Ракитова О. Французы гранулируют мискантус // The bioenergy international, 2007. № 4. — С. 25.
8. Cipriano P., Fernando A.L. Energy Balance of the Production and Use of Miscanthus for Energy Purposes, in Portugal // 20th European Biomass Conference and Exhibition (18-22 June 2012). — Milan, Italy, 2012.
9. Piltz A., Kirsten C., Weller N., Pollex A. Pelletization of Miscanthus — the Optimisation of Process Parameters for the Production of a Standardised Fuel // 20th European Biomass Conference and Exhibition (18-22 June 2012). — Milan, Italy, 2012.
10. Зинченко В., Яшин М. Энергия мискантуса // Леспром, 2011. №6. — С. 134–141.
11. Халатов А.А., Тимченко Н.П., Розинский Д.И. Сравнение экономической и энергетической эффективности электроотопления с основными видами автономного отопления. URL: http://www.promelektro.blogspot.ru/2015/09/blog-post_48.html,
12. Расчёт экономической целесообразности пеллетного обогрева. URL: http://www.e-solar.com.ua/?_escaped_fragment_=analiz-vidov-topliva/ce4t.
13. Пеллетных котлов в Евросоюзе всё больше, и они всё мощнее. URL: <http://lesprominform.ru/jarchive/articles/itemshow/4146>
14. Сосунова И.А. Социальные последствия и адаптация населения к климатическим изменениям // Использование и охрана природных ресурсов в России, 2016. №2. — С. 98–101.
15. Парижское соглашение. URL: https://unfccc.int/files/meetings/paris_nov_2015/.../paris_agreement_russian_pdf
16. Лосев К.С. Парадоксы борьбы с глобальным потеплением // Вестник РАН, 2009. Т. 79. №1. — С. 36-40.

Сведения об авторе:

Булаткин Геннадий Александрович, д.б.н., в.н.с., Институт фундаментальных проблем биологии РАН (ИФПБ РАН), 142292, Пушкино Московской области, тел.: 8 (4967) 73-17-83, e-mail: sadovod@rambler.ru.