

УДК 661.722:663.15:664.788.2

А.И.Володько, А.Г.Новак, С.П.Цыганков, докт.техн.наук (Ин-т пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины, Киев)

Сахарное сорго – энергетическая культура для производства биоэтанола в Украине

Показаны основные преимущества сахарного сорго в качестве энергетической культуры по сравнению с традиционными сельскохозяйственными культурами, которые используются для производства жидких альтернативных топлив в Украине.

Показані основні переваги цукрового сорго як енергетичної культури в порівнянні з традиційними сільськогосподарськими культурами, що використовуються для виробництва рідких альтернативних палив в Україні.

В последние десятилетия в мире наблюдается рост цен на ископаемое (невозобновляемое) топливо, что связано с уменьшением его запасов, увеличением затрат на добычу и ростом потребления энергии. Кроме того, использование ископаемого топлива, которое приводит к накоплению избытка углекислого газа в атмосфере, считается причиной глобального потепления. Выработывая топлива из биомассы, можно уменьшить негативное влияние энергетической отрасли на окружающую среду, снизить или вовсе избежать зависимости бедных полезными ископаемыми стран от импортных энергоносителей. Последнее особенно актуально для аграрной Украины.

Биоэтанол является чуть ли не единственным заменителем бензина, поэтому его мировое производство растет быстрыми темпами. В 2009 г. топливного биоэтанола было произведено 75,5 млн м³, нетопливного – 10 млн м³. Сырье: кукуруза – 55%, сахарный тростник – 34%, меласса – 6%, пшеница – 3,5%. Лидируют в производстве топливного биоэтанола США (40,6 млн м³) и Бразилия (24,9 млн м³) [1].

Основным сырьем для рентабельного производства топливного биоэтанола в мире являются крахмалсодержащие (зерно) или сахаросодержащие (сахарный тростник, сахарная свекла) сельскохозяйственные культуры [2]. Для их возделывания необходимы подходящие земельные ресурсы и климатические условия. На территории Украины произрастают как традиционные

крахмал- и сахаросодержащие культуры (кукуруза, пшеница, ячмень, сахарная свекла,) так и альтернативные (сахарное сорго, топинамбур, цикорий) [3, 4]. Для получения топливного этанола и бутанола могут быть использованы различные продукты растениеводства; единственным условием при этом должно быть высокое содержание в сырье моно- и дисахаридов или легкогидролизуемых полисахаридов.

Наиболее дешевый биоэтанол в мире производится из сахарного тростника. Эта культура дает наибольший выход сахаров с гектара посевов – 10,5 т/га [5], а при комплексном внесении удобрений выход может достигать 18 т/га и выше [6]. Его углеводы не требуют гидролиза перед спиртовым брожением, а получение тепловой энергии для обеспечения технологических процессов достигается путем сжигания тростниковой багассы – биомассы стеблей после отжима сахаросодержащего сока.

Сахарный тростник – теплолюбивая культура, которую невозможно возделывать севернее 30-й параллели. По урожайности и технологическим свойствам к нему приближается сахарное сорго, которое можно выращивать в умеренном климате – вплоть до 55-й параллели (широта Минска), то есть, на всей территории Украины. В таблице 1 приведено сравнение сахарного сорго и сахарного тростника по основным технологическим показателям [7].

Таблица 1. Сравнение сахарного сорго и сахарного тростника по основным технологическим показателям (Индия)

Параметры	Сахарный тростник	Сахарное сорго
Потребность в удобрениях, %	100	35 - 40
Продуктивность биомассы, т/га за сезон	65 - 80	42 - 55 (один урожай в год) 84 - 110 (два урожая в год)
Концентрация ферментируемых сахаров в стебле, % масс.	10,0 - 14,0	9,2 - 12,0
Выход ферментируемых сахаров, т/га за сезон	6,0 - 10,5	3,6 - 6,2 (один урожай в год) 7,2 - 12,4 (два урожая в год)
Багасса влажностью 50% масс., т/га за сезон	19 - 24 (30% от массы стебля)	10 - 14 (один урожай в год, 25% от массы стебля) 20 - 28 (два урожая в год)

Таблица 2. Сравнение некоторых растений, которые используются для получения биотоплива [12]

Вид растения	Углеводы сырья	Гидролиз	Микроорганизмы	Потенциал производства биоэтанола, м ³ /Га в год
Сахарная свекла	Сахароза	нет	<i>Saccharomyces</i>	4,1 - 5
Пшеница	Крахмал	да	<i>Saccharomyces</i>	1,75 - 2
Кукуруза	Крахмал	да	<i>Saccharomyces</i>	2 - 2,5
Картофель	Крахмал	да	<i>Saccharomyces</i>	3 - 5
Топинамбур	Инулин	нет/да	<i>Kluyveromyces</i> <i>Saccharomyces</i>	2,5 - 3
Сахарный тростник	Сахароза	нет	<i>Saccharomyces</i>	5,3
Сахарное сорго	Сахароза, глюкоза, фруктоза	нет	<i>Saccharomyces</i>	6*

*На основании результатов собственных исследований.

Следует отметить, что в Украине и других странах СНГ выведены высокоурожайные сорта и гибриды сорго, которые при правильном выращивании и подходящих климатических условиях по урожайности фитомассы и сахаристости превышают сорта сорго, выращиваемые в тропических странах за один урожай в сезон. Из внесенных в государственный реестр сортов растений Украины высокими выходами сахаров с единицы площади характеризуются такие сорта, как "Юбилейный", гибрид "Медовый", "Некратный", "Силосное-42" и другие [8–11].

В связи с изменениями климата культивирование высокопродуктивных сахаросодержащих культур в богарных условиях и их районирование является актуальным не только для южных регионов, но также для центральных и северных зон Украины. К сожалению, отсутствие адаптированных высокоурожайных сортов сахарного сорго для зон лесостепи и Полесья Украины не позволяет широко выращивать здесь это растение.

Сравнение потенциала различных видов сырья для производства биоэтанола представлено в табл. 2.

Использование зерна (кукурузы, пшеницы) и сахарной свеклы как сырья для производства топливного этанола ограничивается двумя важными моментами – высокой потребностью этих культур в воде и высокими затратами на внесение удобрений и обработку посевных площадей. К тому же, сахара и крахмал, содержащиеся в традиционных сельскохозяйственных культурах, рассматриваются в первую очередь как продукты пищевого назначения. Поэтому производство жидких биотоплив из этих культур вызывает обоснованное сопротивление в обществе, вызванное опасением конкуренции между продовольствием и топливом. Таким образом, необходимы культуры, которые не угрожали бы продовольственной безопасности, могли быстро развиваться при относительно низком потреблении воды и производить значительное количество углеводов, легко поддающихся

сбраживанию [13].

Сахарное сорго хорошо адаптировано в полузасушливых регионах и использует воду эффективнее (310 кг воды/кг сухого материала), по сравнению, например, с кукурузой (370 кг воды/кг сухого материала) [2]. Согласно другим источникам, потребность сорго в воде вдвое меньше, чем у кукурузы [14]. Потребление воды сахарной свеклой почти не отличается от сорго, но по возделыванию сахарное сорго менее трудоемко (табл. 3) [15–18].

Таблица 3. Коэффициенты использования воды сахарным сорго, кукурузой и сахарной свеклой

Культура	Коэффициент использования воды (кг воды/кг сухого материала)
Сахарное сорго [19]	310
Кукуруза [20]	370
Сахарная свекла [21]	~325

При сильной засухе сахарное сорго входит в состояние анабиоза. Его листья скручиваются, замедляется рост, но после выпадения осадков культура возобновляет свое развитие и гарантировано дает урожай 40-60 т фитомассы с гектара. Кукуруза же в условиях засухи останавливает свой рост, и выход зеленой фитомассы снижается до 11-15 т/га [22, 23].

Как видно из таблицы 3, сорго более экономно расходует воду на рост биомассы и на образование сахаров в стебле, оно более устойчивое к засухе. Главным преимуществом является возможность получить почти в 3 раза

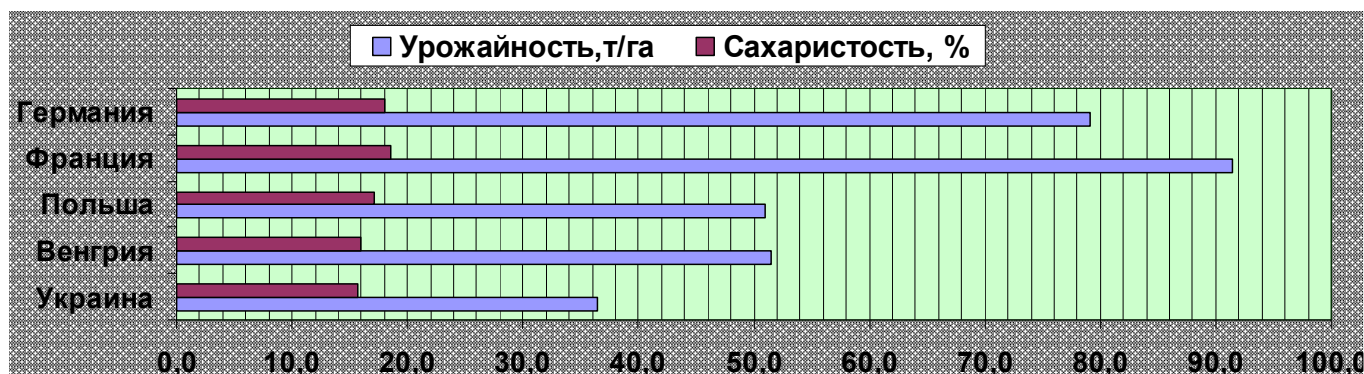
больше этанола с гектара посевов сорго, чем с гектара кукурузы (табл. 2).

Потенциал сахарной свеклы как сырья для производства этанола близок к сахарному сорго (табл. 2). Но в засушливых регионах сеять сахарную свеклу на богаре нецелесообразно.

Урожайность и технологические показатели сахарной свеклы очень сильно зависят от культуры земледелия, климатических условий, применения селекционных сортов и существенно отличаются в разных странах (рис. 1). Получение высоких урожаев требует больших затрат труда (2-3 прополки, борьба с насекомыми-вредителями) и внесения удобрений [15].

В нашей стране в благоприятный для сахарной свеклы 2011 год урожайность этой культуры составила 36,5 т/га при сахаристости 15,7%. С гектара площади выход сахаров составил в среднем 5,73 т. Теоретически из 1 т сахара можно получить 0,682 м³ этанола, что применительно к гектару сахарной свеклы составит 3,9 м³. Из сахарного сорго в условиях Украины можно получить до 6 м³ этанола с гектара (см. табл. 2).

В Украине посевные площади под сахарную свеклу в период 1990-2011 гг. снизились на 1070 тыс. га (на 66,6%) и составляют 537 тыс. га. Также возросли затраты труда как на 1 га, так и на 1 т корнеплодов (с 1996 г. по сравнению с 1990 г. затраты труда возросли соответственно в 1,12 и 1,86 раза) [25].



Примечание: источник данных по Украине – государственная служба статистики Украины, <http://www.ukrstat.gov.ua/>; источник данных по европейским странам – статистическая служба Европейского Союза, <http://epp.eurostat.ec.europa.eu> и зарубежная сельскохозяйственная служба сельскохозяйственного департамента США [24].

Рис. 1. Урожайность сахарной свеклы в некоторых странах Европы и в Украине, 2011 год, т/га.

Таким образом, на сегодня сахарная свекла в Украине проигрывает сахарному сорго как источнику сырья для производства биоэтанола. К тому же, при переработке стеблей сахарного сорго полученная багасса (отжатые стебли) может использоваться как топливо для обеспечения энергетических потребностей завода, а в случае переработки сахарной свеклы такая возможность отсутствует.

Сахарную свеклу будет экономически целесообразно использовать для производства жидких биотоплив, если Украина достигнет уровня урожайности этой культуры, близкого к европейскому, и сохранится достаточно мощный потенциал сахарной промышленности, позволяющий обеспечивать извлечение сахара из корнеплодов в виде сиропов или мелассы. Последние можно использовать для выработки биоэтанола круглогодично, как, например, во Франции [26].

В 2006-2010 годах в Украине были приостановлены два крупных проекта по биоэтанола. Одна из причин – резкое повышение стоимости сырья (кукурузы). В структуре себестоимости биоэтанола около 70% занимает сырье, а 20% – энергоносители. Поэтому, учитывая возможность энергетического самообеспечения предприятия, сахарное сорго экономически существенно привлекательнее сахарной свеклы и кукурузы для решения проблем производства альтернативного топлива и увеличения занятости в сельском хозяйстве.

Сахарное сорго характеризуется высокой эффективностью поглощения CO_2 из атмосферы на протяжении всего цикла вегетации и небольшим количеством CO_2 (около 4% от поглощенного), которое эмитируется при энергетическом обмене [27]. Последующая переработка биомассы растения приводит к эмиссии CO_2 , но в целом сахарное сорго поглощает этот CO_2 и общий баланс CO_2 равен нулю.

К недостаткам сахарного сорго как сахаросодержащего сырья можно отнести ограниченность сроков хранения стеблей и повышенную чувствительность к заморозкам на

почве ($-2\dots-4^\circ\text{C}$), что для сахарной свеклы не является критическим. Замораживание и размораживание зеленых стеблей сахарного сорго приводит к быстрому разложению сахаров. То же наблюдается и при хранении срезанных стеблей без замораживания. При непродолжительном хранении срезанных стеблей сорго (2 дня) в закрытых помещениях потерь сахаров не наблюдается [28, 29].

Содержание сахарозы в срезанных стеблях быстро уменьшается за счет собственной (эндогенной) инвертазной активности. Соответственно нарастает количество глюкозы и фруктозы. Через сутки после срезания стеблей снижение количества сахарозы может составлять 25-35%. Поэтому для технологических расчетов целесообразно ориентироваться на сумму сбраживаемых сахаров в сырье. Снижение выхода сока может происходить за счет испарения влаги из поверхности стеблей (высыхания) при хранении. Подобные процессы могут происходить и в поле, когда растение полностью созрело и "простаивает". Для достижения максимального выхода сока из стеблей и сохранения урожая необходимо убирать сахарное сорго с поля вовремя; часть полученного сока сразу же перерабатывать в этанол, а остальную часть сгущать до сиропов и выводить из производства на хранение. В северных регионах Украины для обеспечения уборки урожая до заморозков целесообразно выращивать скороспелые сорта сахарного сорго.

Ряд хозяйств, как в Украине, так и в соседних странах, уже приобрели положительный опыт выращивания этой культуры в качестве потенциального сырья для производства биоэтанола. В России, по данным АПК "Славянский", созданы и испытаны в Воронежской области сорта с урожайностью до 120 т зеленой массы с гектара и содержанием сахаров в соке до 18%. В Украине в Хмельницкой области даже в засушливое лето 2009 года урожай стеблей достигал 55-60 т/га, а содержание сахаров в соке – 16%.

В результате многолетней интродукционной и селективной работы в отделе новых культур

Национального ботанического сада им. Н.Н.Гришко НАН Украины (НБС) был создан ценный генофонд данной культуры. По данным докт.биол.наук Д.Б.Рахметова, особенно перспективным является сорт "Ботанический" – среднеспелый, засухоустойчивый, с высоким содержанием сухих веществ и сахаров в надземной части растения. Сорт высокопродуктивный, может использоваться как фитоэнергетическая, техническая и кормовая культура. Растение достигает высоты 320-430 см. Урожайность зеленой массы достигает 98-105 т/га, сухого вещества – 14-17 т/га, урожайность семян – 7,3 т/га. Содержание сахаров в абсолютно сухой фитомассе в среднем составляет 18-26% и может достигать 35%. Естественно, для получения высоких урожаев необходима соответствующая агротехника и почвенно-климатические условия.

Выводы. В Украине сахарное сорго является наиболее перспективной альтернативной культурой для производства биоэтанола и других жидких биотоплив (например, биобутанола). Сахарное сорго имеет стойкость к дефициту влаги, обладает коротким периодом вегетации (110-120 дней), на его культивирование затрачивается меньше энергии и воды, чем на другие сырьевые культуры (кукурузу, сахарную свеклу). Растение можно использовать как пищевое и кормовое сырье (зерно), а также как энергетическое сырье (сахаросодержащий сок и сорговая багасса).

1. *F.O. Licht*. Cited in Renewable Fuels Association / Ethanol Industry Outlook. – 2008, 2009, 2010. – P. 16, 29, 22. www.ethanolrfa.org.
2. *Belum V.S. Reddy, A. Ashok Kumar and S. Ramesh*. Sweet sorghum: A Water Saving BioEnergy Crop. International Crops Research Institute for the SemiArid Tropics Patancheru 502 324. – Andhra Pradesh. – India, 2007. www.icrisat.org.
3. *Производство глюкозно-фруктозных сиропов / В.К.Супрунчук, Н.П.Роменский, Л.В.Хорунжая, А.Н.Панчук*. – К.: Урожай, 1993. – 112 с.
4. *Петрушевский В.В.* Производство сахаристых веществ / В.В.Петрушевский, Е.Г.Бондарь, Е.В.Винокурова. – К.: Урожай, 1989. – 168 с.
5. *Grassi, G., 2000*. Bioethanol industrial world perspectives. In the proceedings of 2000 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry. – P. 2131–2134.
6. *Lifang H., et al.* Effects of Phosphorus, Potassium, Sulfur, and Magnesium on Sugar Cane Yield and Quality in Yunnan. Better Crops International. – Vol. 15. – No. 1. May 2001.
7. *Sweet sorghum to ethanol*. Technology, Plant & Machinery. Presentation by Praj Industries Limited. www.praj.net.
8. *Галичкин А.И.* Влияние норм и способов сева на урожайность сахарного сорго / А.И. Галичкин, К.Сариев // Земледелие. – 2007. – №6. – С. 30 – 31.
9. *Цаценко Н.Н.* Оценка сортов сахарного сорго на содержание сахаров, влияние агротехники возделывания на сахаристость и возможность их технологического использования: Автореф. дис...канд.техн.наук :06.01.09 / Н.Н. Цаценко. – Ставрополь: Ставропольский сельскохозяйственный институт, 1992. – 23 с.
10. *Бритвин В.В.* Селекционное изучение сортов и гибридов сахарного сорго / В.В. Бритвин, Л.Л. Болдырева // Сельскохозяйственные науки: научные труды ЮФ "КАТУ" НАУ. – Симферополь: ЧП "Фактор", 2006. – Вып. 96. – С. 151–156.
11. *Исаков Я.И.* Селекция сахарного сорго / Я.И.Исаков, С.И.Горпиниченко // Кукуруза и сорго. – 2003. – № 1. – С. 9–12.
12. *Phowchinda O., Strehaiano P.* Utilization of Mixed Sugars for Alcoholic Fermentation by *Saccharomyces cerevisiae*. Thammasalnt t.J. Sc.Tech. – Vol.4. – No.2. – July 1999.
13. *Nahar, Kamrun (2011)* Sweet sorghum: an alternative feedstock for bioethanol // Iranica Journal Energy & Environment. – 2 (1). –P. 58–61.
14. *Sweet Sorghum. Food, Feed, Fodder and Fuel Crop* International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics Institute for the Semi-Arid Tropics. Presentation 627-2006 www.icrisat.org
15. *Ілєвич С.В.* Унікальний коренеплід. – К.: Урожай, 1991. – 176 с.
16. *Самойленко А.* Технологія вирощування сорго / А. Самойленко, Т.Шевченко // Agroexpert – 2009. – № 5. – С. 14–16.
17. *Шепель Н.А.* Адаптивная селекция, технология возделывания и направления использования сахарного сорго / Н.А. Шепель // Сельскохозяйственные науки: научные труды / КГАТУ. – Симферополь, 2004. – Вып. 86. – С. 32–44.
18. *Заец А.С.* Сахарная промышленность в Украине: становление, развитие, реструктуризация. – К.: Наук. думка, 2004. – 326 с.
19. *Lima G.S. de.* 1998. Estudo comparativo da resistencia a' seca no sorgho forrageiro (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) em diferentes estadios de desenvolvimento. Recife: UFRPE. – 128 p.
20. *Chapman S.R., and Carter L.P.* Crop production, principle and practices. – San Francisco: W.H. Freeman. – 1976. – 566 p.
21. *Michele Rinaldi and Alessandro Vittorio Vonella.* Water use efficiency in sugar beet, subjected to different sowing times and irrigation regimes in a Mediterranean environment. Istituto Sperimentale Agronomico, v. C. Ulpiani, 5 – 70125 Bari (I). "New directions for a diverse planet". Edited by RA Fischer. Proceedings of the 4th International Crop Science Congress.

- Brisbane, Australia, 26 September-1 October 2004. www.inea.it/isa/isa.html.
22. *Исаков Я.* Невзирая на засуху / Я.Исаков, А.Пахайло, А.Кольчик // Кукуруза и сорго. – 1997. – № 6. – С. 19–21.
23. *Сорго в засушливом Поволжье* // А.Г.Ишин, В.В.Пронько, А.В.Голубев, С.П.Коюда // Кукуруза и сорго. – 1987. – № 6. – С. 26–27.
24. *Polet Yvan.* EU-27 Sugar Semi-annual Report/ United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service/ GAIN Report Number: E60053. Date: 10/6/2011 <http://gain.fas.usda.gov/Pages/Default.aspx>
25. *Украина в цифрах в 1997 г.* Краткий статистический справочник. – Киев, 199. – С. 51.
26. *Polet Yvan.* EU-27 Sugar Semi-annual Report/ United States Department of Agriculture. Foreign Agricultural Service/ GAIN Report Number: E60053. Date: 10/6/2011 <http://gain.fas.usda.gov/Pages/Default.aspx>
27. *Latin America Thematic Network on Bioenergy Lamnet.* Published by ETA Florence and WIP-Munich in the framework of Lamnet Thematic Network funded by the European Commission, DG Research, Programme "Confirming the international role of Community Research" (Project №. ICA4-CT-2001-10106).
28. *Григоренко Н.О.* Удосконалення технології харчового сиропу із цукрового сорго.: Дис...канд. техн. наук. – Київ: НУХТ, 2010. – 149 с.
29. *Jasberg, B.K., Montgomery, R.R. and Anderson, R.A.* Preservation of sweet sorghum biomass. *Biotechnol. Bioeng. Sym*, 13: – 1983. – P. 113–120.