

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)

### **Изучение возможности использования сахарного сорго в качестве источника сырья для производства биоэтанола**

*Приведены результаты собственных исследований состава стеблей, сока и сахаров сорго. Проанализированы особенности производства этого сырья в Украине, намечены основные направления исследований для создания технологии его переработки в жидкие биотоплива.*

*Наведено результати власних досліджень складу стебел, соку та цукрів сорго. Проаналізовані особливості виробництва цієї сировини в Україні, намічені основні напрямки досліджень для створення технології її переробки в рідинні біопалива.*

Сахарное сорго – не новая культура для Украины и стран СНГ, его издавна возделывали в засушливых регионах СССР как кормовую культуру [1–3]. Очищенные сахаросодержащие сиропы, полученные из сока сахарного сорго, используются в пищевой промышленности (для получения сладких напитков, подсластителей кондитерских и хлебобулочных изделий и т.п.) [4–6]. В последние десятилетия целью государственной политики Украины стало снижение зависимости от импортных энергоносителей. Об этом свидетельствуют ряд недавно принятых законов: "Об альтернативных видах топлива", "О внесении изменений к некоторым законам Украины относительно содействия производству и использованию биологических видов топлива", Программа государственной поддержки развития нетрадиционных и возобновляемых источников энергии (НВИЭ). В связи с этим получение биоэтанола из сахарного сорго может стать важной составляющей в решении проблемы зависимости от импортной нефти. Например, такие страны как Китай, Индия и Бразилия используют сахарное сорго для получения биоэтанола [7, 8]; ряд европейских стран (Италия, Греция, Испания, Германия и др.) также изучают возможность получения биоэтанола из сахарного сорго [9–11]. Преимущества сорго как энергетической культуры в Украине перед другими традиционными сельскохозяйственными культурами показаны в

работе [12]. В соседних странах и в Украине ведутся работы по выведению новых высокосахаристых и скороспелых сортов сахарного сорго, пригодных для выращивания практически на всей территории умеренного климатического пояса [13, 14].

Для оценки возможности использования сахарного сорго в качестве источника сырья для производства биоэтанола было исследовано сахарное сорго, выращенное в Хмельницкой области в 2009-2010 гг., а также в Сумской области в 2011 г. В среднем, общая биомасса растения (по сухому веществу) распределяется следующим образом: стебель – 73,5%, листовая часть – 19,2%, зерновая метелка – 7,3%. Соотношение массы стебля, количества сока и содержания сухих веществ (СВ) в нем для каждого образца приведено в таблице 1 (с учетом биомассы зерна, полученной для каждого образца с единицы участка земельной площади).

Данные таблицы 1 показывают, что на стадии физиологической зрелости растения в соке сахарного сорго содержится наибольшая концентрация сахаров. Наибольшее количество сока в основном можно получить в стадии молочной зрелости. Масса стеблей также в большинстве случаев максимальна в стадии молочной зрелости зерна.

Эти результаты и некоторые отклонения объясняются изменением соотношения между сухими веществами и влагой при созревании и частичным высушиванием (потерей влаги) стеблей при поздней уборке сахарного сорго.

Таблица 1. Результаты выращивания сахарного сорго в Хмельницкой области

Масса стебля, г/м <sup>2</sup>			Количество полученного сока, %			Содержание СВ в соке, %			Кол-во зерна, г/м <sup>2</sup>
при цветении	молочная зрелость зерна	физиол. зрелость	при цветении	молочная зрелость зерна	физиол. зрелость	при цветении	молочная зрелость зерна	физиол. зрелость	
1. 3456,3	3838,1	4112,4	33,0	33,5	28,6	10,23	11,2	12,3	501,8
2. 3438,2	3720,4	3359,5	40,9	44,1	37,8	11,9	11,1	12,8	459,7
3. 4429,9	6512,2	4540,6	32,2	34,1	35,0	8,8	10,2	15,9	554,4
4. 4030,7	5769,7	3840,9	30,6	31,7	29,5	9,7	10,0	13,1	492,3
5. 4430,1	6705,3	4273,6	33,6	38,5	35,8	8,6	9,8	13,9	558,6
6. 3554,6	5373,4	3350,9	33,6	39,2	32,4	6,7	9,3	11,4	502,3
7. 2954,5	4271,3	4597,8	36,0	46,4	32,8	9,5	8,6	15,2	378,8
8. 3090,7	4351,2	4596,1	28,9	39,1	36,7	7,4	10,2	11,9	509,5

Также была исследована возможность выращивания и оценена продуктивность сахарного сорго сорта "Ботанический", который создан в отделе новых культур Национального ботанического сада им. Н.Н.Гришко НАН Украины (НБС), на севере Украины (Сумская обл., Шосткинский район). В 2011 г. получены следующие результаты:

- Урожайность зеленой массы – 104 т/га (дерново-подзолистые почвы);
- Влажность стеблей ~ 70% (урожай убирали в конце сентября);
- Сахаристость стеблей ~ 8,1%;
- Отходы (листья, метелка) от стеблей – 27% масс.
- Выход сока сорго составлял 40% от массы стеблей;
- Содержание СВ (за рефрактометром) в натуральном соке – 13%;
- Теоретический выход сахаров – 6,1 т/га.

В целом эксперимент показал, что сахарное сорго с целью последующей переработки в этанол можно успешно возделывать и в северных областях Украины.

В лабораторных условиях изучалось получение, состав и ферментация сока сахарного сорго и его сиропов с целью производства биоэтанола. Для выделения сока был применен вальцовый станок, состоящий из двух металлических валков диаметром 100 мм с регулировкой зазора между ними. Движение валцов осуществлялось вручную или электродвигателем через понижающий редуктор. Стебли сахарного сорго очищали вручную от листьев и метелки (отходы составляли 27%).

Очищенные стебли пропускались через отжимочные вальцы дважды (рис. 1).



Рис. 1. Отжим сока из стеблей сахарного сорго на вальцовом станке.

Разница между теоретическим выходом сахаров (6,1 т с гектара посевов сахарного сорго) и выходами в лабораторных экспериментах (~3,0 т/га) объясняется потерями сахаров с багассой при двухразовом отжиге, а также из-за поздних сроков уборки урожая, что обусловило снижение общей влажности зеленой массы растений. При промышленной переработке потребуется использование нескольких последовательно расположенных отжимных станков с противоточным орошением отжимаемой массы горячим экстрагентом для осуществления ступенчато-противоточного экстрагирования растворимых веществ сырья [15].

Сок представляет собой зелено-серую жидкость, из которой при отстаивании выделяется рыхлый осадок, в основном состоящий из белков и мезги. После фильтрования через марлевую ткань сок сгущали под вакуумом на роторном испарителе.

Температура выпаривания составляла 60-65°C. Выпаривание вели до концентрации сухих веществ 75%. Полученный таким образом сорговый сироп не подвержен микробиологической порче и хранится длительное время. Для последующего сбраживания дрожжами сироп разбавляли водой (подобно свекловичной мелассе при производстве этанола) до концентрации СВ 20-27%.

В таблице 2 приведены данные по составу сока и сиропа сахарного сорго, полученные в Институте пищевой биотехнологии и геномики НАН Украины (ИПБГ) и на опытном производстве агрофирмы "Славянский" в Воронежской области России.

Более высокая доброкачественность (чистота) сока и сиропов агрофирмы "Славянский" объясняется предварительным отделением коллоидов.

Состав продуктов, полученных из сорго, выращенного в разных почвенно-климатических условиях, может существенно отличаться. Например, из таблицы 2 видно, что отличие в основном заключается в процентном соотношении сахарозы к моносахаридам, а также в содержании макроэлементов (фосфор).

Практические результаты нашей работы по отжиму сока из стеблей сахарного сорго показали, что лучшим периодом уборки урожая является молочно-восковая спелость, когда растения имеют самый высокий процент сахаров в стеблях и являются сочными. Чтобы не терять сахара, уборку и переработку необходимо начинать именно в этот период. Необходимо знать особенности выращиваемого сорта сорго (лучше

использовать районированные сорта). При больших посевах сахарного сорго сразу убрать и переработать или законсервировать в сиропе урожай сахаров практически невозможно. Поэтому можно рекомендовать сеять разные по скороспелости сорта сорго.

Выполненный газохроматографический анализ (рис. 2) трифторацетильных производных моносахаридов гидролизата сока показал наличие в нем, кроме D-глюкозы и D-фруктозы, еще и арабинозы, ксилозы и около 1% галактозы. При получении сока из стеблей в него попадает некоторое количество гемицеллюлоз, дающих пентозы при гидролизе ферментами, содержащимися в соке растения. Наличие галактозы объясняется, по-видимому, присутствием в соке раффинозы.

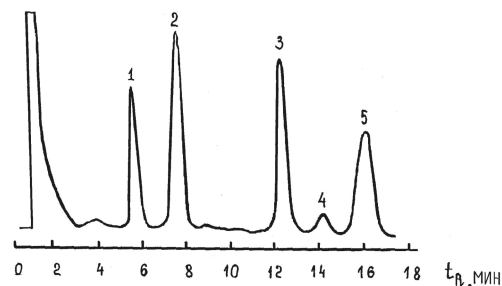


Рис. 2. Хроматограмма трифторацетильных производных сахаров сока сахарного сорго. Производные моносахаров:

- 1 – L-арабиноза; 2 – D-ксилоза; 3 – D-фруктоза;
- 4 – D-галактоза; 5 – D-глюкоза.

По результатам газохроматографического анализа усреднен состав стебля, который использовался для получения сока (% масс.):

сухие вещества	24,4	глюкоза	2,2
вода	75,6	фруктоза	1,2
сахароза	6,1	сбраживаемые сахара	10,1

Таблица 2. Состав сока и сиропа сахарного сорго

Наименование показателя	Единица измерения	Сок		Сироп	
		Данные ИПБГ	Данные агрофирмы "Славянский", РФ	Данные ИПБГ	Данные агрофирмы "Славянский", РФ
Вода	% масс.	86,73±4,0	82,75±5,0	23,81±4,0	30,59±5,0
Сырая зола	% в сухом веществе	1,20±0,1	0,59±0,08	3,92±0,1	4,10±0,5
Общий сахар	%	9,7±0,6	16,54±1,0	51,06±3,0	63,73±4,0
Доброкачественность	%	73,1±4	95,9±5	67,0±4	91,8±5
Моносахариды	%	2,4±0,2	9,42±0,5	16,23±1,0	26,20±1,5
Кальций (Ca)	г/кг	0,32±0,02	0,56±0,03	1,63±0,08	2,37±0,12
Нитраты	г/кг	0,30±0,01	0,18±0,01	1,51±0,05	1,48±0,06
Азот общий (N <sub>2</sub> )	г/кг	0,5±0,01	–	2,6±0,1	–
Фосфор (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	мг/кг	38,1±2,0	29,0±1,5	220,20±11,0	128,0±7,0

Оценку содержания сбраживаемых сахаров в стеблях сорго и сиропе выполняли биологическим методом (методом бродильной пробы), который основывается на лабораторном сбраживании сахара в этанол в определенных стандартных условиях, моделирующих производственный процесс [16]. Содержание сахара в сырье по этому методу рассчитывали по количеству продуктов брожения. Плотность сиропа составляла  $1,34 \pm 0,01$  кг/дм<sup>3</sup>.

Доброкачественность (отношение сбраживаемых сахаров к общему числу сухих веществ) сиропа по методу бродильной пробы [16] составила 67% (74% – химический анализ). Для повышения доброкачественности соков и сиропов сахарного сорго возможно применение дополнительных операций по их очистке, например, кратковременную высокотемпературную обработку нативного сока для коагуляции высокомолекулярных соединений (белков) с последующим отстаиванием, фильтрованием и центрифугированием осадка.

Методом бродильной пробы были исследованы стебли сорго из коллекции отдела новых культур НБС, выращенные на опытных участках в Киевской области. Были проверены 4 партии сахарного сорго в последовательности их уборки с поля. Как и ожидалось, наибольшее содержание сахаров было у сорго при восковой зрелости, которое составляло 10,54% от общей массы стебля влажностью 68%. К абсолютно сухой массе содержание сбраживаемых сахаров сорго, с учетом остаточного количества сахаров после экстракции, составило 31,4%.

Приведенные данные и анализ публикаций показывают, что сорго в агроклиматических условиях Украины имеет высокие урожайности с гектара посевных площадей и высокую сахаристость стебля. Эти параметры соответствуют данным, полученным в западноевропейских странах [17].

Из сухих веществ в стебле сахарного сорго содержится от 58% нерастворимых углеводов – целлюлоз, гемицеллюлоз, крахмала [18]. Состав сорговой багассы приведен в таблице 3. Содержание некоторых элементов в багассе

сахарного сорго: N = 0,45% к влажной массе багассы; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> = 0,22%; K<sub>2</sub>O = 0,71%; насыпной объем (20% влажность) ~ 150 кг/м<sup>3</sup> [17].

**Таблица 3. Содержание структурных компонентов лигноцеллюлозы сахарного сорго**

	Целлюлоза	Гемицеллюлоза	Лигнин
Сахарное сорго (корм для животных), % [19]	30	31	11
Сахарное сорго (конкретно не указано), % [20]	27	25	11
Сахарное сорго – багасса, % [17]	15 – 25	35 – 50	20 – 30
Сахарное сорго – багасса абсол. сух., % (данные ИПБГ)	44	28	20

На предприятии по переработке сахарного сорго в этанол возможно использование двух вариантов технологических схем переработки возобновляемого растительного сырья:

- вариант А: отжим сока, использование багассы в качестве топлива, в том числе для сгущения сока, переработка сиропа и сока в биоэтанол. Такая технология с использованием сырья первого поколения (сахаров сорго) для жидких биотоплив и твердого биотоплива (багассы сорго) для энергообеспечения производства на сегодняшний день представляется наиболее простой и рентабельной;
- вариант Б: отжим сока, часть багассы используется на топливо, часть на гидролиз и дальнейшую ферментацию. В данном случае используется сырье первого и второго поколений (лигноцеллюлоза) для получения жидких биотоплив. За счет сжигания части багассы вырабатывается тепловая энергия. Этот вариант технологии рентабелен в части переработки сока, но затратен в части переработки лигноцеллюлозы в этанол. Однако он даст возможность отработать процесс гидролиза и ферментации биомассы в рамках предприятия, которое в целом должно быть рентабельным.

На рис. 3 показан теоретический материальный и энергетический баланс при переработке сахаров стеблей сорго в этанол (при использовании варианта А).

При расчете баланса исходили из следующих данных:

- исходный материал – 1 т стеблей сорго;
- количество сахаров в стебле – 10% по массе; влажность стеблей – 77%;
- выход сока после отжима на вальцевом станке – 75% от массы стеблей;
- потери сахара при отжиме сока из стеблей – 5%;
- доброкачественность сока и сиропа – 88%;
- выпаривание сока в сироп проводится на 3-х корпусной выпарной установке (расходуется 0,4 кг технологического пара на 1 кг выпаренной влаги);
- выпаривание сока сорго ведется до получения сиропа с концентрацией СВ 74%.

Для расчета приняли содержание сахаров как содержание сахарозы. В этом случае теоретически из 100 кг сахарозы можно получить 53,82 кг этанола. При расчете энергетического

выхода процесса считали, что на современных заводах на производство 1 тонны биоэтанола используется 8 ГДж тепловой энергии [15]. Это энергия, затрачиваемая на процессы брожения, перегонки и абсолютизацию этанола (без учета энергии на сгущение и сушку барды).

Для сравнения различных видов топлива, отличающегося влажностью, приводят теплотворную способность к абсолютно сухому веществу. Для этого использовали следующее соотношение:

$$Q = Q_c(1-W/100) - 25,14W, \text{ кДж/кг,}$$

где  $Q$  – теплотворная способность влажного топлива, кДж/кг;  $Q_c$  – теплотворная способность абсолютно сухого вещества топлива, кДж/кг. Для абсолютно сухой багассы 18,6-20,9 МДж/кг (в расчете принято 20 МДж/кг);  $W$  – влажность топлива, % масс. Рассчитана по исходным данным и материальному балансу. В нашем примере влажность составила 51%. В данном расчете  $Q = 8,52$  МДж/кг.

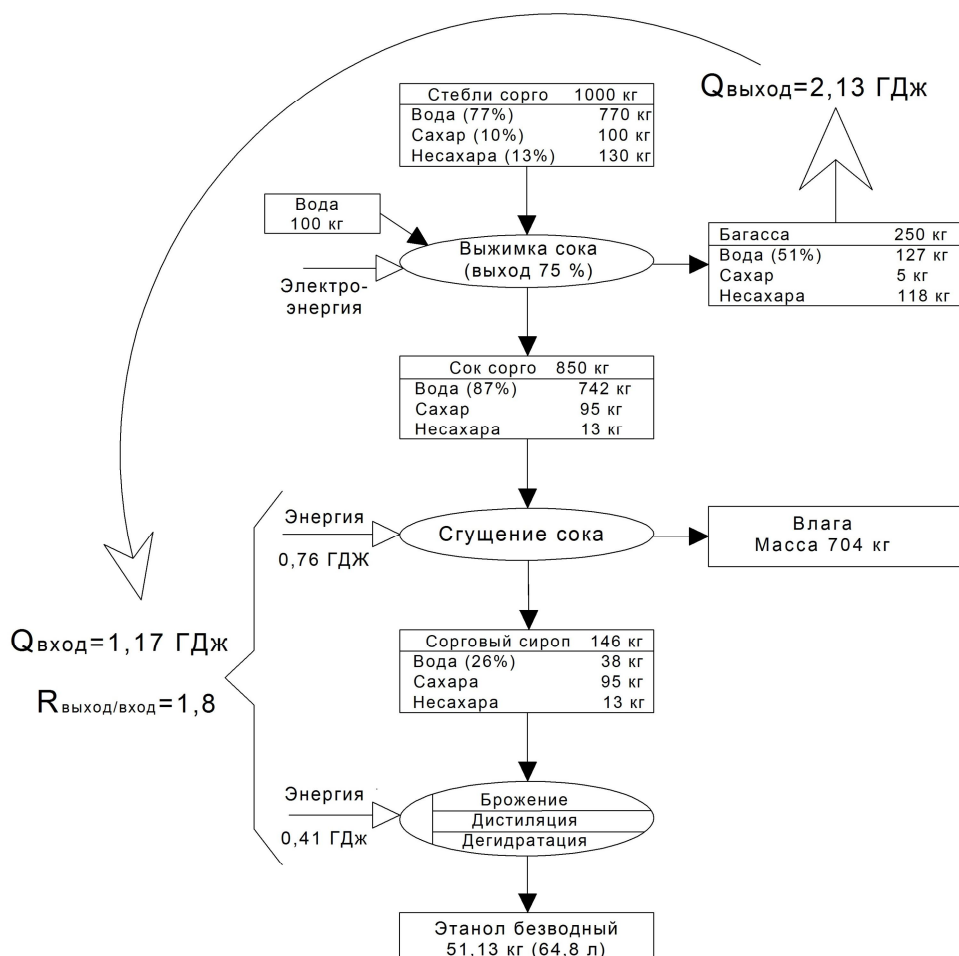


Рис. 3. Материальный и энергетический баланс переработки сахаров очищенных стеблей сахарного сорго в биоэтанол.

Из рис. 3 видно, что затраты энергии на переработку 1 тонны стеблей сорго в этанол составляют 1,17 ГДж, а при сжигании вторичных продуктов производства (сорговой багассы) из 1 тонны исходного сырья получаем 2,13 ГДж энергии, что в 1,8 раза больше (выход тепловой энергии  $R = 1,8$ ). Эту энергию можно направить на сгущение и сушку барды и/или на гидролиз лигноцеллюлозного материала сорговой багассы.

Отметим, что при использовании однокорпусной выпарной установки выход тепловой энергии составит 0,9-1,1. Поэтому целесообразно использовать многокорпусные выпарные установки.

В нашем примере весь сок сгущался в сироп с 74% СВ. На заводе по производству биоэтанола приблизительно 25% натурального сока можно непосредственно сбродить в этанол в осенний период работы без какого-либо сгущения или с добавлением сиропа для достижения необходимой плотности суслу. К тому же сироп, который будет перерабатываться в ближайшие зимние месяцы, может сгущаться до 50-60% СВ. В работе [10] приводятся следующие оптимальные сроки хранения сиропа сахарного сорго в зависимости от содержания СВ: при концентрации СВ 45% срок хранения составляет один месяц (при 20°C); при концентрации СВ 60-65% – три месяца; при концентрации СВ 85% – около одного года.

Состав и высокая калорийность багассы сорго позволяет использовать ее как источник тепловой энергии, более чем вдвое покрывающий технологические потребности производства.

Биоэтанольный завод, перерабатывающий сахарное сорго, должен иметь высокую рентабельность за счет дешевизны и хорошего качества исходного сырья. Сорговая багасса, получаемая при отжиме сока из стеблей растения, обеспечит завод тепловой энергией в осенний период, а также позволит упаривать сок сорго в сироп (законсервировать сахара сорго в целях дальнейшей переработки в этанол).

В энергетическом балансе следует учесть и затраты на выращивание исходного сырья сорго. По данным [17], на выращивание сорго (посадка, удобрения, пестициды, транспорт и т.д.) тратится

20,3 ГДж/га. При урожае сорго 80 т/га на возделывание 1 т очищенных стеблей сорго необходимо 0,34 ГДж энергии. При переработке 1 т стеблей сорго на биоэтанольном заводе расходуется 1,17 ГДж. Сжигание багассы из 1 т стеблей сорго дает 2,13 ГДж энергии (рис. 3). Энергетическая эффективность на гектаре сахарного сорго (выращивание, уборка, транспорт, переработка сахаров сорго в этанол) составит 1,41. При этом не учитывается энергия, которая содержится в полученном биоэтаноле.

**Выводы.** 1. Сорго в агроклиматических условиях Украины, как в северных (Сумская, Киевская), так и в юго-западных (Хмельницкая) областях имеет урожайность 80-120 т/га и достаточную для промышленной переработки сахаристость стебля – 7-12%.

2. Согласно расчетам, основанным на собственных экспериментальных и сравнительных данных, сахарное сорго в Украине имеет преимущество перед другими видами сырья как за счет меньшей себестоимости, так и за счет возможности использования побочных продуктов для энергетического самообеспечения производства.

3. Могут быть намечены такие направления дальнейшей работы с целью создания промышленной технологии переработки сахарного сорго в жидкие биотоплива:

- изучение состава и трансформации сахаров в соке и сгущенном соке, имея в виду его дальнейшую ферментацию в этанол (бутанол);
- изучение кинетики ферментации сахаров сорго в этанол;
- изучение состава летучих продуктов ферментации;
- изучение отходов, остающихся после выделения летучих продуктов ферментации из культуральной жидкости, с целью их утилизации;
- изучение процессов предварительной обработки лигноцеллюлозы стебля и гидролиза его полисахаридов для последующей ферментации.

В проведении анализов принимали участие научные сотрудники ГУ "ИПБГ НАН Украины" канд.хим.наук Г.В.Лантух и н.с. К.Н.Лукашевич; образцы стеблей сорго и его семена любезно

предоставлены заведующим отделом НБС НАН Украины докт.с./х.наук Д.Б.Рахметовым; помощь в конструировании экспериментального оборудования для отжима сока оказал инженер-конструктор В.Н.Кривонос.

1. *Sorgho (сборник статей)*. Государственное издательство сельскохозяйственной литературы. – М., 1957. – 120 с.

2. *Тараненко, В. И.* Сорго как кормовая культура. – Харьков, 1969. – 184 с.

3. *Царев А. П., Кирюхин И. В.* Сок и патока из сахарного сорго // Кукуруза и сорго. – 1989. – № 6. – С. 35–37.

4. *Григоренко Н.О.* Удосконалення технології харчового сиропу із цукрового сорго.: Дис...канд. техн. наук. – Київ: НУХТ, 2010. – 149 с.

5. *Pirgari E.* Sweet sorghum – natural sweetener for foods/ Cercetări Agronomice în Moldova. 2007 Anul XXXX. – Vol. 3 (131). // [http://www.uaiasi.ro/CERCET\\_AGROMOLD/CA3-07-06.pdf](http://www.uaiasi.ro/CERCET_AGROMOLD/CA3-07-06.pdf)

6. *Nimbkar N., N.M. Kolekar, J. H. Akade and A.K. Rajvanshi.* Syrup Production from Sweet Sorghum/ NARI. September – 2006.

7. *Gnansounou E., Dauriat A.* Ethanol fuel from biomass: A review/ Scientific and Industrial Research. – Vol.64. – November 2005. – PP. 809-821.

8. *Gunatilake H., Abeygunawardena P.* Energy Security, Food Security, and Economics of Sugarcane Bioethanol in India/ ADB Economics Working Paper – Series No. 255. – April 2011.

9. *Grassi G., Nardi A., Vivarelli L.S.* Low-cost production of bioethanol in the E.U. through integrated full production of sweet sorghum crops// 14th European Biomass Conference, 17-21 October 2005, Paris, France. <http://web.etaflorence.it>

10. *Early Manual* – Diffusion of a sustainable EU model to

produce 1st generation ethanol from sweet sorghum in decentralised plants. 2011. <http://esse-community.eu>

11. *Grassi G., Tondi G., Helm P.* Small size commercial bioenergy technologies in instrument of rural development – 2006. <http://web.etaflorence.it>

12. *Цыганков С.П., Володько О.І., Новак А.Г., Азарков М.М.* Цукрове сорго – перспективна сировина для виробництва біоетанолу. // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету. – Вінниця, 2010. – Випуск 42. – Т.2 – С. 88–91.

13. *Еримизин, Н. Н.* Создание и изучение гибридов и сортов сахарного сорго / Н.Н. Еримизин // Сельскохозяйственные науки: научные труды / КГАУ. – Симферополь: Вперед, 2002. – Вып. 78. – С. 85–87: табл.

14. *Гибриды и сорта сорговых культур, впервые включенные в Государственный реестр с 1993 г.* // Кукуруза и сорго. – 1993. – № 6. – С. 14–16.

15. *Цыганков С. П.* Биоэтанол. – К., 2010. – 160 с.

16. *Инструкция по технологическому и микробиологическому контролю спиртового производства.* – М.: Агропромиздат, 1986. – 16 с.

17. *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). <http://web.etaflorence.it>

18. *Jasberg, B.K., Montgomery, R.R. and Anderson, R.A.* Preservation of sweet sorghum biomass/ Biotechnol. Bioeng. Sym. – 1983. – Vol. 13. – PP.113–120.

19. *Antongiovanni M. and C. Sargentini.* Variability in chemical composition of straws/ Options Méditerranéennes – Série Séminaires. – 1991. – № 16. – С. 49–53.

20. *Wiselogel, A., Tyson, S., & Johnson, D.* In C. E. Wyman (Ed.) Handbook on bioethanol: Production and utilization/ Washington, DC: Taylor & Francis. – 1996. – PP.105–119.