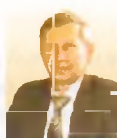


А.Н. Баран,
к.т.н., доцент



В.А. Пашинский,
к.т.н.



О.И. Родькин,
к. биол. н., доцент,
проректор



А.А. Бутько,
ст. преподаватель



Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова

ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СОЛОМЫ РАПСА

УДК 621:662.997

Аннотация

В статье описаны выполненные исследования, подтверждающие перспективность использования соломы рапса в качестве источника энергии. Приводятся сведения о теплотворной способности рапсовой соломы, зависимости теплоты сгорания от влажности сжигаемой соломы, о химическом составе и массовой доле элементов в соломе рапса и продуктах ее сгорания в условиях Республики Беларусь.

Abstract

The article describes the research carried out, confirming the prospects of using rape straw as an energy source. Given information on rape straw calorific value, on dependence of the heat of combustion from humidity burnt straw, on the chemical composition and mass fraction of elements in the rape straw and its products of combustion in conditions of the Republic of Belarus.

На сегодняшний день существуют некоторые сомнения в пригодности использования соломы в качестве теплоносителя. Разумеется, задачей сельского хозяйства является не столько снабжение сырьем энергетического сектора, сколько производство продуктов питания для населения и кормов для скота с соблюдением экологических норм, к примеру, с предотвращением вымывания питательных веществ из почв и т.д. Если хозяйство делает выбор в пользу запахивания соломы в землю, то это увеличивает содержание углерода в почве. Солома разлагается и образует CO₂, что влияет на климатические факторы.

Использование соломы в энергетических целях в Дании

На протяжении нескольких лет за рубежом, в частности, в Дании, проводились различные исследования по определению доступности соломы в качестве энергоресурса. Хотя имеются огромные различия в результатах проведенных исследований, общим является тот факт, что ресурсы соломы намного превосходят ее потребление на сегодняшний день.

Энергетическая политика Дании, которая в 1970-х годах практически полностью основывалась на импортируемой нефти и угле, сегодня характеризуется использованием различных энергоресурсов, что означает частичное использование энергии ветра, биоотходов и соломы для целей энергетики. На развитие использования возобновляемых источников энергии и местных видов топлива повлияли такие факторы как:

- дополнительное налогообложение потребления импортируемых энергоресурсов;
- принятые политические соглашения, поддерживающие идею рационального использования энергии;
- освобождение от налогов при использовании биомассы [1].

В сентябре 2010 года Датская комиссия по климату опубликовала отчет, в котором говорится, что Дания может полностью отказаться от ископаемого топлива к 2050 году без ущерба для экономики страны [1]. Проведенные комиссией исследования показали, что полный переход страны на использование «зеленой» энергии будет стоить 0,5% от ВВП ежегодно. Более того, использование угля, нефти и газа в качестве энергоносителей не обойдется стране дешевле ввиду постоянно растущих цен на ископаемые виды топлива и ограничительные квоты на выброс CO₂. Это позволяет планировать полную компенсацию инвестиций, вложенных в новейшие энергетические технологии, а также укрепить независимость страны от импортируемых энергоресурсов.

В соответствии с выводами Датской комиссии по климату, основными элементами «системы зеленой энергетики» станут [1]:

- энергосбережение;

- ветровые турбины вдоль берега моря;
- биомасса как энергоресурс;
- электричество и биотопливо для транспортного сектора.

Солома, не использованная в качестве корма или подстилки для скота, ранее сжигалась прямо на полях после уборки урожая. В 1991 году сжигать солому на полях запретили [1], и с того времени фермеры начали задумываться над тем, чтобы использовать солому в энергетических целях (рис. 1, 2).

Тем не менее, переработка и транспортировка соломы – довольно дорогостоящие мероприятия. Хотя ресурсы соломы огромны, экономическая выгода от ее переработки невелика. В то время как древесина считается выгодным товаром в международной торговле, солома про-

Рис. 1. Производство возобновляемой энергии в Дании в период с 1980 по 2009 год

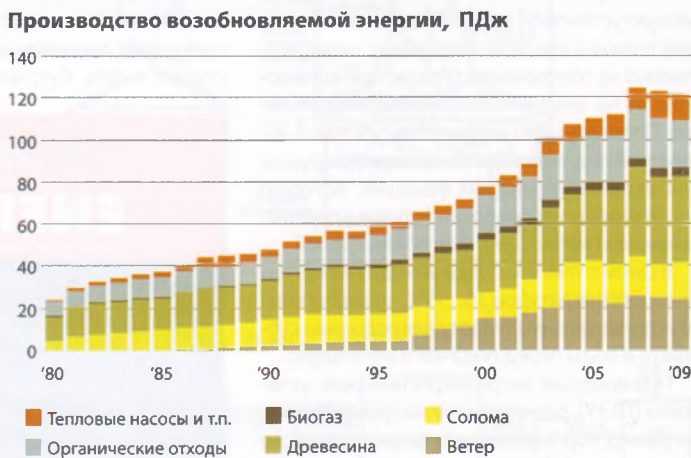
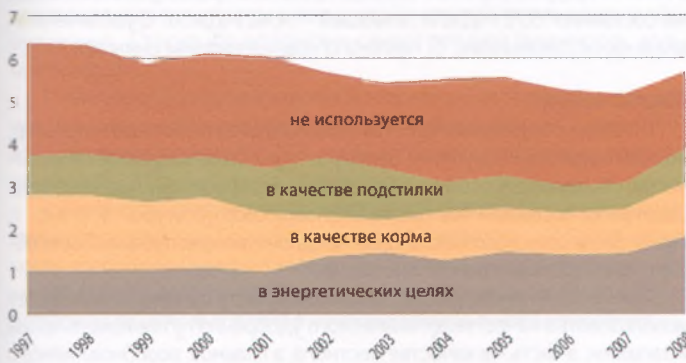


Таблица 1. Энергетические и экологические характеристики различных видов топлива

Вид топлива	Теплота сгорания (МДж/кг или МДж/м ³)	Сера, %	Зола, %	Углекислый газ (кг/ГДж)
Дизельное топливо	42,5	0,2	1	78
Мазут	42	1,2	1,5	78
Природный газ	35–38	0	0	57
Каменный уголь	15–25	1–3		60
Гранулы из соломы	15–18	до 0,13	до 12	0

Рис. 2. Ежегодный сбор соломы и ее использование для различных нужд в Дании

Количество соломы, млн т



дается только локально. В принципе, нет никаких препятствий в том, чтобы выпускать соломенные пеллеты и продавать их за рубеж, но на сегодняшний момент это в Дании не практикуется.

Ежегодно в нашей стране образуются миллионы тонн соломы, в т.ч. рапса (рис. 3). По данным статистики [2] в Республике Беларусь наблюдается увеличение посевных площадей рапса с 115 тыс. га в 2006 г. до 402 тыс. га в 2013 г., а также рост урожайности соответственно с 10,7 ц/га до 16,8 ц/га. Валовой сбор рапса по годам приведен на рис. 4.

Солома имеет массу вариантов использования, однако для нас представляет интерес в качестве топлива. Она имеет сравнительно низкую относительную влажность (чаще всего – не более 25%) и достаточно высокую теплоту сгорания. Энергетическая и экологическая оценка различных видов топлива представлена в табл. 1 [3].

Солома рапса практически является отходом сельскохозяйственного производства (растениеводства). Однако на сегодняшний день отсутствуют конкретные сведения по теплотворной способности рапсовой соломы, зависимости теплоты сгорания от влажности сжигаемой соломы, о химическом составе и массовой доле элементов в соломе рапса и продуктах ее сгорания в условиях Республики Беларусь.

Исследование теплотворной способности соломы рапса в Беларуси

Отбор проб рапсовой соломы производили на следующий день после сбора урожая в ОАО «Рапс» Минского района. Для отбора проб выбрали 4 участка, равноудаленных друг от друга. Отбор проб производили вручную, как по участкам, так и по высоте валков соломы. Отобрано 16 проб. Масса каждой пробы, измельченной и однородной по составу соломы, составляла 0,5 кг.

Для выполнения измерений массовой доли химических элементов в пробах растительного происхождения нами выбран спектрометр рентгеновского излучения СЕР-001. Содержание химических элементов от серы до урана в широком диапазоне концентраций определяли по методике [3]. Для этого солому высушили, измельчили, просеяли через сито. Затем при помощи высокоточных электронных весов КВ фирмы KERN осуществили навеску проб порошкообразной соломы с точностью до 0,001 г и спрессовали их в «таблетки». Соломенные «таблетки» по очереди помещали в спектрометр и при помощи управляющей программы «Elvatech MCA Software» делали спектральный анализ с обеих сторон каждой «таблетки». Полученные спектры проанализированы (найжены пики), идентифицированы (установлена элементная принадлежность спектральных линий) и сохранены в виде файла на жестком диске.

Определение влажности соломы производили по методике [4] с помощью электрического сушильного шкафа с естественной вентиляцией марки BIND ER, оснащенного терморегулятором со стопорным устройством, выключателем с часовым механизмом, контрольным термометром и противнями для установки бюкс. Рапсовую солому измельчили до длины 1–3 см.

Зольность соломы определяли по методике [5] в муфельной печи марки SN OL 8.2/1100 с прокаливанием зольного остатка в тиглях до постоянной массы при температуре 815±10°С.

Теплота сгорания определяется химическим составом горючего вещества (H, C, N, O, S) и количественным содержанием элементов. Она также зависит от зольности и влажности сжигаемого топлива [6].

Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания проб соломы производили по методике [7] с помощью калориметра сжигания с жидкостной бомбой типа Рһуве. Для регистрации температуры в калориметрическом сосуде использовали систему для сбора и оцифровки информации Cobra 3.

Теплоту сгорания топлива в бомбе, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_b^a = \frac{(C_i + cm_c)\Delta t - q_1 m_1}{m}, \tag{1}$$

где C_i – энергетический эквивалент калориметрической системы, кДж/°С; c – удельная теплоемкость калориметрической жидкости, кДж/(кг·К); m_c – масса калориметрической жидкости, кг; Δt – исправленный прирост температуры в сосуде, °С; q_1 – теплота сгорания проволоки, кДж/кг; m_1 – масса сгоревшей проволоки, равная разности масс проволоки до и после сжигания, кг; m – кажущаяся масса образца топлива, кг.

$$\Delta t = (t_n - t_o + \Delta h), \tag{2}$$

где t_o, t_n – показания термометра, соответствующие температуре зажигания (начальная температура главного периода) и конечной температуре главного периода, °С; Δh – поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой, °С.

$$\Delta h = \frac{V' + V''}{2} n_1 + V'' n_2, \tag{3}$$

где $V' = \frac{t' - t_o}{n_o}$; $V'' = \frac{t_n - t''}{n_n}$ – средние скорости изменения температуры в начальном и конечном периодах за полуминутный промежуток, °С; t' и t'' – начальная температура начального периода и конечная температура конечного периода, °С; n_1 – число отсчетов главного

Рис. 3. Объем рапсовой соломы, которая образовывалась в Беларуси в хозяйствах всех категорий, тыс. т

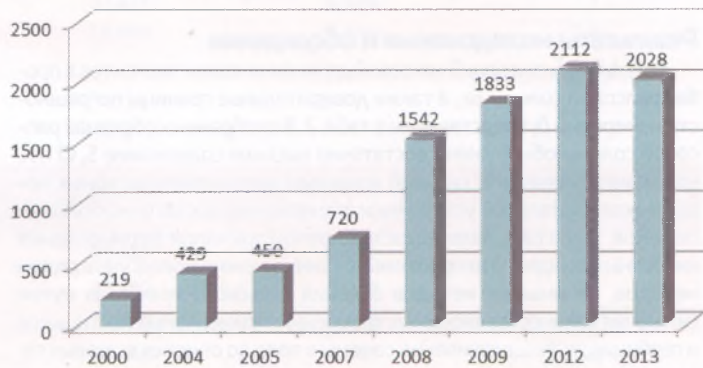


Рис. 4. Валовой сбор рапса в Беларуси, тыс. т

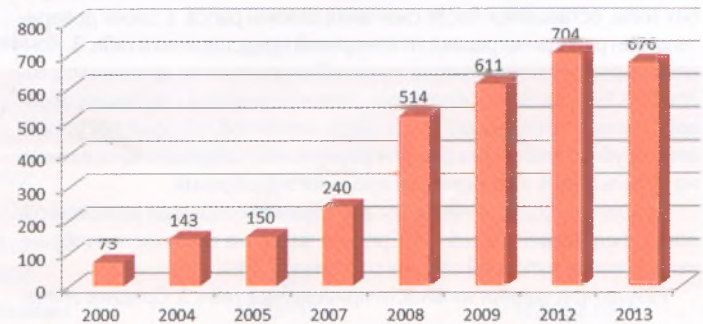
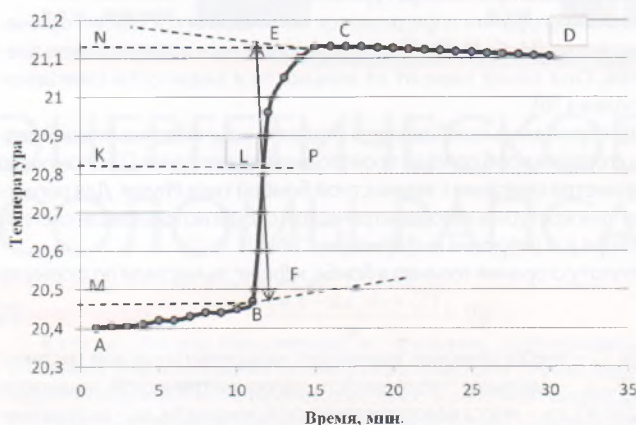


Рис. 5. Изменения температуры Δt в ходе calorиметрического опыта: АВ – начальный период; ВС – главный период; CD – конечный период



периода с быстрым повышением температуры ($0,3^{\circ}\text{C}$ и более) от В до L (рис. 5); n_2 – то же, с медленным повышением температуры ($n_2 = n - n_1$) от L до С (рис. 5); n – число измерений в главном периоде.

Высшую теплоту сгорания испытуемой пробы соломы, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{б}}^{\text{с}} - (94S_{\text{г}}^{\text{с}} + \alpha Q_{\text{б}}^{\text{а}}), \quad (4)$$

где 94 – коэффициент, учитывающий теплоту образования серной кислоты из диоксида серы и растворения серной кислоты в воде на 1% серы, перешедшей при сжигании топлива в серную кислоту, кДж/кг; $S_{\text{г}}^{\text{с}}$ – массовая доля серы в топливе, %; α – коэффициент, учитывающий теплоту образования и растворения в воде азотной кислоты. Для углей, горючих сланцев, торфа и соломы $\alpha = 0,0015$.

Низшую теплоту сгорания топлива, кДж/кг, вычисляли по формуле:

$$Q_{\text{н}} = Q_{\text{б}}^{\text{с}} - 24,42 (8,94H^{\text{а}} + W^{\text{а}}) \quad (5)$$

где 24,42 – теплота парообразования 0,01 кг водяного пара, кДж; 8,94 – коэффициент пересчета содержания водорода в топливе на воду; $H^{\text{а}}$ – массовая доля водорода в аналитической пробе топлива, %; $W^{\text{а}}$ – массовая доля воды в испытуемой пробе топлива, %.

Результаты исследования и обсуждение

Результаты измерений массовой доли химических элементов в пробах рапсовой соломы ω_j , а также доверительные границы погрешности измерений Δ_j представлены в табл. 2. В отобранных образцах рапсовой соломы обнаружено достаточно высокое содержание S, Cl и K, что может привести к сильной коррозии высокотемпературных поверхностей котельной установки и образованию достаточно больших объемов SO_x и HCl, являющихся основной причиной формирования кислотных дождей. Эти проблемы частично можно преодолеть рядом методов, начиная от методов ведения сельского хозяйства путем снижения количества вносимых удобрений, применяемых пестицидов и гербицидов, выщелачивания соломы в поле до очистки дымовых газов.

Результаты измерений массовой доли химических элементов в пробах золы, оставшейся после сжигания соломы рапса, а также доверительные границы погрешности измерений представлены в табл. 3. Концентрация химических элементов в ней возрастает по сравнению с соломой в 7–8 раз. Зола, образовавшаяся в результате сжигания рапсовой соломы, не содержит каких-либо элементов, которые могут оказать пагубное влияние на флору и фауну полей. Следовательно, ее можно использовать в качестве минерального удобрения.

Результаты содержания влаги в отобранных образцах рапсовой соломы представлены в табл. 4. Среднее значение влажности отобранных образцов рапсовой соломы составило 7,1%.

Результаты оценки зольности приведены в табл. 5. Среднее значение

зольности для рапсовой соломы составило 5,9%, что превышает зольность древесины в 2 раза.

Результаты исследования теплоты сгорания топлива представлены в табл. 6. Среднее значение высшей теплоты сгорания рапсовой соломы составило 15,72 МДж/кг, а низшей – 14,42 МДж/кг. С увеличением влажности соломы (рис. 6) теплота сгорания топлива снижается.

Заключение

1. В связи с неуклонным ростом производства технических культур, во всем мире и в Республике Беларусь неуклонно возрастает и количество образующейся соломы. Так, в 2013 в Беларуси году посевные площади рапса составили 402 тыс. га, а валовой сбор культуры – 676 тыс. т. При этом на сельскохозяйственных предприятиях республики было образовано 2,03 млн т рапсовой соломы.

При сохранении подобных показателей часть соломы можно будет использовать в качестве органического удобрения путем измельчения и заправки, а часть – в качестве местного, а главное, возобновляемого вида топлива. 750 тыс. т рапсовой соломы эквивалентны 480 тыс. т у.т. и тем самым способны заменить примерно 420 млн м^3 газа. Экономия от подобной альтернативной замены по предварительным оценкам составит около \$110 млн.

2. Солома рапса является отходом сельскохозяйственной деятельности (растениеводства) и соответственно не требует дополнительных площадей и затрат для выращивания. Наиболее эффективными, экономически и экологически целесообразными на сегодняшний день направлениями ее использования в хозяйствах республики являются использование в качестве органического удобрения и энергетического ресурса.

Выполненные нами исследования подтверждают перспективность использования соломы рапса в качестве источника энергии. Так, при влажности 7,1% и зольности 5,9% низшая теплота сгорания составила 14,42 МДж/кг. Однако спектральный анализ показал достаточно высокую концентрацию S, Cl и K. Снижения их концентрации можно до-

Таблица 2. Спектральный анализ проб рапсовой соломы

Элемент	Массовая доля химического элемента, мкг/г
S	1655,6400±1251,7795
Cl	3593,5972±856,2269
K	13305,5275±821,5157
Ca	2035,5592±170,6705
Mn	1,9900±1,5352
Fe	16,2136±4,1009
Cu	0,8482±0,7999
Zn	2,4311±1,2357
Br	3,1987±1,1259
Rb	4,9809±1,5165
Sr	24,5479±2,9261

Таблица 3. Спектральный анализ проб золы

Элемент	Массовая доля химического элемента, мкг/г
S	13029,3920±3825,1095
Cl	21445,2250±2282,6170
K	82783,0025±2229,9827
Ca	5297,3690±299,5841
Mn	11,8787±4,1095
Fe	104,3075±11,3183
Cu	5,0031±2,1060
Zn	10,8876±2026
Br	13,1646±2,4831
Rb	24,8133±3,6820
Sr	183,1979±8,6982

ичь путем уменьшения количества вносимых удобрений или применяемых пестицидов, или путем естественного выщелачивания соломы. Использование соломы в качестве биотоплива требует тщательного изучения природы ее горения. Эффективность использования зависит от технологических и конструктивных особенностей используемого оборудования, а также характеристик самого топлива (влажность, зольность и др.).

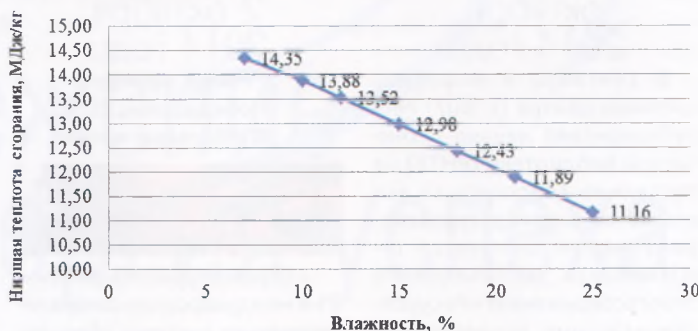
3. На теплоту сгорания рапсовой соломы влияет ее влажность. Так, при влажности 7% низшая теплота сгорания соломы равна 14,42 МДж/кг, а при влажности 25% низшая теплота сгорания соломы составила 11,2 МДж/кг, что на 20% меньше.

4. Зольность соломы составляет около 6%, что в 10 раз превышает зольность древесных брикетов хорошего качества и в 2–2,5 раза – зольность древесины. Однако в золе не обнаружено каких-либо элементов, которые могут оказать пагубное влияние на флору и фауну полей, что опускает ее использование в качестве минерального удобрения.

Литература

1. Torben Skott, Energy production from straw. Position, technology and innovation in Denmark. – Agro Business Park A/S, Niels Pedersens Alle 2, 8830 jele.
 2. Сельское хозяйство Республики Беларусь // Статистический сборник. – Мн.: Национальный статистический комитет Республики Беларусь, 2011. – 283 с.
 3. Методика выполнения измерений массовой доли химических элементов железа, кадмия, калия, кальция, марганца, меди, мышьяка, никеля, свинца, серы, стронция, титана, хрома, цинка в пробах растительного и животного происхождения методом рентгено-флуоресценции с использованием спектрометра энергий рентгеновского излучения СЕР-Ю01 – Мн.: Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, 2009. – 5 с.

Рис. 6. Зависимость низшей теплоты сгорания рапсовой соломы от влажности



4. ГОСТ 13496-92. Комбикорма, комбикормовое сырье. Методы определения влаги. – Взамен ГОСТ 13496.3-80, кроме разд. 2; Введ. 01.01.93. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 4 с.

5. ГОСТ 11022-95. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. – Взамен ГОСТ 11022-90; Введ. 01.01.97. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 8 с.

6. Родькин О.И., Пашинский В.А., Бутыко А.А., Иванова Е.В. Энергетическое использование клона ивы корзиночной SALIX VIMINALIS VALETAS GIGANTIA (TURBO) // Энергоэффективность. – 2014. – №5. – с. 14–18.

7. ГОСТ 147-95. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания. – Взамен ГОСТ 147-74; Введ. 01.01.97. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 49 с. ■

Статья поступила в редакцию 24.06.2014

Таблица 4. Влажность рапсовой соломы

Масса пробы рапсовой соломы, г	Масса бюкса, г			Убыль влаги, г	Аналитическая влажность, %
	пустого, г	с пробой соломы, г	после конечного просушивания, г		
4,340	56,760	61,100	60,789	0,311	7,2
4,105	47,540	51,645	51,355	0,290	7,1
5,760	53,630	59,390	58,990	0,400	6,9
Значение влажности рапсовой соломы					7,1±0,1

Таблица 5. Зольность рапсовой соломы

Масса пробы рапсовой соломы, г	Масса тигля, г			Масса золы, г	Зольность топлива, %
	пустого, г	с пробой соломы, г	с золой, г		
0,518	37,659	38,177	37,691	0,032	6,2
0,573	32,152	32,725	32,190	0,038	6,6
0,575	35,941	36,516	35,970	0,029	5,0
0,538	37,435	37,973	37,460	0,031	5,8
Значение зольности рапсовой соломы					5,9±0,6

Таблица 6. Высшая и низшая теплота сгорания рапсовой соломы

рапсовой соломы	Масса, г		Теплота сгорания, МДж/кг	
	запальной проволоки до сжигания	запальной проволоки после сжигания	высшая	низшая
0,166	0,024	0,022	14,20	12,88
0,229	0,030	0,025	18,36	17,04
0,200	0,028	0,022	14,14	12,84
0,217	0,030	0,020	16,22	16,90
Средние значения высшей и низшей теплоты сгорания рапсовой соломы			15,73±1,74	14,92±2,06