

УДК 662.6

КРАМАР В.Г., ЖОВМИР Н.М., ЗУБЕНКО В.И., ЧАПЛЫГИН С.М.

Институт технической теплофизики НАН Украины

ТОПЛИВНЫЕ СВОЙСТВА ПОЖНИВНЫХ ОСТАТКОВ КУКУРУЗЫ

Наведено результати дослідження паливних властивостей подрібнених пожнивних залишків кукурудзи: розподіл часток за розміром, насипна маса шару в залежності від середнього розміру часток, питома маса окремих часток, вологість, вихід летючих речовин, вміст золи, склад робочої маси палива, нижча теплота згоряння. Визначені середні співвідношення маси стебла, листя, стрижнів качанів до маси зерна кукурудзи.

Приведены результаты исследования топливных свойств измельченных пожнивных остатков кукурузы: распределение частиц по размеру, насыпная плотность слоя в зависимости от среднего размера частиц, плотность отдельных частиц, влажность, выход летучих веществ, содержание золы, состав рабочей массы топлива, низшая теплота сгорания. Определены средние соотношения массы стебля, листьев и стержней початков к массе зерна кукурузы.

The investigation results of fuel properties of grinded corn stubble remains are presented, such as: the distribution of particles dimensions, bulk density of fuel layer depending on average particle dimension, density of particles, humidity, volatile matter, ash content, as-received basis of fuel, low heat value. The average mass ratios of corn stalk, leaves and corn cobs to corn seed were determined.

A – содержание золы;
 C – содержание углерода;
 d_s – средний размер частиц измельченного топлива;
 H – содержание водорода;
 N – содержание азота;
 n – число классов крупности при ситовом анализе;
 O – содержание кислорода;
 Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива;
 S – содержание серы;
 V – выход летучих веществ;
 V_b^0 – теоретический удельный объем воздуха, необходимый для полного сжигания;
 W – влажность;
 Z_i – среднее арифметическое значение размеров отверстий сит, которые ограничивают данный класс крупности при ситовом анализе, мм;

δ_c – размер отверстий сит при ситовом анализе;
 $\sum_{i=1}^n \gamma_i$ – суммарный выход надрешетного продукта при ситовом анализе;
 γ_i – выход класса крупности при ситовом анализе, %;
 ρ – плотность;
 ПО – пожнивные остатки.

Индексы верхние:

$г$ – к горючей массе топлива;
 $р$ – к рабочей массе топлива;
 $с$ – к сухой массе топлива.

Индексы нижние:

нас – насыпная.

В последнее время в связи с ростом цен на природный газ и уголь, обострилась проблема обеспечения котельных установок топливом, особенно в сельской местности. Одним из путей решения этой проблемы является использование в качестве топлива отходов растительной биомассы, в частности пожнивных остатков (ПО) злаковых культур. На конец 2008 года в Украине эксплуатировалось 16 котлов тепловой мощностью от 150 до 950 кВт для сжигания тюкованной соломы злаков, в основном для отопления школ и административных зда-

ний в сельской местности, что свидетельствует о росте заинтересованности сельских потребителей в использовании альтернативных топлив. Однако не менее весомым ресурсом для топливного использования являются также пожнивные остатки кукурузы, ежегодное количество которых в Украине составляет около 4,8 млн. т [1].

В качестве топлива могут использоваться стебли, листва и стержни початков кукурузы после обмола та зерна, которые, согласно существующим агротехническим приемам, в основном запахивают

или сжигают в поле. Мировой опыт прямого сжигания ПО кукурузы свидетельствует о том, что практически реализованными способами в настоящее время являются:

- сжигание в отопительных печах в сельской местности (традиционный способ);

- слоевое сжигание в измельченном виде на механической колосниковой решетке в водогрейных, а также паровых котлах производительностью до 130 т пара в час [2, 3];

- сжигание в тюкованном виде в фермерских котлах [4];

- сжигание в кипящем слое (кипящий слой, циркулирующий кипящий слой) на тепловых электростанциях [5].

После сбора кукурузы на зерно ПО кукурузы могут быть заготовлены и измельчены с помощью кукурузоуборочной техники, используемой обычно для заготовки зеленой массы на корм. Поэтому сейчас одним из наиболее реальных вариантов топливного использования ПО кукурузы в Украине является сжигание их в измельченном виде. Возможности заготовок ПО кукурузы для сжигания их в тюкованном виде ограничены как отсутствием специальной техники для их тюкования, так и применяемыми агротехнологиями.

Одним из важных вопросов при разработке котельного оборудования и организации топливного использования ПО кукурузы является комплексное исследование их топливных свойств, поскольку данные литературных источников по этому вопросу незначительны и зачастую противоречивы.

В Институте технической теплофизики НАН Украины были проведены исследования топливных свойств измельченных ПО кукурузы. При выполнении экспериментальных исследований в основном были использованы существующие методики определения соответствующих показателей для твердых ископаемых топлив, комбикормов, измельченной древесины, а также стандарты ЕС, разработанные для твердых биотоплив.

Для определения ресурсов ПО кукурузы необходимо знать среднее отношение массы стебля, листьев и стержней початков кукурузы к массе зерна. В литературе этот показатель («коэффициент отходов») варьируется в довольно широких пределах: от 0,55 до 1,2 [6]; от 1,0 до 2,5 [7]. Нами были

проведены исследования по определению данного показателя для надземных частей растений кукурузы урожая 2008 года, собранных в ноябре и достигших впоследствии воздушно-сухого состояния. Соответствующие части растений были отобраны и взвешены. Результаты измерений показали, что соотношение суммарной массы стебля, листвы и стержня початка к массе зерна зависит от количества початков на стебле и составляет от 0,76 для растений с двумя початками до 1,5 при одном початке. В дальнейшем это соотношение принимаем равным 1,3.

Для определения топливных характеристик ПО кукурузы были использованы надземная часть стеблей, листва и початки кукурузы, выращенной в 2007 году, которые хранились на протяжении 9 месяцев в сухом помещении и достигли влажности, соответствующей воздушно-сухому состоянию. Влажность ПО кукурузы, определенная по известной методике (высушивание при температуре 105 ± 2 °С до постоянной массы и расчет влажности по потере массы), составила 10,8 %.

Выбор размеров частиц измельченных ПО кукурузы связан с их характеристиками, получаемыми после измельчения кукурузоуборочной техникой. При уборке кукурузы на зерно размер измельченных кукурузных стеблей, в зависимости от типа комбайна или жатки, варьируется в достаточно широких пределах (в основном от 10 до 200 мм, но иногда свыше 400 мм). В машинах для уборки кукурузы на силос или зеленый корм длина измельченных частиц может регулироваться и составляет от 5 до 90 мм. Для исследования выбран диапазон размеров частиц 15...60 мм как наиболее характерный для техники, которая может быть использована для подготовки ПО к применению в качестве топлива. Кроме того, такой диапазон размеров частиц обеспечивает возможность их подачи в топку с помощью шнекового транспортера. Для определения насыпной плотности были подготовлены три навески частиц стеблей длиной соответственно 15, 30 и 60 мм.

Насыпная плотность слоя частиц каждой порции определялась отдельно по методике, основанной на определении массы материала, насыпанного в сосуд известного объема [8]. Согласно полученным данным, насыпная плотность измельченных ПО

кукурузы в зависимости от размера частиц при данной влажности колеблется от 50,9 до 55,4 кг/м³, причем с увеличением степени измельчения насыпная плотность увеличивается. Зависимость насыпной плотности от размера частиц в исследуемых границах значений этих параметров имеет практически линейный характер (рис. 1).

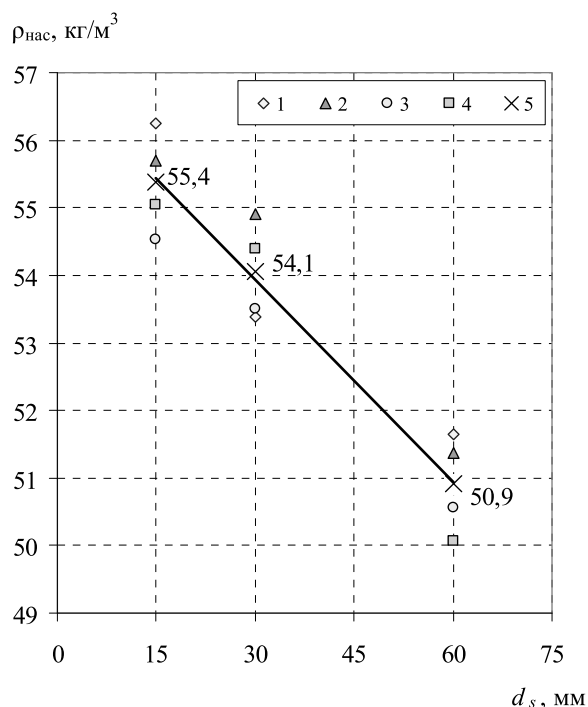


Рис. 1. Зависимость насыпной плотности частиц измельченных ПО кукурузы от размера частиц:

1– 4 – результаты отдельных измерений;
5– среднее значение четырех измерений.

Для определения плотности отдельных частиц измельченных стеблей кукурузы был применен приближенный метод, основанный на измерении длины и диаметра частиц цилиндрической формы, определении их массы и расчета плотности образцов. Среднее значение плотности частиц составило 130 кг/м³. Следует отметить существенную разницу плотностей частиц, содержащих и не содержащих стебельный узел. Общий диапазон колебания плотности для частиц без узла составляет от 87 до 171 кг/м³, для частиц с узлом – от 132 до 189 кг/м³.

Для измельчения на частицы меньшего размера использовались стебли и листья кукурузы урожая 2008 года влажностью 20,3 %. Измельчение проводилось с помощью механического садового измельчителя Power Slider 2500R фирмы Al-Ко

(ФРГ), срезающего слой около 3 мм. При повторном попадании срезанных частиц под нож происходило их дополнительное измельчение. Полученную массу просеивали на решетке с квадратными ячейками размером 20 мм, подрешетную массу считали пригодной для топливного использования, а надрешетную массу направляли на повторное измельчение. В результате получена измельченная масса, подобная древесной стружке, с насыпной плотностью 60 кг/м³. Рассевом измельченной массы на ситах с размерами ячеек 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20 мм определен ее гранулометрический состав, полученные результаты представлены на рис. 2.

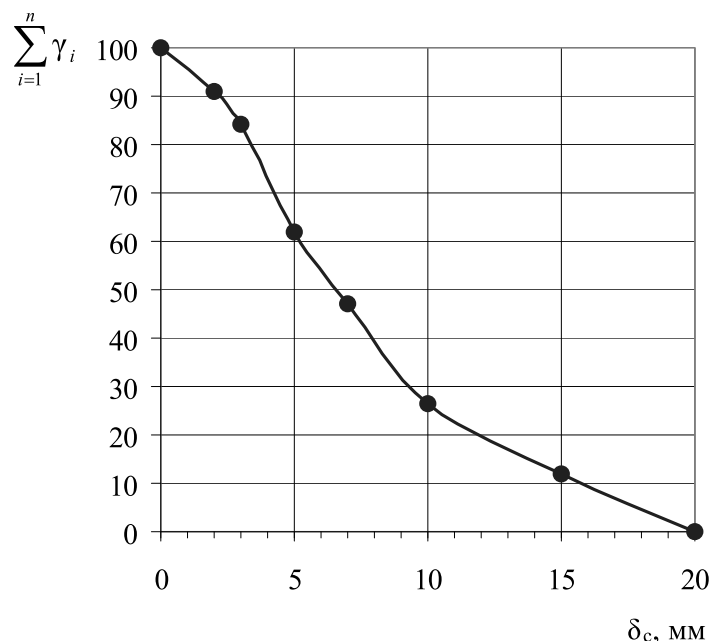


Рис. 2. Кривая гранулометрического состава измельченных ПО кукурузы.

По данным гранулометрического состава средний размер частицы измельченного топлива рассчитывали по формуле:

$$d_s = \sum_{i=1}^n \frac{Z_i \cdot \gamma_i}{100} \quad (1)$$

Его значение составило величину 7,7 мм.

Определение выхода летучих веществ проводили по известной методике [9], сущность которой состоит в нагреве пробы в закрытом тигле при температуре 900±5 °С на протяжении 7 минут и расчете выхода летучих по потере массы, за вычетом массы влаги топлива. Среднее значение выхода летучих веществ из измельченных ПО кукурузы составило $V^p = 69,2 \%$, $V^c = 77,6 \%$, $V^r = 80,4 \%$.

Для определения зольности использовалась известная методика [10], согласно которой отобранная проба сперва нагревалась за 60 минут до 500 °С, затем выдерживалась 60 минут при данной температуре, а далее нагревалась до температуры 815±10°С и выдерживалась не менее 60 минут до постоянной массы. Среднее значение зольности ПО кукурузы в воздушно-сухом состоянии по результатам проведенных опытов составило $A^p=3,1\%$, $A^c=3,51\%$. По литературным данным зольность ПО кукурузы колеблется в пределах 5,2...7,5 %. Полученное нами меньшее значение зольности может быть связано с тем, что исследуемые образцы ПО кукурузы в течение 3 месяцев после уборки оставались в поле, и часть растворимых солей, входящих в состав золы, могла быть вымыта дождями. На основании литературных данных, а также учитывая результаты проведенных опытов, был рассчитан усредненный состав сухой массы ПО кукурузы: $C^c = 46,0$; $H^c = 5,5$; $N^c = 1,38$; $O^c = 41,3$; $S^c = 0,05$; $A^c = 5,8$.

По найденным значениям среднего состава сухой массы определялся состав горючей массы и

состав ПО кукурузы на рабочую массу при влажности 20 %, а также рассчитывалась низшая теплота сгорания и теоретический удельный объем воздуха, необходимый для полного сжигания. Значение влажности 20 % считается верхним пределом, т.к. при большей влажности резко ухудшаются условия хранения стеблей и соломы злаковых культур из-за активного разложения биомассы микроорганизмами. Величину V_b^0 (м³/кг) рассчитывали по формуле [11]:

$$V_b^0 = 0,0889 \cdot K^p + 0,265 \cdot H^p - 0,0333 \cdot O^p, \quad (2)$$

где $K^p = C^p + 0,375 S^p$.

Значение Q_n^p , (кДж/кг) определяли по формуле [11]:

$$Q_n^p = (81C^p + 246H^p - 26(O^p - S^p) - 6W^p) \cdot 4,187 \quad (3)$$

В табл. 1 приведены топливные характеристики ПО кукурузы, полученные в результате проведенных исследований, и для сравнения – соответствующие показатели для некоторых твердых топлив растительного и ископаемого происхождения по литературным данным [11, 12].

Табл. 1. Сравнительные характеристики твердых биотоплив

Характеристики	Обозначения	Топливо					
		ПО кукурузы	Солома пшеницы	Древесина	Торф	Уголь каменный (марки Г Донецкого бассейна)	Антрацит (марки АШ Донецкого бассейна)
Состав топлива, %	C^r	48,8	48,0	51,0	59,0	80,5	93,5
	H^r	5,9	6,0	6,1	6,0	5,4	2,0
	N^r	1,5	0,5	0,6	2,0	1,5	0,8
	O^r	43,8	45,4	42,3	33,0	8,2	1,4
	S^r	0,05	0,10	0,0	0,3	4,4	2,3
	V^r	80,4	84,0	85,0	70,0	40,0	3,5
	A^p	4,6	5,3	1,0	11,0	17,0	16,7
	W^p	20,0	20,0	15...20	20...30	7,0	7,0
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Q_n^p	12,9	12,6	14,5	14,4	24,9	26,0
Объемное энергосодержание, ГДж/м ³	–	0,78	0,69 ¹ ; 1,26 ²	1,41 ³ ; 3,30 ⁴	4,0 ⁵	17...21	–
Теоретический объем воздуха для полного сжигания, м ³ /кг	V_b^0	3,3	3,2	3,8	3,8	6,5	6,9
Коэффициент пересчета в условное топливо, ед.	–	0,44	0,43	0,50	0,49	0,85	0,89

Примечания: ¹ – для соломы-сечки ($\rho_{нас} \approx 55$ кг/м³); ² – для соломы в тюках ($\rho_{нас} \approx 100$ кг/м³); ³ – для древесной стружки ($\rho_{нас} \approx 95...100$ кг/м³); ⁴ – для древесной щепы ($\rho_{нас} \approx 160...165$ кг/м³); ⁵ – для абсолютно сухого торфа ($\rho_{нас} \approx 280$ кг/м³).

Как видно из приведенных данных, ПО кукурузы по своим топливным свойствам наиболее близки к соломе злаков, отличаясь от древесины более высоким содержанием азота, серы и золы. Характерными особенностями ПО кукурузы по сравнению с ископаемыми топливами являются, как и для других биотоплив, меньшая удельная теплота сгорания, больший выход летучих веществ, меньший теоретический объем воздуха, необходимый для сжигания. Сравнительно низкие значения удельной теплоты сгорания и насыпной плотности обуславливают низкое объемное энергосодержание ПО кукурузы, которое составляет около 0,78 ГДж/м³. Более высокие значения данного показателя имеют: тюкованная солома – 1,26 ГДж/м³; измельченная древесина (стружка, щепа) – 1,41...3,30 ГДж/м³. Объемное энергосодержание каменного угля (17...21 ГДж/м³) превышает аналогичный показатель для ПО кукурузы в 22...27 раз. Данное обстоятельство существенно влияет на необходимые объемы складов, конструктивные характеристики систем подачи, что следует учитывать при планировании использования ПО кукурузы в качестве топлива. Из-за низкого объемного энергосодержания транспортировка ПО кукурузы в измельченном виде на дальние расстояния проблематична по экономическим соображениям, поэтому наиболее возможным является их использование в непосредственной близости от мест сбора кукурузы, т.е. в сельской местности для отопления ферм, отдельных зданий, сушильных установок.

Выводы

1. В результате проведенных исследований определен ряд топливных свойств ПО кукурузы, которые необходимы при разработке котельного оборудования, а также систем для их предварительной подготовки к использованию в качестве топлива.

2. Для топливного использования ПО кукурузы необходимы дальнейшие исследования, направленные на разработку оборудования и отработку технологии их сжигания, а также решение ряда вопросов, связанных с заготовкой топлива и его предварительной подготовкой к использованию. Также нуждаются в дополнительном исследовании вопросы заготовки и сжигания стеблей в виде тюков,

возможности изготовления и использования гранул и брикетов.

Данная работа выполнена благодаря поддержке, оказанной Министерством образования и науки Украины.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жовмір М.М., Недовссов В.І., Смірнов О.П., Талько А.Й. та ін. Ресурси біомаси для енергетичного використання в Україні // Енергетика і електрифікація. – 2002. – № 6. – С. 38 – 45.
2. www.bio-fueltechnologiesllc.com.
3. www.dragonpower.com.
4. T. O'Keefe. Growers build a hay burning furnace// WATT PoultryUSA Newsletter. – 2007, October 31, www.wattpoultry.com.
5. S. Blankinship. CFB: Technology of the Future?// Power Engineering.–2008, February, <http://pepei.pennnet.com>.
6. С.Сойфер, О. Заборски. Биомасса как источник энергии. М.: Мир, 1985. – 368 с.
7. Jeanty P. W., Warren D., Hitzhusen F. Assessing Ohio's Biomass Resources for Energy Potential Using GIS (Prepared for Ohio Department of Development) // Department of Agricultural, Environmental and Development Economics, The Ohio State University, 2004.
8. CEN/TS 15103:2005. Solid biofuels – Methods for the determination of bulk density.
9. ГОСТ 6382-2001. Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. М.: ИПК Издательство стандартов, 2003. – 12 с.
10. ГОСТ 11022-95 (ISO 1171-97). Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. М.: ФГУП Стандартинформ, 2006. – 7 с.
11. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. – 344 с.
12. В.О. Дубровін, М.О. Корчемний та ін. Біопалива (Технології, машини і обладнання). – К.: ЦТІ «Енергетика і електрифікація», 2004. – 256 с.

Получено 06.02.2009 г.