

УДК 574:576:332:621.311

Оценка экологических и технологических аспектов использования растительных остатков зерновых и технических культур для получения энергии

А.А. Бутько¹, О.И. Родькин², В.А. Пашинский¹, Б. Крстич³

¹Международный государственный экологический университет имени А.Д. Сахарова
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Республиканское научно-исследовательское унитарное предприятие «БелНИЦ “Экология”»
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Университет Нови Сад (г. Нови Сад, Республика Сербия)

В статье представлены экспериментальные результаты исследований содержания в некоторых видах соломы зерновых, зернобобовых и технических сельскохозяйственных культур, а также остатках кукурузы ряда химических элементов, удельной теплоты сгорания биомассы и ее зольности.

Цель исследования – оценить возможное воздействие на загрязнение воздушного бассейна и условия эксплуатации котлоагрегатов при сжигании растительных остатков зерновых и технических культур.

Материал и методы. Растительные остатки семи видов сельскохозяйственных культур (ячмень, озимая рожь, яровая пшеница, тритикале, овес, кукуруза и озимый рапс) отбирались в поле в течение 2–3 дней после уборки 2014 г. Определялись следующие характеристики биомассы, имеющие значение для экологической, энергетической и технологической оценки: влажность, зольность, удельная теплота сгорания, содержание С, Н, N, S, CluO.

Результаты и их обсуждение. Содержание в биомассе ряда химических элементов выявляет ее экологические и топливные характеристики и позволяет прогнозировать эффективность ее использования в энергетических целях в зависимости от условий сгорания. При близких сроках уборки показатель влажности, который непосредственно определяет эффективность сжигания, для соломы зерновых культур варьировал от 13 до 14%, несколько выше для озимого рапса – 15,2%. Наиболее высокая удельная теплота сгорания имела место для озимого рапса, озимой ржи и тритикале. Экологическая оценка соломы как биотоплива обуславливается наличием в ней таких элементов, как Н, С, S, N, а также зольностью. Содержание С и Н в растительных остатках исследуемых культур достаточно близко, в пределах ошибки опыта. В то же время для соломы озимого рапса и остатков кукурузы характерны более высокие показатели содержания в биомассе таких элементов, как N, Cl и S. Более высокая зольность имела место для соломы яровой пшеницы, рапса и кукурузы.

Заключение. Результаты исследований показывают, что с экологической точки зрения наиболее оптимальные показатели характерны для соломы зерновых культур. В то же время значительный потенциал применения остатков технических культур для энергетических целей обуславливается их высокой удельной теплотой сгорания (рапс), низкой влажностью (кукуруза), а также ограниченными возможностями использования для других целей в аграрном секторе.

Ключевые слова: возобновляемая энергетика, растительные остатки, солома, экологическое воздействие, удельная теплота сгорания, технологические аспекты сгорания.

Assessment of Ecological and Technological Aspects of Using Crop Residue of Cereals and Technological Cultures for Energy Generation

A.A. Butko¹, O.I. Rodkin², V.A. Pashinski¹, B. Krstych³

¹International State Ecological A.D. Sakharov University (Minsk, Republic of Belarus)

²Republican Scientific Research Company «BelNITs “Ecology”» (Minsk, Republic of Belarus)

³University Novi Sad (Novi Sad, Republic of Serbia)

Experimental findings of the study of presence of a number of chemical elements, biomass NCV and its ash level in some types of cereals, legumes and technical cultures stubble as well as in corn residue, are presented in the article.

The aim of the article is to assess possible impact on air pollution and operation conditions of boilers while burning cereal and technical culture crop residue.

Material and methods. Crop residue of 7 agricultural species (barley, winter rye, spring wheat, triticale, oats, corn and winter rapeseed) were picked up in the field within 2–3 days after 2014 harvesting. Following biomass characteristics were identified, which are significant for ecological, energy and technological assessment: humidity, ash level, NCV, C, H, N, S, CluO contents.

Findings and their discussion. Presence in biomass of a number of chemical elements determines its ecological and heating characteristics and makes it possible to forecast efficiency of its use with power purposes depending on the conditions of burning. At close harvest time the humidity indicator, which determines the burning efficiency, for cereal stubble was 13 to 14%, a bit higher for winter rapeseed 15,2%. The highest NCV was for winter rapeseed, winter rye and triticale. Ecological assessment of stubble as bio fuel is identified by the presence in it of such elements as H, C, S, N, and by ash level. Contents of C and H in crop residues of the investigated cultures are rather close, within the experiment error. At the same time, for winter rapeseed stubble and for corn residue higher indicators of the presence in biomass of such elements as N, Cl u S are typical. Higher ash level was present in spring wheat, rapeseed and corn.

Conclusion. The research findings show that from ecological point of view more optimal indicators are typical of cereals. At the same time considerable potential of using technical cultures residue as fuels is conditioned by their high NCV (rapeseed), low humidity (corn), as well as low possibilities of using it with other purposes in agricultural sector.

Key words: renewable power generation, crop residue, stubble, ecological impact, NCV, technological aspects of combustion.

Одним из приоритетных направлений энергосбережения в агропромышленном комплексе Беларуси в последние годы является экономия котельно-печного топлива за счет увеличения применения отходов сельскохозяйственного производства и местных топливных ресурсов. Постановлением Совета Министров Республики Беларусь «Об утверждении Национальной программы развития местных и возобновляемых энергоисточников на 2011–2015 годы» № 586 от 10.05.2011 г. предусматривается, что к концу 2015 г. объем использования соломы зерновых и зернобобовых культур составит 12% от валового сбора или 230 тыс. т у.т. [1]. В странах Европейского Союза свободные ресурсы соломы зерновых культур, применяемые в энергетических целях, варьируют от 15 до 60%: Греция – 15% [2], Польша – 20% [3], Германия – 30% [4], Швеция – 60% [5].

Необходимо отметить, что на сегодняшний день вопросы экономического, технологического и экологического обоснования использования соломы для энергетических целей являются дискуссионными. В аграрном секторе солома применяется в качестве удобрения, для изготовления компостов, укрытия буртов и других целей. Так, при использовании соломы сельскохозяйственных культур в качестве органического удобрения происходит обогащение почвы элементами питания, улучшаются прочность структуры почвы, поглощательная способность, кислотность, буферность, тепловой режим почв, а также существенно увеличивается эффективность вносимых в почву минеральных удобрений, при этом обеспечивается более высокий коэффициент их поглощения растениями [6]. Тем не менее, по данным, полученным в результате специального анкетирования слушателей повышения квалификации из Могилевской, Гомельской и Витебской областей, в среднем 19,0–27,5% соломы в агропромышленном комплексе страны эффективно не используется или сжигается на поле во время уборки или весной. В хозяйствах Могилевской и Витебской областей среднее значение излишек

соломы составляет 25,3–27,5%, а для Гомельской области – 19,0% [7].

За последние годы в стране резко увеличилась площадь для выращивания рапса и кукурузы на зерно. Растительные остатки этих культур имеют ограниченное использование в качестве корма для сельскохозяйственных животных и хороший потенциал для энергетических целей. В перспективе, вследствие известных климатических изменений, площади пашни, отводимые для кукурузы на зерно, будут только возрастать.

В этой связи значительный интерес представляют исследования, связанные с воздействием растительных остатков при их сжигании на окружающую среду. Второй аспект обуславливается технологическими факторами, то есть влиянием соединений, образующихся при сжигании соломы на технико-эксплуатационные характеристики котлоагрегатов.

Для обоснования и комплексной оценки экологических, энергетических и экономических аспектов проведены экспериментальные исследования по определению основных компонентов элементарного состава растительных остатков, некоторых видов сельскохозяйственных культур в условиях Беларуси.

Цель статьи – оценить возможное воздействие на загрязнение воздушного бассейна и условия эксплуатации котлоагрегатов при сжигании растительных остатков зерновых и технических культур.

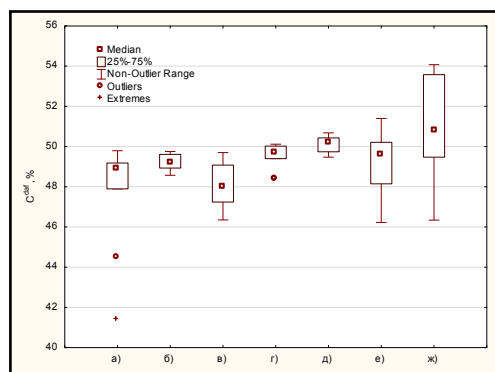
Материал и методы. Растительные остатки семи видов сельскохозяйственных культур (ячмень, озимая рожь, яровая пшеница, тритикале, овес, кукуруза и озимый рапс) отбирались в поле в течение 2–3 дней после уборки 2014 года. Определение влажности и зольности проведено по [8–9]. Содержание углерода, водорода, азота определено с использованием анализатора Vario EL III. Содержание серы и хлора в образцах выявлено методом рентгено-флуоресценции с применением спектрометра энергий рентгеновского излучения SEP-001. Содержание кислорода рассчитано согласно [10]. Теплота сгорания определена

по [11] с использованием calorиметрической бомбы PNYWE.

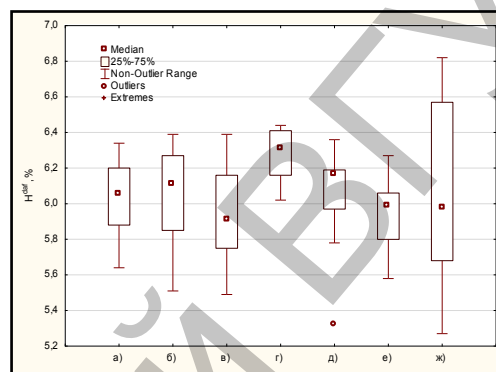
При выявлении С, Н, S, O, N и Cl исследовано 70 образцов соломы семи видов сельскохозяйственных культур.

Результаты и их обсуждение. В ходе исследований установлено, что содержание углерода

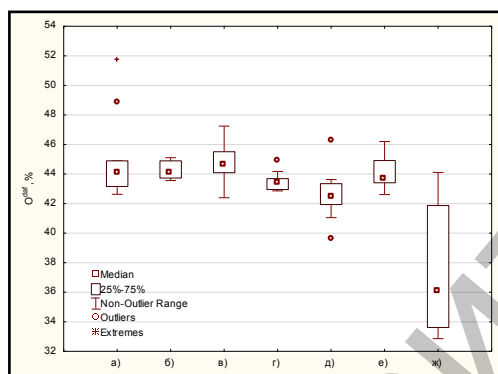
в соломе на сухую и беззольную массу варьирует от 41,4 до 54,07%; водорода – от 5,27 до 6,82%; кислорода – от 32,86 до 51,76%; азота – от 0,25 до 3,90%; хлора – от 0,25 до 3,90%; серы – 0,01 до 0,82%. Графические результаты статистической обработки данных представлены на рис.



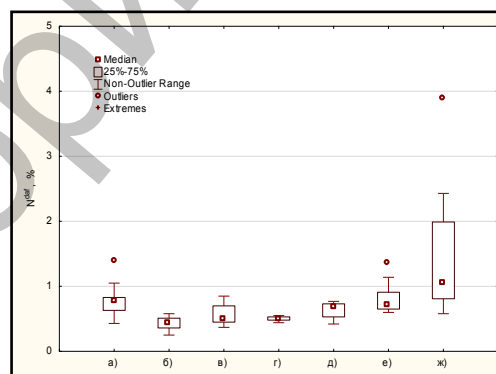
I) C



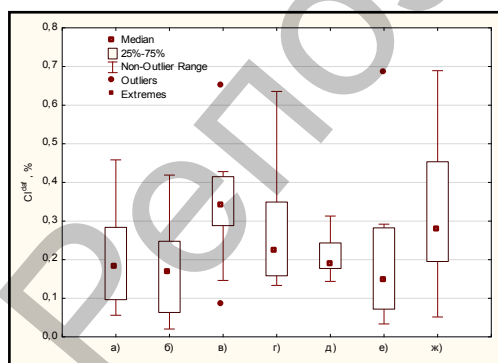
II) H



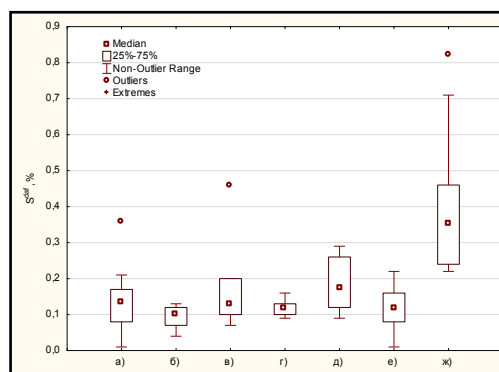
III) O



IV) N



V) Cl



VI) S

Рис. Содержание С, Н, О, N, Cl, S в соломе сельскохозяйственных культур на сухую и беззольную массу: а) ячмень; б) рожь озимая; в) пшеница яровая; г) тритикале; д) овес; е) кукуруза; ж) рапс озимый.

При сгорании топлива азот, содержащийся в нем, переходит в N_2 и газообразные окислы азота NO_x (NO , NO_2). В большинстве твердотопливных котлоагрегатах образование закиси азота (N_2O) незначительно. Так, последние исследования показали, что одно из основных экологических последствий сжигания твердого биотоплива обусловлено выбросами NO_x [13]. Образование NO_x в продуктах сгорания связано со следующими реакциями [12–14]:

– тепловые окислы азота образуются при температуре выше $\sim 1300^\circ C$ в условии высокой концентрации радикалов кислорода при окислении атмосферного азота в процессе горения;

– быстрые окислы азота – при температуре выше $\sim 1300^\circ C$ с высокой скоростью в условии связывания атмосферного азота углеводородными частицами при низкой концентрации кислорода;

– топливные окислы – при окислении азото-содержащих веществ, присутствующих в топливе в зоне факела.

В твердотопливных котлоагрегатах, из-за сравнительно низких температур в топочной камере (800 – $1200^\circ C$), тепловые и быстрые окислы азота образуются в малых количествах.

По оценкам зарубежных исследований загрязнение воздушного бассейна NO_x наблюдается при содержании N в твердых топливах выше $0,6\%$ на абсолютно сухую массу [15].

Среди рассмотренных вариантов загрязнение воздушного бассейна NO_x соответствует типичному значению варианта а), которое превышает критическое в $1,39$ раза, в) – $1,22$, д) – $1,77$, е) – $1,49$ и ж) – $2,72$ соответственно. Относительно безопасными вариантами являются б) и г).

При горении содержащийся в соломе хлор образует газообразные продукты сгорания в виде HCl , Cl_2 , а также хлориды щелочных металлов KCl и $NaCl$. При этом Cl оказывает коррозионное воздействие на поверхность нагрева и выбросы в атмосферу HCl и твердых частиц KCl , $NaCl$, $ZnCl_2$, $PbCl_2$. HCl влияет на формирование полихлорированных дибензо-*p*-диоксинов ПХДД и полихлорированных дибензофуранов ПХДФ [12; 16–17].

Согласно [15] индуцированная коррозия и загрязнение воздушного бассейна HCl наблюдаются при концентрациях Cl выше $0,1\%$ на сухую массу топлива, а также образование ПХДД/Ф при концентрациях выше $0,3\%$. Необходимо отметить, что образование ПХДД/Ф сопровождается при взаимодействии O_2 с не окислившимися частицами летучей золы в диапазоне температур

от 180 до $500^\circ C$ и присутствии Cu в виде катализатора [17].

Исследования показали, что индуцированная коррозия и загрязнение воздушного бассейна соответствуют всем рассмотренным выше культурам, так как концентрация Cl в $1,95$ – $3,58$ раза выше установленного значения. Следовательно, образование ПХДД/Ф превышает верхнюю границу диапазона соответственно в $1,19$ и $1,15$ раза.

При сгорании S образуются газообразные продукты сгорания в виде SO_2 , SO_3 , а также щелочные и щелочно-земельные сульфаты. Эффективность фиксации S золой зависит от концентрации щелочных и щелочно-земельных металлов, особенно Ca [16]. Необходимо отметить, что высокое содержание SO_2 в продуктах сгорания наряду со снижением температуры уходящих газов вызывает сульфатирование щелочных и щелочно-земельных хлоридов, что приводит к коррозии по $FeCl_2$ или формированию $ZnCl_2$ на поверхностях нагрева [16].

Согласно [15] загрязнение воздушного бассейна SO_x наблюдается при концентрациях S выше $0,2\%$ на абсолютно сухую массу. Исследования показали, что среди рассмотренных вариантов в меньшей мере загрязнение воздушного бассейна SO_x оказывают варианты от а) до ж). Для рапса озимого превышает критическое в $2,42$ раза.

Исследованиями установлено, что влажность соломы составляет для ячменя – $14,49\%$, стандартное отклонение – $2,25\%$; ржи озимой – $14,24\%$, стандартное отклонение – $2,40\%$; тритикале – $13,41\%$, стандартное отклонение – $2,09\%$; пшеницы яровой – $13,63\%$, стандартное отклонение – $2,31\%$; овса – $14,24\%$, стандартное отклонение – $2,40\%$; рапса озимого – $15,19\%$, стандартное отклонение – $2,37\%$; кукурузы – $1,44\%$, стандартное отклонение – $1,80\%$.

Зольность твердых биотоплив имеет важное практическое значение для выбора соответствующей технологии сжигания и газоочистки. Содержание зольных элементов подвержено значительным колебаниям в зависимости от культуры и условий выращивания, но в известной мере оно отражает неодинаковую потребность различных растений в элементах питания, что позволяет установить некоторый ряд закономерностей. Например, в золе соломы резко повышается содержание CaO и Si, в золе листьев большинства растений преобладает K_2O , а в золе из семейства бобовых – S. Зольный состав и содержание N меняется с возрастом. Как правило, при старении растений в их составе уменьшается количе-

ство N, P₂O₅, K₂O и увеличивается содержание CaO [6].

По данным [6] типичная зольность соломы зерновых культур на воздушно-сухое вещество составляет 3,48–6,45%, зернобобовых культур – 0,9–4,43%, прядильных и масличных культур – 3,03–10,0%.

Установлено, что зольность спелой соломы на абсолютно сухую массу составляет для ячменя – 4,96%, стандартное отклонение – 2,00%; ржи озимой – 3,76%, стандартное отклонение – 1,13%; тритикале – 4,23%, стандартное отклонение – 1,17 %; пшеницы яровой – 6,24%, стандартное отклонение – 1,91%; овса – 5,46%, стандартное отклонение – 1,83%; рапса озимого – 5,90%, стандартное отклонение – 1,72%; кукурузы – 6,40%, стандартное отклонение – 2,12%.

Высшая теплота сгорания соломы на горючую массу варьирует от 18,88 до 20,38 МДж/кг. Низшая теплота сгорания рабочей массы при типичных значениях влажности и зольности для ячменя составляет 13,79 МДж/кг, ржи озимой – 14,89 МДж/кг, пшеницы яровой – 13,76 МДж/кг, тритикале – 15,06 МДж/кг, овса – 14,60 МДж/кг, кукурузы – 13,95 МДж/кг, рапса озимого – 14,67 МДж/кг [18–19].

Заключение. Экспериментальные данные по основным компонентам элементарного состава соломы указывают на различие в химическом составе. Так, содержание углерода в спелой соломе на сухую и беззольную массу варьирует от 41,4 до 54,07%, водорода – от 5,27 до 6,82%, кислорода – от 32,86 до 51,76%, азота – от 0,25 до 3,90%, серы – от 0,01 до 0,82%, хлора – от 0,25 до 3,90%.

Одно из основных экологических последствий сжигания твердого биотоплива обусловлено выбросами NO_x. Загрязнение воздушного бассейна NO_x наблюдается при содержании N в твердых топливах выше 0,6% на абсолютно сухую массу и превышает критическое значение в 1,22–2,72 раза.

При горении содержащийся в соломе хлор образует газообразные продукты сгорания в виде HCl, Cl₂, а также хлориды щелочных металлов KCl и NaCl. HCl влияет на формирование ПХДД и ПХДФ. Загрязнение воздушного бассейна соответствует всем рассмотренным выше культурам, так как концентрация Cl в 1,95–3,58 раза установленного выше значения, а следовательно, образование ПХДД/Ф превышает верхнюю границу диапазона соответственно в 1,19 и 1,15 раза.

При сгорании S образуются газообразные продукты сгорания в виде SO₂, SO₃, а также щелочные и щелочно-земельные сульфаты. Иссле-

дования показали, что среди рассмотренных вариантов загрязнение воздушного бассейна SO_x соответствует типичному значению варианта, которое превышает критическое в 2,42 раза.

Содержание зольных элементов подвержено значительным колебаниям в зависимости от культуры и условий выращивания. Так, зольность зерновых культур на воздушно-сухое вещество составляет 3,48–6,45%, зернобобовых культур – 0,9–4,43%, прядильных и масличных культур – 3,03–10,0%. Зольный состав и содержание N меняются с возрастом. Как правило, при старении растений в их составе уменьшается количество N, P₂O₅, K₂O и увеличивается содержание CaO.

Высшая теплота сгорания соломы на горючую массу варьирует от 18,88 до 20,38 МДж/кг и зависит от содержания водорода. Наибольшей теплотой сгорания обладают рапс озимый, рожь озимая и тритикале.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Совета Министров Республики Беларусь «Об утверждении Национальной программы развития местных и возобновляемых энергисточников на 2011–2015 годы» № 586 от 10.05.2011 [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file663fb27db70962e8.PDF>. – Дата доступа: 10.02.2015.
2. Christou, M. Current Situation and Future Trends in Biomass Fuel Trade in Europe / M. Christou, I. Eleftheriadis, C. Panoutsou, I. Pampichael // КАПЕСЕС. – 2007. – 17 p.
3. Burczy, H. Study on Biomass Trade in Poland / H. Burczy, T. Mirowski, W. Kalawa, W. Sajdak // Project 4 Biomass. – 2010. – 32 p.
4. Weiser, C. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany / C. Weiser, V. Zeller, F. Reinicke, B. Wagner, S. Majer, A. Vetter, D. Thrän // Applied Energy, Special Energy Solutions in Agriculture. – 2014. – Vol. 114. – P. 749–762.
5. Katterer, T. The impact of altered management on long-term agricultural soil carbon stocks – a Swedish case study / T. Katterer, O. Andren, J. Persson // Nutrient Cycling in Agroecosystems. – 2004. – Vol. 70. – P. 179–187.
6. Справочник по удобрениям / под ред. В.И. Шемпеля, Р.Т. Вильдфлуша. – Минск: Урожай, 1969. – 312 с.
7. Добышев, А.С. Сушка зерна с использованием нетрадиционных видов топлива / А.С. Добышев, А.А. Крупенько // Информационный бюллетень. – 2006. – № 4. – Горки: программа Европейского Союза TACIS, 2006. – 33 с.
8. Биотопливо твердое. Определение содержания влаги. Метод с применением сушки в сушильном шкафу. – Ч. 1: Общая влага. Стандартный метод: ГОСТ EN 14774-1-2013. – Введ. 01.03.14. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 10 с.
9. Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности: ГОСТ 11022-95. – Введ. 01.01.97. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2006. – 11 с.
10. Топливо твердое. Методы определения кислорода: ГОСТ 2408.3-95. – Введ. 01.01.97. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. – 34 с.
11. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и вычисление низшей теплоты сгорания: ГОСТ 147-95. – Введ. 01.01.97. – Минск: Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 1996. – 49 с.

12. Nussbaumer, T. Combustion and Co-Combustion of Biomass / T. Nussbaumer // In: Proc. of the 12th European Biomass Conference. – 2002. – Vol. 1. – P. 31–37.
13. Miller, J.A. Mechanism and Modeling of Nitrogen Chemistry in Combustion / J.A. Miller, C.T. Bowman // In: Prog. Energy Combust. Sci. – 1989. – Vol. 15. – P. 287–338.
14. Winter, F. NO and N₂O Formation and Destruction in Biomass Grate Combustors: A Comprehensive Study – Practical Implications / F. Winter, W. Magor, H. Hofbauer // In: Proc. of the 5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment. – 1999. – P. 983–989.
15. Obernberger, I. Physical characteristics and chemical composition of solid biomass fuels // In: Script for the lecture «Thermochemical Biomass Conversion» / I. Obernberger // Netherlands: Technical University Eindhoven, Department for Mechanical Engineering. – 2003. – P. 973–982.
16. Obernberger, I. Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltensasche bilden der Elemente, Schriftenreihe «Thermische Biomassenutzung» / I. Obernberger. – Graz: Technische Universität Graz, 1997. – 349 S.
17. Salthammer, T. Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF) during the combustion of impregnated wood / T. Salthammer, H. Klipp, R.D. Peek, R. Marutzky // Chemosphere. – 1995. – Vol. 30. – P. 2051–2060.
18. Fenimore, C.P. Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames / C.P. Fenimore. – Pittsburgh: Proc. of the Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute, 1971. – P. 373–380.
19. Wunderli, S. Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzo-furans in solid residues from wood combustion by HRGC/HRMS / S. Wunderli, M. Zennegg, I.S. Dolezal, E. Gujer, U. Moser, M. Wolfensberger, P. Hasler, D. Noger, C. Studer, G. Karlaganis // Chemosphere. – 2000. – Vol. 40. – P. 641–649.
7. Dobyshev A.S., Krupenko A.A. *Informatsionnii bulletin № 4, oktiabr 2006, Gorki: Programma Yevropeiskogo Soyuza TACIS* [Information Bulletin No4, October 2006, Gorki: EU TACIS Program], 2006, 33 p.
8. *GOST EN 14774-1-2013. Biotoplivo tverdoe. Opredeleniye soderzhaniya vlagi. Metod s primeneniym sushki v sushilnom shkafu. Ch. 1. Obshchaya vraga. Standartnii metod. – Vved. 01.03.2014* [State Standard EN 14774-1-2013. Biofuel Solid. Detection of Humidity Content. Method with the Application of Drying in the Drying Cabinet. Part 1. General Humidity. Standard Method. – Introd. 01.03.2014].
9. *GOST 11022-95. Toplivo tverdoe mineralnoye. Metodi opredeleniya zolnosti. Vved. 01.01.1997* [State Standard 11022-95. Solid Mineral Fuel. Methods of Ash Level Detection. Introd. 01.01.1997].
10. *GOST 2408.3-95. Toplivo tverdoe mineralnoye. Metodi opredeleniya kisloroda. Vved. 01.01.1997* [State Standard 2408.3-95. Solid Mineral Fuel. Methods of Oxygen Detection. 01.01.1997].
11. *GOST 147-95. Toplivo tverdoe mineralnoye. Opredeleniye visshoi teploti sgoraniya i vichisleniye nizshei teploti sgoraniya. Vved. 01.01.1997* [State Standard 147-95. Solid Mineral Fuel. Detection of Higher Burning Heat and Calculation of Lower Burning Heat. Introd. 01.01.1997].
12. Nussbaumer T. Combustion and Co-Combustion of Biomass, In: Proc. of the 12th European Biomass Conference, Vol. I, ISBN 88-900442-5-X, 2002, pp. 31–37.
13. Miller J.A., Bowman C.T. Mechanism and Modelling of Nitrogen Chemistry in Combustion. In: Prog. Energy Combust. Sci. 1989, Vol. 15, pp. 287–338.
14. Winter F., Magor W., Hofbauer H. NO and N₂O Formation and Destruction in Biomass Grate Combustors: A Comprehensive Study – Practical Implications. In: Proc. of the 5th International Conference on Technologies and Combustion for a Clean Environment, 1999, pp. 983–989.
15. Obernberger I. Physical characteristics and chemical composition of solid biomass fuels. In: Script for the lecture «Thermochemical Biomass Conversion», Chapter 3, Technical University Eindhoven, Department for Mechanical Engineering, Section Process Technology (ed.), the Netherlands, 2003, pp. 973–982.
16. Obernberger I. Nutzung fester Biomasse in Verbrennungsanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Verhaltensasche bilden der Elemente, Schriftenreihe «Thermische Biomassenutzung», Band 1, ISBN 3-7041-0241-5, dbv-Verlag der Technische Universität Graz, Graz, Osterreich, 1997. 349 S.
17. Salthammer T., Klipp H., Peek R.D., Marutzky R. Formation of polychlorinated dibenzo-p-dioxins (PCDD) and polychlorinated dibenzofurans (PCDF) during the combustion of impregnated wood. In: Chemosphere, 1995, Vol. 30, pp. 2051–2060.
18. Fenimore C.P. Formation of Nitric Oxide in Premixed Hydrocarbon Flames. In: Proc. of the Thirteenth Symposium (International) on Combustion, The Combustion Institute (ed.), Pittsburgh, 1971, pp. 373–380.
19. Wunderli S., Zennegg M., Dolezal I.S., Gujer E., Moser U. Wolfensberger M., Hasler P., Noger D., Studer C., Karlaganis G., Determination of polychlorinated dibenzo-p-dioxins and dibenzofurans in solid residues from wood combustion by HRGC/HRMS. In: Chemosphere, 2000, Vol. 40, pp. 641–649.

REFERENCES

1. *Postanovleniye Soveta Ministrov Respubliki Belarus «Ob utverzhdenii Natsionalnoi prigrammi razvitiya mestnikh i vozobnovlyayemikh energoistochnokov na 2011–2015 godi» № 586 ot 10.05.2011* [No 586 Decree of the Council of Ministers of the Republic of Belarus «On Approval of the National Program of the Development of Local and Renewable Energy Resources for 2011–2015»].
2. Christou M., Eleftheriadis I., Panoutsou C., Papamichael I. Current Situation and Future Trends in Biomass Fuel Trade in Europe. Country Report of Greece. 2007, 17 p.
3. Study on Biomass Trade in Poland. Project 4 Biomass, WP 4.2.4.32 p.
4. Integrated assessment of sustainable cereal straw potential and different straw-based energy applications in Germany // Applied Energy, Vol. 114, February 2014, p. 749–762.
5. Katterer T., Andren O., Persson J. The impact of altered management on long-term agricultural soil carbon stocks – a Swedish case study. Nutrient Cycling in Agroecosystems 70, 2004, p. 179–187.
6. Shkel M.P. *Spravochnik po udobreniyam* [Fertilizer Directory], Mn., Uradzhai, 1969, 312 p.

Поступила в редакцию 17.02.2015

Адрес для корреспонденции: e-mail: aleh.rodzkin@rambler.ru – Родькин О.И.