

УДК 662.61+662.63

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ПЕРИОДА ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ГОРЕНИИ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ

Н.М. Жовмир

Институт возобновляемой энергетики НАН Украины
Украина, 02094 Киев, ул. Красногвардейская, д. 20А
Тел./факс: +38044 206 28 09, e-mail: renewable@ukr.net

Заключение совета рецензентов: 19.12.14 Заключение совета экспертов: 21.12.14 Принято к публикации: 23.12.14

Для создания высокоинтенсивных топочных устройств необходимо исследовать возможности интенсификации всех стадий горения твердого топлива. Рассмотрены особенности протекания термического разложения (термолиза) древесной гранулы (пеллеты) с выделением летучих веществ в топочном пространстве котла или теплогенератора. Расчет периода выхода летучих по известным зависимостям, полученным на основе медленного нагрева частиц древесины в инертной атмосфере, дает значения значительно больше наблюдаемых при горении. Описана методика проведения экспериментальных исследований по определению продолжительности периода выхода летучих веществ при термолизе древесных гранул диаметром 6 мм в условиях окислительной атмосферы в муфельной печи. Исследовано влияние температуры в печи, влажности и длины гранул. Экспериментально определенная продолжительность периода выхода летучих в окислительной атмосфере в 2-4 раза меньше расчетной для условий инертной атмосферы. Зависимость продолжительности периода выхода летучих от температуры имеет экспоненциальный характер, а от длины гранул по характеру близка к гиперболическому тангенсу. Продолжительность периода выхода летучих возрастает при увеличении длины гранул до 30 мм, а при дальнейшем увеличении длины остается постоянной. Продолжительность периода выхода летучих для древесных гранул с содержанием влаги $W = 10,1\%$ на 20% больше по сравнению с сухими гранулами.

Ключевые слова: биоэнергетика, древесные гранулы, пеллеты, горение, термолиз, летучие, выделение, продолжительность.

RESEARCH OF VOLATILE RELEASE DURATION AT WOOD PELLETS COMBUSTION

N.M. Zhovmir

Institute of Renewable energy of NASU
20A Krasnogvarjejskaya str., Kiev, 02094, Ukraine
Tel./fax: +38044 206 28 09, e-mail: renewable@ukr.net

Referred: 19.12.14 Expertise: 21.12.14 Accepted: 23.12.14

For development of high intensive burners it is necessary explore possibilities to intensify all stages of solid fuel combustion. The features of thermal decomposition (thermolysis) of wood pellets with volatile substances release in furnace of boiler or heat generator were regarded. Calculation of volatile release duration based on available dependencies, derived using slow heating of wood particles in an inert atmosphere, gives results that significantly exceed observed at combustion. Procedure of experimental investigation to determine duration of volatile release period at thermolysis of wood pellets, having 6 mm in diameter, in an oxidizing atmosphere in the muffle furnace is described. The influence of muffle temperature, humidity and length of pellets were investigated. Experimentally determined period of volatile release in oxidizing atmosphere is from 2 up to 4 times less than that estimated for inert atmosphere. Dependence of volatile release duration from temperature is exponential in nature, and that from the pellets length is close to hyperbolic tangent. Period of volatile release increases with the pellets length increasing up to 30 mm and at further increasing of pellet length remains constant. The period of volatile release for wood pellets with moisture content $W = 10.1\%$ is 20% more compared with that for dry pellets.

Keywords: bioenergy, wood pellets, combustion, thermolysis, volatile matter, release, duration.



Николай Михайлович
Жовмир
N.M. Zhovmir

Сведения об авторе: старший научный сотрудник отдела возобновляемых органических энергоносителей Института возобновляемой энергетики НАНУ, канд. техн. наук, доцент кафедры возобновляемых источников энергии Киевского политехнического института.

Образование: теплоэнергетический факультет Киевского политехнического института.

Область научных интересов: теплоэнергетика, биоэнергетика, сжигание и термохимическая переработка биомассы, очистка газовых смесей.

Публикации: более 100.

Author information:

Education:

Main research interests:

Publications:

Введение

На рынке имеется доступ практически к любому котельному оборудованию, производимому в мире, но по цене и экономическим показателям оно неприемлемо для значительной части потребителей. Производители оборудования заинтересованы в сбыте полных комплектов стандартного оборудования высокой стоимости. Это входит в противоречие с практическими потребностями перевода существующих котлов на использование биомассы. Из-за высокой стоимости полных комплектов котлов для сжигания биомассы и ограниченности финансовых возможностей потребителей, несмотря на экономическую привлекательность, использование биомассы как топлива в Украине отстает от реальной потребности и ресурсных возможностей [1].

Анализ опыта Австрии показал, что в котельных установках систем теплоснабжения мощностью от 100 до 1000 кВт, как правило, используют товарные биотоплива – топливную щепу и гранулы. Отходы деревопереработки в качестве топлива используют преимущественно в универсальных котлах мощностью свыше 1 МВт. В бытовых котлах мощностью до 100 кВт в основном используют дрова и гранулы [2].

Универсальное энергетическое оборудование для сжигания дешевых топлив с ненормированными свойствами (древесных отходов) отличается повышенной стоимостью, что в ряде случаев может приводить к экономической нецелесообразности его применения или длительным срокам окупаемости, в особенности в коммунальной энергетике при дотационном тарифе на природный газ. Если ориентироваться на использование товарных биотоплив с нормированными техническими показателями (топливной щепы, гранул), то можно разрабатывать специализированное энергетическое оборудование, которое благодаря стабильности показателей топлива может быть упрощено и удешевлено по сравнению с универсальным.

В Украине перспективным топливом для существующих твердоотопливных отопительных котлов в быту и социальной сфере могут стать гранулированные топлива – пеллеты древесные, соломенные, а также из лузги подсолнечника. В Украине освоено

производство пеллет преимущественно диаметром 6 мм, хотя имеются и производства 8-мм гранул. Такое топливо весьма перспективно для использования в малых котлах теплопроизводительностью до 100 кВт.

Сжигание традиционных ископаемых топлив даже в котлах небольшой мощности осуществляют с высоким значением теплового напряжения топочно-го объема – для каменного угля до 350 кВт/м³, природного газа до 350-420 кВт/м³ [3]. Применимое в малых котлах слоевое сжигание древесного топлива осуществляют с тепловыми напряжениями топочно-го объема на уровне 125-180 кВт/м³ [4]. В связи с этим при переводе существующих котлов с угля или газа на сжигание древесного топлива происходит снижение их теплопроизводительности до 50% [5]. Для сохранения паспортной теплопроизводительности крупных котлов увеличивают объем их топки, что связано со значительным объемом работ и затратами, а применительно к цельнометаллическим отопительным котлам этот путь неприемлем.

Представляет практический интерес создание топочных устройств для сжигания пеллет с интенсивностью горения, сопоставимой с интенсивностью сжигания угля или природного газа, что позволит осуществлять перевод имеющихся отопительных котлов на более доступное топливо без снижения теплопроизводительности. Для создания высокоинтенсивных топочных устройств необходимо исследовать возможности интенсификации всех стадий горения твердого топлива с целью выбора оптимальных условий.

Постановка задачи

Известно, что сгорание древесной частицы начинается с подготовительного этапа, в течение которого происходит прогрев, подсушка и термолиз, состоящий в разложении вещества древесины на более простые соединения с выделением газо- и парообразных летучих веществ. Вторым этапом горения является образование смеси выделившихся летучих веществ с воздухом и ее выгорание. Завершение горения состоит в выгорании коксового остатка, образовавшегося после выхода летучих веществ.



Исследование особенностей отдельных стадий горения частицы топлива позволяет определить влияние на их протекание температурных и концентрационных условий с целью выбора оптимальных для интенсификации всего процесса. В данной статье рассматриваются особенности протекания термического разложения (термолиза) древесной гранулы (пеллеты) с выделением летучих веществ в условиях, приближенных к условиям в топочном пространстве котла или теплогенератора. В статье термин «пиролиз» не используется, поскольку рассматриваемый процесс термического разложения древесины может протекать как в инертной, так и в окислительной среде.

Как известно, протекание термолиза частиц топлива с выделением паро- и газообразных горючих веществ определяет условия зажигания топлива. Обеспечение стабильного зажигания топлива состоит в согласовании скорости выделения летучих веществ и расхода воздуха в зоне их горения. Для организации горения необходимо знать и продолжительность термического разложения топлива, что позволит определить необходимый объем слоя в зоне подготовки и обоснованно принять его геометрические характеристики.

Термическое разложение древесины исследовано и описано во многих работах, посвященных горению топлив, а также обугливаю и сгоранию деревянных конструкций при пожарах. В соответствии с современными представлениями процесс термолиза топлива состоит в разрыве физико-химических связей составляющих топлива с последующим образованием конечных продуктов распада. Считается, что каждая группа связей при определенных условиях разрывается с постоянной для нее скоростью. Для каждой группы связей экспериментальным путем устанавливают значения, дающие количественную характеристику выделения продуктов термолиза, и показатели, характеризующие кинетику их выхода. При рассмотрении одновременного разрыва химических связей нескольких групп суммарное выделение продуктов термолиза описывается интегральным уравнением [6]

$$C = \sum_{n=1}^n C_{0n} (1 - e^{-k_n \tau}), \quad (1)$$

где C – массовая доля летучих веществ, выделившихся от начала термолиза до момента времени τ ; n – количество групп реакций, которые учитываются при описании процесса термолиза; C_{0n} – доля продуктов термолиза, которые выделяются при разложении связей n -группы, в их общем количестве, при этом $C_{01} + C_{02} + \dots + C_{0n} = 1$; k – константа скорости реакции разрыва связей данной группы, которая зависит от температуры процесса пиролиза.

Константа скорости реакции определяется по зависимости

$$k_n = k_{0n} e^{-E/(RT)}, \quad (2)$$

где k_{0n} – предэкспоненциальный множитель константы скорости n -й группы реакций; E – энергия акти-

вации разрыва связей данной группы; R – универсальная газовая постоянная.

Считается, что для практических расчетов достаточно учитывать одну или две группы связей, а экспериментально определенные значения C_{0n} , k_{0n} и E для некоторых видов топлива приведены в литературе [6]. Из приведенных уравнений видно, что реакция термолиза сильно зависит от температуры, при которой происходит разложение топлива.

Для оценки продолжительности выхода летучих из древесной гранулы приняты имеющиеся в литературе кинетические параметры для медленного нагрева крупных частиц массой 0,5 г со скоростью до 2 °C/c [6]. Результаты расчета по однокомпонентной модели, учитывающей разрыв одной группы связей, которые приведены на рис. 1, показывают, что даже при высоких температурах выделение летучих происходит за длительный период времени. При температуре 800 °C часть летучих, составляющих 80% от их квазистатического выхода, выделяется за 110 секунд, а для их полного выхода требуется до 360 секунд.

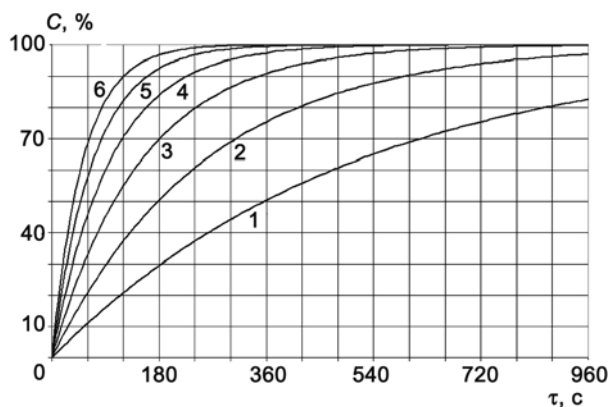


Рис. 1. Расчетный выход летучих веществ из частицы древесины массой 0,5 г при скорости нагрева 2 °C/c и температурах процесса: 1 – 400 °C; 2 – 500 °C; 3 – 600 °C; 4 – 700 °C; 5 – 800 °C; 6 – 900 °C

Fig. 1. Calculated release of volatiles from 0.5 g wood particle at heating rate 2 °C/s and process temperatures: 1 – 400 °C; 2 – 500 °C; 3 – 600 °C; 4 – 700 °C; 5 – 800 °C; 6 – 900 °C

При решении практических задач за продолжительность периода выделения летучих можно принять период, за который выделяется основная часть летучих, например 80% от их квазистатического выхода. Тогда для рассмотренных условий будет учитываться период максимальной скорости разложения древесины в пределах почти линейного выхода летучих во времени. Полученная таким образом расчетная зависимость продолжительности выхода 80% летучих от температуры для термолиза древесной частицы приведена на рис. 2 и имеет экспоненциальный характер. Можно отметить, что с увеличением температуры от 400 до 900 °C, расчетная продолжительность выхода 80% летучих уменьшается с 830 до 85 секунд, т. е. почти в 10 раз.

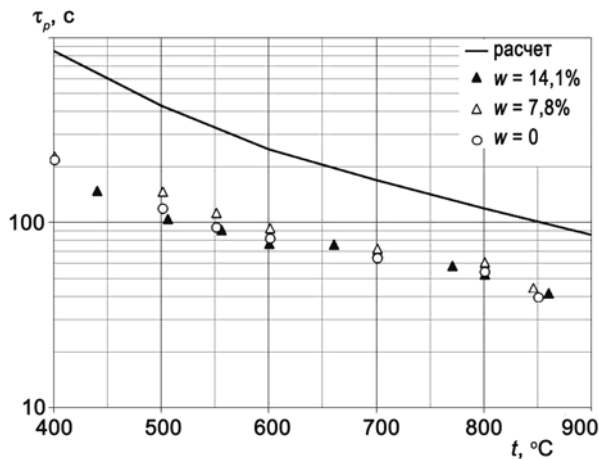


Рис. 2. Продолжительность периода выхода летучих при термоллизе древесных гранул массой 0,5 г в зависимости от температуры: линия – выход 80% летучих в инертной атмосфере, расчет по однокомпонентной модели; точки – полный выход летучих из древесных гранул с различным содержанием влаги в окислительной атмосфере, экспериментальные данные

Fig. 2. Time of volatiles release from 0.5 g wood pellets depending on temperature: line – release of 80% of volatiles in inert atmosphere, calculation based on one-component model; points – complete volatiles release from pellets with different moisture content, experimental data

В литературе отмечается, что расчеты термического разложения топлива дают результаты скорее качественные, указывая на порядок величин и тенденции их изменения, и поэтому данные, полученные расчетно-аналитическим методом, необходимо проверять экспериментально. Отметим, что приведенное выше кинетическое уравнение выхода летучих при термоллизе древесины получено на основе

опытов в условиях инертной атмосферы, т.е. для условий пиролиза, и при медленном нагреве.

На практике при организации сжигания топлива его частицы поступают на слой горящего топлива, что обуславливает их быстрый нагрев, и процесс термоллиза проходит в окислительной атмосфере, создаваемой подачей дутьевого воздуха. При прогреве частицы за счет подвода энергии от окружающей частицу топочной среды выделяются летучие вещества, которые химически взаимодействуют с окислителем, обуславливая выделение тепловой энергии в окрестности частицы и создавая местные температурные условия, отличные от первоначальных и условий на удалении от частицы. При благоприятных условиях химическое взаимодействие летучих с окислителем переходит в горение с формированием пламени. Наблюдения показали, что в реальных топочных устройствах в окислительной среде полное выгорание частиц зачастую происходит быстрее, нежели продолжительность термоллиза, рассчитанная по известным зависимостям. В данной работе экспериментально исследована продолжительность термоллиза частиц древесных гранул в воздушной окислительной среде и их быстром нагреве при внесении в разогретое топочное пространство.

Методика проведения экспериментов

Для экспериментального определения продолжительности выделения летучих веществ использовались гранулы (пеллеты), изготовленные из сосновой древесины. Основные характеристики гранул, которые приведены в табл. 1, определяли в соответствии с известными методиками [7-9].

Характеристика исследуемых древесных гранул (пеллет)

Таблица 1

Main characteristics of wood pellets used for experiments

Table 1

Диаметр гранул, d , мм	Длина гранул, l , мм	Содержание влаги (общая влага), W_{ar} , % мас.	Зольность на сухую массу, A_d , % мас.	Плотность гранул при рабочей влажности, c_{ar} , кг/м ³	Плотность сухих гранул, c_d , кг/м ³
6,0	4...37	7,8	0,39	1278	1184

Из полученной партии топлива методом квартования выделили навеску массой 0,2 кг и произвели сортировку по длине частиц, полученное распределение гранул по длине приведено в табл. 2. Согласно требованиями стандарта [10] для гранул диаметром 6 мм длина частиц должна быть от 3,15 до 40 мм. Из приведенных данных видно, что в реальном топливе содержание длинных частиц незначительно и топливо преимущественно состоит из гранул длиной от 10 до 30 мм. Средняя масса одной частицы в диапазоне длин от 10 до 30 мм составляет 0,55 г, в сухом состоянии масса такой частицы составляет 0,48-0,52 г.

Для дальнейших исследований влияния температуры на продолжительность периода выхода летучих принимаем частицы массой во влажном состоянии 0,54-0,56 г.

Для проведения опытов использовали частицы в виде правильных цилиндров длиной около 14 мм, вырезанные из бездефектных гранул, которые имеют массу в сухом состоянии $0,5 \pm 0,02$ г. Опыты проводили с использованием сухих частиц, а также частиц с содержанием общей влаги 7,8% и 14,1%. Следует отметить, что согласно требованиям стандарта EN 14961-2 предельно допустимое содержание общей

влаги для древесных гранул (пеллет) составляет 10%, т.е. исследования проведены при значениях влажности, перекрывающих возможный диапазон.

Таблица 2
Распределение по длине древесных гранул,
использованных в экспериментах

Table 2
Length distribution of wood pellets
used for experiments

Фракции гранул длиной, мм	Содержание фракции, % мас.	Средняя масса одной частицы, г
< 1	0,1	
1...10	32,1	
10...20	53,7	0,51
20...30	12,7	0,76
> 30	1,4	1,13

Древесную гранулу укладывали горизонтально на изготовленный из жаростойкой проволоки штатив с площадкой из сетки с ячейкой 1 мм. Штатив с гранулой помещали в муфельную печь, равномерно разогретую до заданной температуры (400-860 °С), при открытом доступе воздуха. Видимую продолжительность выделения летучих отсчитывали от посадки штатива с гранулой в печь до момента прекращения интенсивного пламенного горения летучих вокруг частицы и перехода к беспламенному догоранию углеродного остатка. При низких температурах печи (400-500 °С) воспламенение летучих не происходило, поэтому время их выделения отсчитывали до прекращения дымления, видимого в освещенном пространстве печи.

По стандартной методике выход летучих веществ определяют путем нагрева аналитической пробы топлива в закрытом тигле в течение 7 минут [11]. Возникает вопрос – насколько полно выделяются летучие при термоллизе целой древесной гранулы в окислительной атмосфере печи в ходе описанного эксперимента. После выхода летучих и прекращения их пламенного горения штатив с раскаленным коксозольным остатком от 4 гранул взвешивали с погрешностью $\pm 0,01$ г. Разность массы сухих частиц и коксозольного остатка принимали за массу выделившихся летучих. Выход летучих v_{daf} рассчитывали как отношение массы выделившихся летучих к массе сухого беззольного вещества гранул. Установлено, что при термоллизе гранул в окислительной атмосфере печи выход летучих составлял $v_{daf} = 0,822$, а по литературным данным, для сосновой древесины $v_{daf} = 0,818$ [12] и $v_{daf} = 0,85$ [3]. Весьма незначительное расхождение свидетельствует о том, что в ходе экспериментов за наблюдаемый период выхода летучих происходит практически полное их выделение.

Полученные результаты

Полученные экспериментальные данные о продолжительности периода выделения летучих представлены на рис. 2. В целом можно отметить, что полученные данные демонстрируют экспоненциальную зависимость изменения продолжительности выхода летучих при изменении температуры. Определенные экспериментально значения продолжительности периода выхода летучих в окислительной атмосфере в 2-4 раза меньше, чем расчетные значения для условий инертной атмосферы. Для сухих древесных гранул при увеличении температуры от 400 до 850 °С экспериментально определенная продолжительность выхода летучих уменьшается с 220 до 40 с, т.е. только в 5,5 раза, а не в 10 раз, как по расчету для условий инертной атмосферы.

Опираясь на полученные данные, можно обосновано выбирать температурные условия и продолжительность термолиза древесных гранул в соответствующей зоне топочных устройств. Учитывая экспоненциальный характер зависимости продолжительности периода выхода летучих от температуры, для сжигания древесных гранул можно считать приемлемыми температуры в зоне термолиза около 700 °С, при этом продолжительность выхода летучих составляет $\tau_p = 65-70$ с. Принятую продолжительность выхода летучих можно рассматривать как необходимое время пребывания частицы в зоне подготовки и термического разложения.

Данные, полученные в описанных выше экспериментах, не позволяют однозначно судить о влиянии влажности гранул на продолжительность периода выхода летучих, что можно объяснить существенным влиянием различия внутренней структуры (трещин, включений частиц разной плотности) исследованных гранул длиной 14 мм.

При сжигании слоя реального топлива продолжительность периода выделения летучих будет определяться разложением длинных частиц, поэтому представляет интерес возможное влияние длины гранулы на продолжительность ее термолиза. Для проведения исследований использовали гранулы, высушенные в сушильном шкафу при 105 °С до постоянного веса ($W = 0\%$), а также гранулы, отсыревшие в эксикаторе над поверхностью воды до содержания влаги $W = 10,1\%$. Из бездефектных гранул подготовили цилиндрики правильной формы длиной от 1,5 до 36,6 мм (гранул большей длины в упаковке не оказалось). Определение продолжительности периода выхода летучих производили при температуре печи 700 °С. Полученные результаты, приведенные на рис. 3, показывают, что аппроксимирующие кривые продолжительности периода выхода летучих от длины гранулы по характеру близки к гиперболическому тангенсу. Для сухих гранул максимальная продолжительность периода выхода летучих достигает 70 с, а для гранул с содержанием влаги $W = 10,1\%$ – 84 с при длине гранул около 30 мм. С увеличением длины



гранул свыше 30 мм продолжительность периода выхода летучих остается практически постоянной. Если для коротких гранул, $l < 10$ мм, влияние влажности не является отчетливым, то для более длинных гранул, $l > 15$ мм, видно, что продолжительность периода выхода летучих для древесных гранул с содержанием влаги $W = 10,1\%$ увеличивается на 20% по сравнению с сухими гранулами.

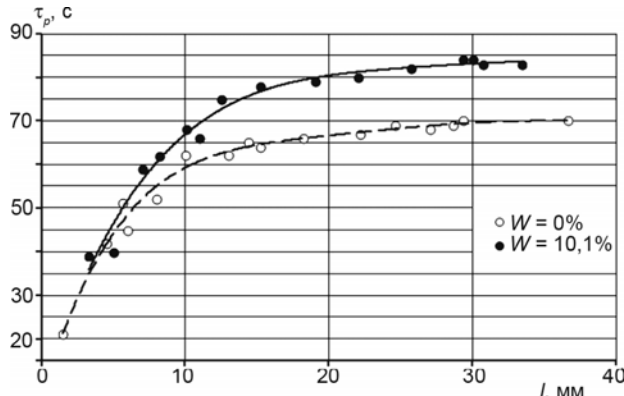


Рис. 3. Зависимость продолжительность выхода летучих τ_p из сухих ($W = 0\%$) и влажных ($W = 10,1\%$) древесных гранул в зависимости от длины гранулы l

Fig. 3. Time of volatiles release τ_p from dry ($W = 0\%$) and wet ($W = 10,1\%$) wood pellets depending on their length l

Из данных, приведенных на рис. 3, также можно отметить, что продолжительность периода выхода летучих для гранул длиной 14 мм составляет 90-92% от максимально возможного значения этого показателя для более длинных гранул. Можно заключить, что результаты описанных выше исследований зависимости продолжительности периода выхода летучих от температуры, проведенные с использованием гранул длиной 14 мм, с некоторым приближением можно применить к гранулам большей длины.

Выводы

1. Экспериментально определенная продолжительность периода выхода летучих из древесных гранул в окислительной атмосфере в 2-4 раза меньше, чем расчетное значение для условий инертной атмосферы. Зависимость продолжительности периода выхода летучих от температуры имеет экспоненциальный характер.

2. Установлено, что продолжительность периода выхода летучих возрастает при увеличении длины гранул до 30 мм, а при дальнейшем увеличении длины остается постоянной. Зависимость продолжительности периода выхода летучих от длины гранул по характеру близка к гиперболическому тангенсу.

3. Экспериментально установлено, что продолжительность периода выхода летучих для древесных гранул с содержанием влаги $W = 10,1\%$ больше на 20%, чем для сухих гранул.

Список литературы

1. Гелетуха Г.Г., Железна Т.А., Жовмир М.М., Матвеев Ю.Б., Дроздова О.І. Оцінка енергетичного потенціалу біомаси в Україні. Частина 1. Відходи сільськогосподарства та деревна біомаса // Промышленная теплотехника. 2010. Т. 32, № 6. С. 58-65.
2. Voglauer B., Rathbauer J. Austrian Biomass boiler Manufacturers. Survey. Austrian Bioenergy Centre GmbH, 2005.
3. Тепловой расчет котельных агрегатов (Нормативный метод) / Под ред. Н.В. Кузнецова. М.: Энергия, 1973.
4. Татищев С.В. Топочные устройства промышленных котельных. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1956.
5. Зубенко В.И., Радченко С.В., Чаплыгин С.М., Жовмир Н.М. Технические возможности перевода малых котлов на сжигание биомассы. «Проблемы промышленной теплотехники»: Тезисы докладов VII международной конференции 23-27 мая 2011 г. / Институт технической теплофизики НАНУ // Промышленная теплотехника. 2011. Т. 33, № 7. С. 114.

References

1. Geletuha G.G., Železna T.A., Žovmir M.M., Matveev Ū.B., Drozdova O.I. Ocinka energetičnogo potencialu biomasi v Ukraїni. Častina 1. Vidhodi sil'skogo gospodarstva ta derevna biomasa // Promyšlen-naâ teplotehnika. 2010. T. 32, № 6. S. 58-65.
2. Voglauer B., Rathbauer J. Austrian Biomass boiler Manufacturers. Survey. Austrian Bioenergy Centre GmbH, 2005.
3. Teplovoj rasčet kotel'nyh agregatov (Normativnyj metod) / Pod red. N.V. Kuznecova. M.: Ènergiâ, 1973.
4. Tatišev S.V. Topočne ustrojstva promyšlenykh kotel'nyh. M.-L.: Gosènergoizdat, 1956.
5. Zubenko V.I., Radčenko S.V., Čaplygin S.M., Žovmir N.M. Tehničeskie vozmožnosti perevoda malyh kotlov na sžiganie biomassy. «Problemy promyšlennoj teplotehniki»: Tezisy dokladov VII meždunarodnoj konferencii 23-27 maâ 2011 g. / Institut tehničeskoj teplofiziki NANU // Promyšlen-naâ teplotehnika. 2011. T. 33, № 7. S. 114.

6. Основы практической теории горения. Учебное пособие / Под ред. В.В. Померанцева. Л.: Энергия, 1973.

7. Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту вологи висушуванням у сушильній шафі. Частина 1. Стандартний метод визначання загальної вологи: ДСТУ-П СТН/ТС 14774-1:2012. К.: Мінекономрозвитку України, 2013.

8. Біопаливо тверде. Метод визначання вмісту золи: ДСТУ-П СЕН/ТС 14775:2012. К.: Мінекономрозвитку України, 2013.

9. Біопаливо тверде. Методи визначання щільності часток: ДСТУ-П СТН/ТС 15150:2012. К.: Мінекономрозвитку України, 2013.

10. Биотопливо твердое. Технические характеристики и классы топлива. Часть 1. Общие требования: ГОСТ Р 54220-2010 (EN 14961-1:2010). Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. М.: Стандартинформ, 2012.

11. Біопаливо тверде. Методи визначання вмісту легких речовин: ДСТУ EN 15148:2012. К.: Мінекономрозвитку України, 2013.

12. Древесина для производства энергии. Технология – окружающая среда – экономика / редактор Helle Serup / Центр технологий биомассы.. Energistyrelsen Miljo-og Energiministeriet, 1999. www.ens.dk.

6. Osnovy praktičeskoj teorii gorenija. Učebnoe posobie / Pod red. V.V. Pomeranceva. L.: Ènergiâ, 1973.

7. Biopalivo tvrde. Metodi viznačannâ vmistu vologi visušovannâm u sušil'nij šafi. Častina 1. Standartnij metod viznačannâ zagal'noi vologi: DSTU-P CTN/TS 14774-1:2012. K.: Minekonomrozvitku Ukraïni, 2013.

8. Biopalivo tvrde. Metod viznačannâ vmistu zoli: DSTU-P CEN/TS 14775:2012. K.: Minekonomrozvitku Ukraïni, 2013.

9. Biopalivo tvrde. Metodi viznačannâ šil'nosti častok: DSTU-P CTN/TS 15150:2012. K.: Minekonomrozvitku Ukraïni, 2013.

10. Biotoplivo tvrdoe. Tehničeskie karakteristiki i klassy topliva. Čast' 1. Obšie trebovaniâ: GOST R 54220-2010 (EN 14961-1:2010). Federal'noe agentstvo po tehničeskomu regulirovaniû i metrologii. M.: Standartinform, 2012.

11. Biopalivo tvrde. Metodi viznačannâ vmistu letkih rečovin: DSTU EN 15148:2012. K.: Minekonomrozvitku Ukraïni, 2013.

12. Drevesina dlâ proizvodstva ènergii. Tehnologiâ – okružaušââ sreda – èkonomika / redaktor Helle Serup / Centr tehnologij biomassy.. Energistyrelsen Miljo-og Energiministeriet, 1999. www.ens.dk.

Транслитерация по ISO 9:1995

