

УДК 697.325

Экспериментальные исследования сжигания биотоплива в кипящем слое

А. Ф. Редько¹, И. А. Редько², Ю. А. Пивненко³

¹д.т.н., проф. Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, г. Харьков, Украина, redko.af@gmail.com, ORCID 0000-0002-9375-1262

²к.т.н., доц. Харьковский национальный университет городского хозяйства им. А. Н. Бекетова, г. Харьков, Украина, germes_s2006@ukr.net, 0000-0002-9863-4487

³инженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВИС», г. Вишневое, Украина, pivnenko.yura@gmail.com, ORCID 0000-0002-6675-2649

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований показателей потерь теплоты от механического недожога различных видов древесного топлива в топках кипящего слоя. Показано влияние температуры слоя и коэффициента избытка воздуха на величину механического недожога, установлено значительное повышение содержания горючих компонентов в уносе при температуре слоя ниже 750 °С, полнота сгорания топлива возрастает при температуре кипящего слоя выше 800 °С. Определены оптимальные значения коэффициента избытка воздуха (1,4...1,6), обеспечивающие минимальный унос топлива из объема топки котла, а также значения числа псевдоожижения для различных режимов работы топки. Приведены результаты определения скорости выгорания древесных отходов (щепа, опилки) и гранулированного древесного топлива (пеллеты) в режиме отсутствия теплосъема. Отмечено, что выгорание гранулированного топлива более продолжительно чем скорость горения неподготовленных древесных отходов. При этом потери теплоты от механической неполноты сгорания для подобного топлива ниже, поскольку прессованное топливо имеет большую плотность и меньшую пористость по сравнению с опилками и щепой.

Ключевые слова: кипящий слой, топка, древесные отходы, механический недожог, потери теплоты, коэффициент избытка воздуха.

Введение. Сжигание твердых топлив в кипящем слое как правило сопровождается уносом из объема топки горючих частиц и золы. Потери теплоты с механическим недожогом традиционно разделяются на потери от недожога частиц топлива, находящихся в слое и от недожога горючих в уносе. Обычно в первом случае потери невелики, практически равны нулю. Благодаря активному движению топлива в кипящем слое полнота сгорания выше по сравнению с другими способами сжигания.

В котлах с топками кипящего слоя содержание горючих в уносе удаётся минимизировать благодаря оптимизации режимных параметров сжигания. При сжигании топлив с низким выходом летучих значения потерь теплоты с механическим недожогом выше чем при сжигании топлив растительного происхождения с выходом летучих до 85%. Однако и для древесного топлива без определения оптимальных режимных параметров возможно существенное снижение эффективности сжигания топлива.

Актуальность исследования. Все большую популярность в мире приобретают топлива растительного происхождения [1, 2], такие как отходы лесоперерабатывающей и деревообрабатывающей промышленности, а также сельскохозяйственной промышленности.

Эффективным методом утилизации растительных отходов является их сжигание в кипящем слое. Данный метод считается одним из наиболее предпочтительных, поскольку топки кипящего слоя менее требовательны к качеству топлива и лучше приспособлены к его ступенчатому сжиганию, необходимому для снижения выбросов оксидов азота.

Главной проблемой, с которой приходится сталкиваться при сжигании древесного топлива в кипящем слое, является отсутствие рекомендаций по организации процессов горения. Необходимо определение режимных параметров, которые обеспечат стабильное горение, ожижение топлива и минимизируют шлакование топки при максимальных показателях эффективности сжигания. На практике данные проблемы, как правило, приходится решать при пуско-наладке котельных установок [3, 4]. Неоднородный фракционный состав и переменная влажность топлива только усложняют процесс сжигания.

Основные исследования по определению потерь теплоты от механического недожога с уносом в топках кипящего слоя проводились для угольного топлива [5, 6].

В работе [7] достаточно подробно освещены проблемы сжигания биотоплива в кипящем слое и механизмы их решения. Однако, отсутствуют

рекомендации по оптимальным режимным параметрам сжигания таких топлив. В свою очередь в работе [8] приведены теоретические исследования котлов на биомассе методом эксергетического анализа

Авторы в работе [9] проводят анализ и оценку перспектив использования топлив растительного происхождения в энергетике. Отмечается возможность существенного снижения выбросов NO_x и CO_2 .

Работа [10] посвящена изучению явления агломерации шлака в топках котлов при сжигании древесного топлива и методам её предотвращения.

В [11] исследовалось совместное сжигание сельскохозяйственных отходов и древесины. Оценивался риск возникновения высокотемпературной коррозии и методы её предотвращения. Предложена концепция сжигания биотоплива в кипящем слое с температурой ниже 750°C .

Работа [12] посвящена исследованиям конструктивных особенностей топок кипящего слоя для сжигания биотоплива. Отмечено, что оптимальным конструктивным решением является выполнение топки конусообразной формы.

В работе [13] проводились эксперименты на установке тепловой мощностью 0,2 МВт. Исследовались методы повышения эффективности сжигания крупных частиц топлива и интенсификации теплообмена.

Математическая модель сжигания биомассы рассмотрена в [14]. Приведены результаты расчётов и экспериментальных исследований когенерационной установки на биомассе. Проведена оптимизация параметров установки.

Также перспективным методом внедрения биотоплива в энергетику является совместное сжигание биомассы и угля [15].

Математическая модель определения механического недожога при сжигании биомассы в кипящем слое представлена в [16]. Однако, недостаточно исследовано влияние режимных параметров на величину уноса.

Приведённый выше анализ свидетельствует о перспективности данного направления исследований и определяет недостаточный объём данных о механизме уноса несгоревшего древесного топлива.

Основная часть. Эксперименты по определению потерь теплоты от механического недожога проводились в лабораторной установке (рис. 1, 2), которая представляет собой камеру 1 размерами 200×300 мм, высотой 1000 мм. Она оснащена системой автоматической подачи топлива 2. Воздух нагнетается вентилятором ВВД-5 3. Предусмотрена воздухораспределительная колпачковая решётка 4 (рис. 3). Калориметр 5 представляет собой трубу диаметром 18 мм. Для улавливания твёрдых частиц предусмотрена двухступенчатая система очистки газов в пылеосадительной камере 6 и тканевом фильтре 7.

Для наблюдения за процессом горения предусмотрены два смотровых кварцевых стекла, установленных в нижней и верхней зоне кипящего слоя. Температура слоя измерялась термопарой типа ТХА. Пробы уноса из пылеосадительной камеры и тканевого фильтра отбирались после каждого цикла сжигания и взвешивались. Массовое содержание горючих в уносе $\Gamma_{\text{ун}}$, %, определялось путём выжигания отобранных проб в муфельной печи.

Потери теплоты от механической неполноты сгорания определялись следующим образом:

$$q_4 = \left(\alpha_{\text{нел}} \frac{\Gamma_{\text{нел}}}{100 - \Gamma_{\text{нел}}} + \alpha_{\text{ун}} \frac{\Gamma_{\text{ун}}}{100 - \Gamma_{\text{ун}}} \right) 32660 A^p / Q_p^p, \quad (1)$$

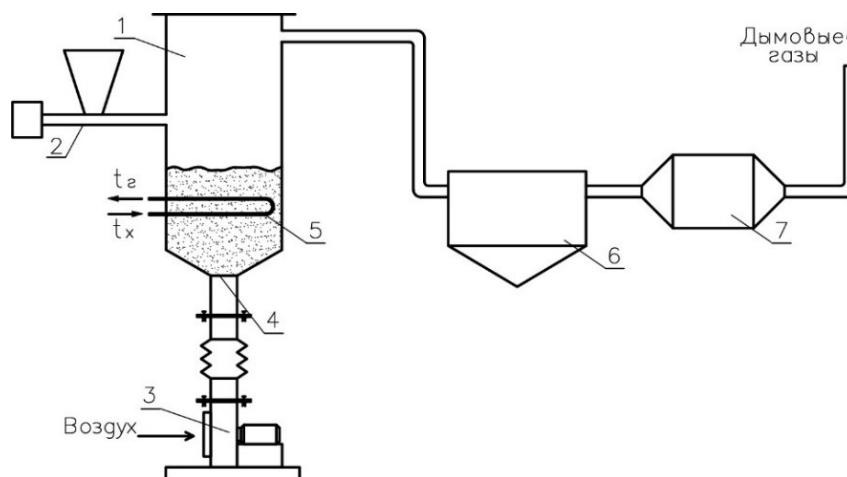


Рис. 1. Схема экспериментальной установки по исследованию сжигания древесных отходов в кипящем слое



Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки



Рис. 3. Колпачковая решётка

где $\Gamma_{шл}$, $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в шлаке и уносе соответственно, %; $\alpha_{шл}$, $\alpha_{ун}$ – доля золы в шлаке и уносе соответственно; A^p – зольность на рабочую массу топлива; Q_p^p – явная теплота на 1 кг подсушенного топлива, кДж/кг. Для топок кипящего слоя можно принимать $\alpha_{ун} \approx 1$. Тогда

$$q_4 = \frac{\Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} \cdot 32660 A^p / Q_p^p. \quad (2)$$

Вследствие небольших размеров экспериментальной установки унос частиц из объёма топki больше, чем в реальных котельных установках. Во время экспериментов наибольшее влияние на величину механического недожога оказывали размеры фракций топлива и коэффициент избытка воздуха. Также замечено увеличение механического недожога при невысокой температуре слоя (600...750 °C). Это обусловлено тем, что в данном диапазоне температуры наблюдается неполное выгорание топлива.

Во время розжига скорость воздуха ожижения слоя была меньше первой критической скорости, то есть число псевдоожижения W принималось меньше единицы (0,6...0,8). Для обеспе-

чения необходимого количества воздуха на горение подавался вторичный и третичный воздух. Увеличение числа псевдоожижения до $W = 1...1,2$ приводило к уносу мелких фракций из камеры сгорания.

Влажность топлива негативно влияла на процесс горения. Слишком влажное топливо (относительная влажность 30...60 %) медленно разгоралась. Достижения оптимальной температуры горения (800...850 °C) усложнялось.

Характеристики материалов кипящего слоя приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики материалов слоя		
Тип материала	Плотность, кг/м ³	Средний эквивалентный диаметр частиц, мм
Песок	2600	0,3
Опилки	400	3
Щепа	600	4,7
Гранулы	1200	5,51

Ниже приведены результаты экспериментов по определению потерь теплоты вследствие механического недожога (табл. 2, рис. 4).

Как видно из графика, увеличение коэффициента избытка воздуха свыше 1,6 приводит к увеличению механического недожога. При малых значениях коэффициента избытка воздуха наблюдается существенный недожог. Наибольшая полнота сгорания достигается при $\alpha_6 = 1,4...1,6$.

Следует отметить, что число псевдоожижения для мелкофракционного топлива (опилки) не должно превышать 2,2...2,4, а для более крупного (щепа, гранулы) – 3...3,4. При больших значениях наблюдается существенный унос материала из объёма топki.

Эксперименты проводились при различных режимах подачи вторичного и третичного воздуха. Однако, изменение расхода первичного/вторичного/третичного воздуха не оказывало существенного влияния на результаты. Отсутствие подачи третичного воздуха также практически не влияло на механический недожог.

При температуре ниже 750 °C потери теплоты от механического недожога значительно возрастали (рис. 5). Мелкие фракции не успевали выгорать в объёме топki и уносились с дымовыми газами, осажаясь в пылеуловителях. Это явилось главной причиной столь большого недожога. Такое объяснение подтверждается тем, что размеры фракций в уносе составляли в основном 0,1...1 мм. При высокой температуре (800...920 °C) мелкие частицы топлива выгорают в надслоевом пространстве.

Таблиця 2

Результаты определения механического недожога

Коэффициент избытка воздуха, α_v	Древесные опилки		Щепа		Гранулы	
	$\Gamma_{yn}, \%$	$q_4, \%$	$\Gamma_{yn}, \%$	$q_4, \%$	$\Gamma_{yn}, \%$	$q_4, \%$
0,6	57,18	1,60	46,30	1,03	28,96	0,49
0,7	50,04	1,20	39,02	0,77	27,96	0,47
0,8	41,21	0,84	25,03	0,40	13,44	0,19
0,9	31,85	0,56	25,03	0,40	11,20	0,15
1,0	25,03	0,40	19,12	0,28	10,89	0,15
1,1	23,10	0,36	18,20	0,27	10,43	0,14
1,2	18,94	0,28	15,51	0,22	5,50	0,07
1,3	18,94	0,28	12,21	0,17	3,74	0,05
1,4	16,69	0,24	11,78	0,16	2,83	0,03
1,5	14,30	0,20	7,70	0,10	3,01	0,04
1,6	14,30	0,20	7,70	0,10	2,28	0,03
1,7	15,51	0,22	10,01	0,13	3,38	0,04
1,8	17,15	0,25	10,24	0,14	3,38	0,04
1,9	19,16	0,28	12,85	0,18	3,56	0,04
2,0	21,08	0,32	13,06	0,18	3,92	0,05

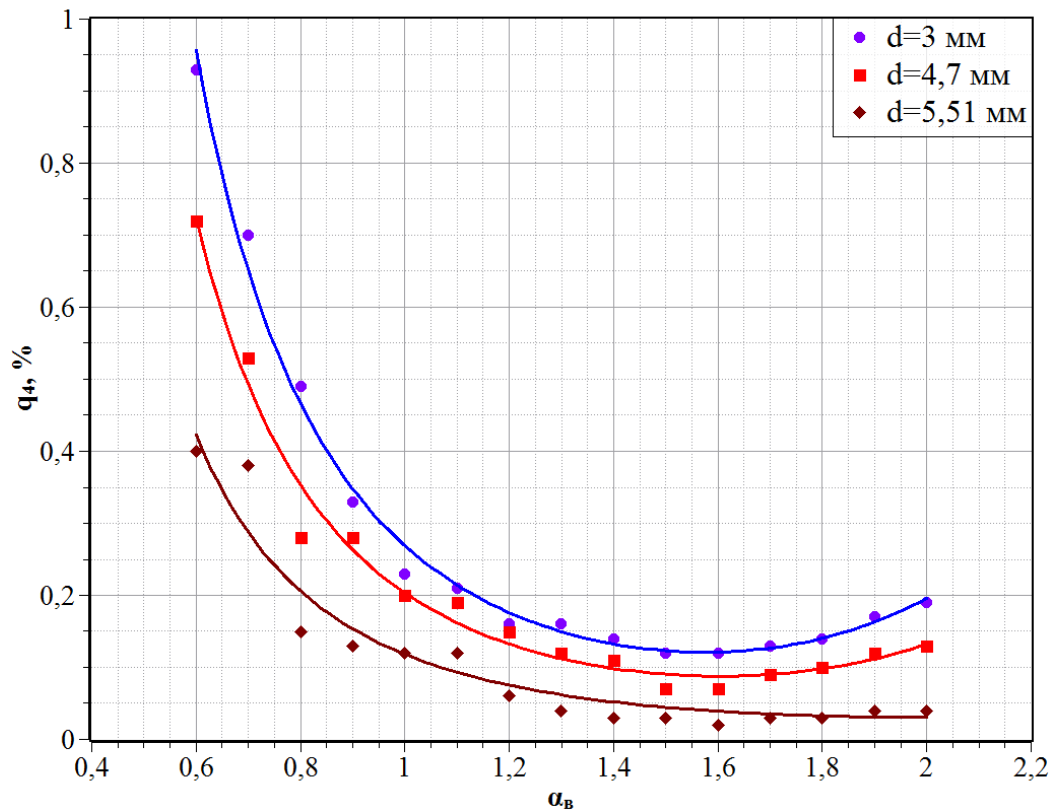


Рис. 4. Зависимость потерь теплоты из-за механического недожога от коэффициента избытка воздуха

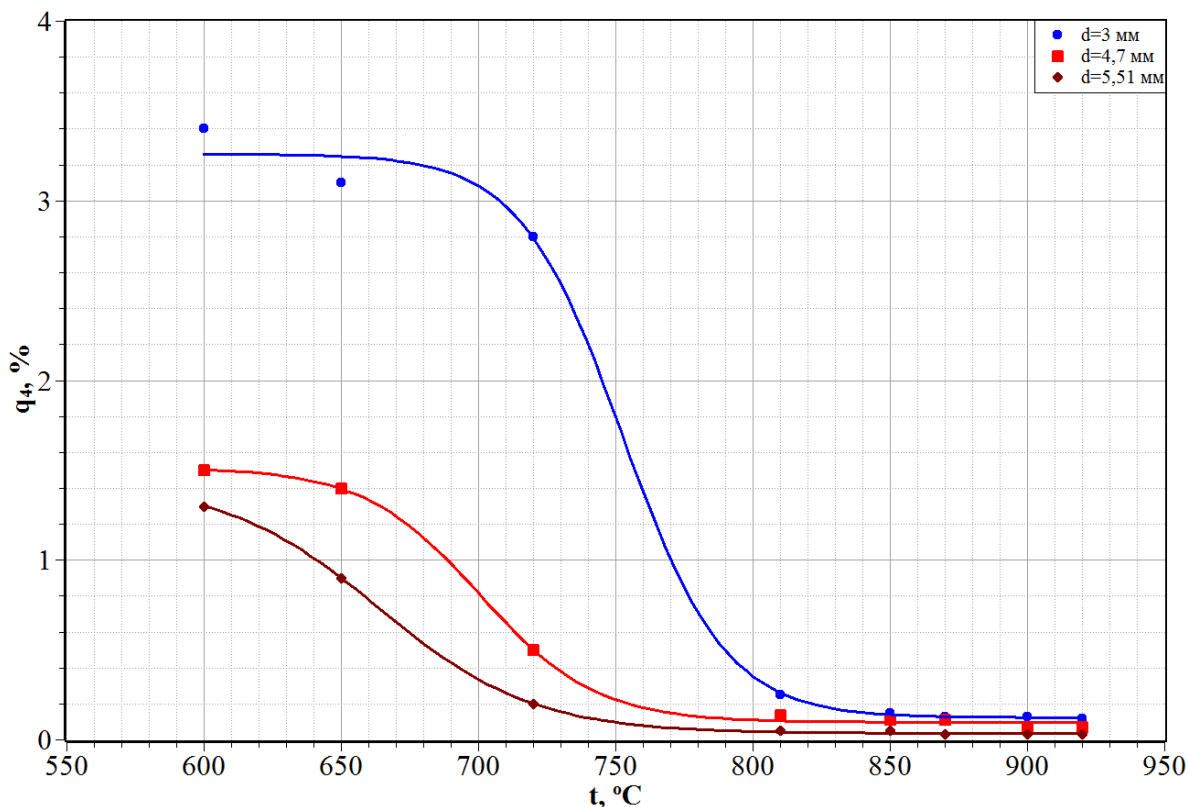


Рис. 5. Залежність втрат теплоти из-за механического недожога от температуры слоя

Регулирование температуры кипящего слоя осуществлялось за счёт изменения расхода теплоносителя в калориметре. По результатам экспериментов построен график зависимости потерь теплоты из-за механического недожога (рис. 5) от температуры при $\alpha_s = 1,4 \dots 1,6$.

В результате обобщения экспериментальных данных получена зависимость потерь теплоты из-за механического недожога от коэффициента избытка воздуха для древесных отходов с размером фракций от 3 до 6 мм и для температуры слоя 800...850 °C:

$$q_4 = a \cdot \alpha_s^{-2,5} + b \cdot \alpha_s^6, \quad (3)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от среднего эквивалентного диаметра частиц топлива:

$$a = 0,252 + 0,040d - 0,012d^2, \quad (4)$$

$$b = 0,00067 + 0,0013d - 0,00025d^2. \quad (5)$$

В [17] предлагается рассчитывать потери теплоты от механического недожога с учётом полидисперсности топлива. Формула справедлива для температуры кипящего слоя 750...950 °C, скорости оживления 2,9...4,3 м/с и

плотности инертного материала 1800 кг/м³:

$$q_4 = k_1 k_2 k_3 k_4 \sum_{i=1}^n [q_{fp}^i (1 - \Delta q_i) \Phi_{fp}^i / 100], \quad (6)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, зависящие от выхода летучих на беззольное состояние топлива, высоты слоя, крупности инертного материала, скорости псевдоожижения соответственно; q_{fp}^i – механический недожог данной фракции, %; Φ_{fp}^i – содержание данной фракции в топливе, %; n – количество узких фракций в топливе.

Однако, данную формулу использовать невозможно в случае сжигания древесных отходов. Скорость оживления слоя с содержанием в нём древесного топлива значительно меньше скорости оживления в эксперименте автора. Кроме того, размеры фракций инертного материала, который был использован в эксперименте по сжиганию древесных отходов, значительно меньше тех, которые применялись автором. В связи с этим определение ряда коэффициентов в данной формуле не представляется возможным.

Как видно из приведённых выше данных, потери теплоты от механической неполноты сгорания в устоявшемся режиме незначительны. Для

дальнейшего снижения потерь на практике применяют системы возврата уноса и применение особых конструктивных решений топочного объёма (таких как исполнение топки в форме конуса, установка отбойных решёток и др.).

Важным параметром, влияющим на режимы работы котла с топкой кипящего слоя, является скорость выгорания топлива. На продолжительность горения влияют различные факторы, такие как: влажность топлива, температура горения, зольность, расход дутьевого воздуха, и др.

Ниже приведены результаты экспериментальных исследований выгорания древесного топлива (гранулы, опилки, щепа) в кипящем слое (рис. 6). Показан рост температуры слоя в зависимости от времени сжигания.

Масса топлива в каждом цикле сжигания была одинаковой и составляла 3,8 кг. Как видно, скорость выгорания древесных опилок наибольшая среди предложенных материалов. Очевидно, причиной этому стала низкая плотность опилок. В целом время горения для всех видов топлива составляла 300...500 с. Наибольшее время розжига наблюдалось в случае сжигания древесных гранул, что также можно пояснить плотностью материала, которая значительно выше плотности щепы и опилок.

В [18] приведены результаты экспериментов по сжиганию топливных гранул из различных видов отходов растительного происхождения. Время сжигания в экспериментах авторов существенно меньше, чем в приведённых нами данных. Однако, стоит отметить, что в экспериментах по сжиганию агропеллет применялись дру-

гие режимы. Температура кипящего слоя достигала 900 °C и выше, что ускоряло горение.

Кроме того, авторы [18] сжигали топливо подавая его на разогретый слоеобразующий материал (золу), тогда как в нашем эксперименте процесс горения начинался с розжига при температуре окружающего воздуха, что позволило более точно определить продолжительность розжига для каждого вида топлива.

Динамика выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника исследовалась в [19]. Топливо подавалось в предварительно разогретый до 900 °C реактор кипящего слоя в количестве 0,1 г. Инертный материал (зола) подавался в количестве 1 г. Время выгорания образцов составляло 24...60 с. Эти данные подтверждены теоретическими расчётами [20].

Как видно, при более высокой температуре кипящего слоя скорость выгорания существенно выше чем при низкотемпературном сжигании. Длительное горение, как показал эксперимент, приводит к повышению потерь теплоты от механического недожога. Однако, существуют способы снижения этих потерь. Одним из них является конструктивная оптимизация топки котла. Как отмечено в [11], низкотемпературное сжигание (около 700 °C) снижает износ котельного агрегата. Преимуществом длительного горения также является снижение износа вспомогательного оборудования, например, системы подачи топлива, поскольку скорость подачи топлива при низкотемпературном сжигании ниже чем при высокотемпературном.

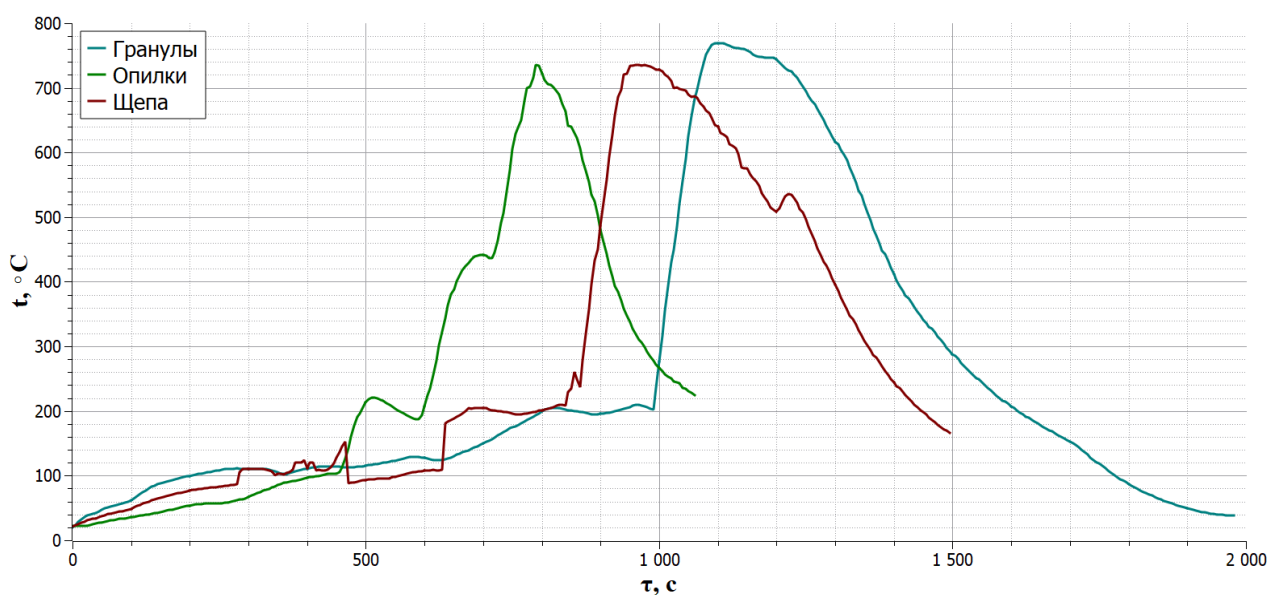


Рис. 6. Продолжительность горения различных видов древесного топлива в кипящем слое

Выводы. В результате проведённых экспериментов на лабораторной установке по исследованию сжигания древесных отходов в кипящем слое установлено влияние коэффициента избытка воздуха и температуры слоя на величину потерь теплоты от механического недожога топлива. Проведены эксперименты, позволяющие оценить продолжительность горения древесного топлива различной плотности. Топливо низкой плотности разжигается и горит быстрее более плотного топлива. Период розжига щепы был короче, чем у гранул, однако время горения этих двух видов топлива существенно не отличаются. Определены параметры, обеспечивающие минимальный механический недожог. Для

достижения максимальной эффективности сжигания топлива коэффициент избытка воздуха должен составлять 1,4...1,6, температура слоя – 800...920 °С.

Перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты показали возможности снижения уноса топлива в атмосферу за счёт изменения режимных параметров котельного агрегата. Дальнейшие исследования должны быть направлены на изучение низкотемпературного сжигания (до 750 °С) твёрдого топлива. Также следует уделить внимание конструктивной оптимизации топочных устройств для сжигания топлив растительного происхождения.

Литература

1. Карапетов А. Э. Сжигание биотоплив в топках кипящего слоя / Карапетов А. Э. // Академия энергетики. – 2016. – №2 (70). – с. 40-49.
2. Варес В. Справочник потребителя биотоплива / В. Варес, Ю. Касък, П. Муйсте, Т. Пиху, С. Соосар. – Таллин: Издательство Таллиннского технического университета, 2005. – 183 с.
3. Шемякин В. Н. Опыт практического внедрения технологии кипящего слоя в промышленной и коммунальной энергетике / В. Н. Шемякин, А. Э. Карапетов, С. В. Крылов // Труды ЦКТИ. – 2009. – №298. – с. 57-58.
4. Шемякин В. Н. Внедрение технологии сжигания в кипящем слое как один из путей решения внедрения местных низкосортных топлив в энергетику страны / В. Н. Шемякин, А. Э. Карапетов // Новости теплоснабжения. – 2009. – №9 (85). – с. 20-23.
5. Баскаков А. П. Котлы и топки с кипящим слоем. / А. П. Баскаков, В. В. Манцев, И. В. Располов. – Москва: Энергоатомиздат, 1996. – 352 с.
6. Пузырев Е. М. Исследование топочных процессов и разработка котлов для низкотемпературного сжигания горючих отходов и местных топлив: дисс. ... докт. техн. наук: 01.04.14: защит. 14.05.2004 / Пузырев Евгений Михайлович; Алтайский государственный технический университет имени И. И. Ползунова. – Барнаул, 2003. – 315 с.
7. Khan A.A. Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies / A. A. Khan, W. de Jong, P. J. Jansens, H. Spliethoff // Fuel Processing Technology. – 2009. – №1 (90). – p. 21-50.
8. Li C. Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods / C. Li, C. Gillum, K. Toupin, B. Donaldson // Energy Conversion and Management. – 2015. – № 103. – p. 665-673.
9. Saidur R. A review on biomass as a fuel for boilers / R. Saidur, E.A. Abdelaziz, A. Demirbas // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2011. – №5 (15). – p. 2262-2289.
10. Davidsson K.O. Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler / K. O. Davidsson, L.-E. Åmand, B.-M. Steenari, A.-L. Elled, D. Eskilsson, B. Leckner // Chemical Engineering Science. – 2008. – №21 (63). – p. 5314-5329.
11. Silvennoinen J. Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler / J. Silvennoinen, M. Hedman // Fuel Processing Technology. – 2013. – №105. – p. 11-19.
12. Sirisomboon K. Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor / K. Sirisomboon, V. I Kuprianov, P. Arromdee // Chemical Engineering and Processing: Process Intensification. – 2011. – № 3 (49). – p. 270-277.
13. Sun P. Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed / P. Sun, S. Hui, Z. Gao, Q. Zhou, H. Tan, Q. Zhao, T. Xu // Applied Thermal Engineering. – 2013. – №2 (52). – p. 284-292.
14. Strzalka R. Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion / R. Strzalka, T. G. Erhart, U. Eicker // Applied Thermal Engineering. – 2013. – № 50 (2). – p. 1418-1426.
15. Sahu S. G. Coal-biomass co-combustion: An overview // S.G. Sahu, N. Chakraborty, P. Sarkar // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2014. – № 39. – p. 575-586.
16. Литун Д. С. Расчет уноса золы и потерь тепла с механическим недожогом в кипящем слое при сжигании биомассы / Д. С. Литун, Г. А. Рябов // Известия российской академии наук. Энергетика. – 2015. – №5. – с. 90-102.
17. Павлов Ю. Г. Исследование природы механического недожога в топках с кипящим слоем и разработка путей увеличения их экономичности: дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 1987.
18. Исьемин Р. Л. Исследование сжигания агропеллет в кипящем слое / Р. Л. Исьемин, С. Н. Кузьмин, В. В. Коныхин, А. В. Михалев, А. Т. Зорин, А. П. Прокопчик // Вопросы современной науки и практики. – 2008. – №2 (12). – с. 20-24.

19. Карп И. Н. Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое / И. Н. Карп, А. Ю. Провалов, К. Е. Пьяных, А. С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №3. – с. 9-13.

20. Карп И. Н. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы / И. Н. Карп, В. В. Колесник, В. Н. Орлик, К. Е. Пьяных, А. С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №5. – с.14-20.

References

1. Karapetov A. E. "Szhiganiye biotopliv v topkakh kipiashchego sloia." *Akademiia energetiki*, no.2 (70), 2016, pp. 40-49.
2. Vares V., Kask Yu., Muyste P., Pikhu T., Soosar S. *Spravochnik potrebitelia biotopliva*. Izdatelstvo Tallinnского tekhnicheskogo universiteta, 2005.
3. Shemiakin V. N., Karapetov A. E., Krylov S.V. "Opyt prakticheskogo vnedreniia tekhnologii kipiashchego sloia v promyshlennoi i kommunalnoi energetike." *Trudy TsKTI*, no. 298, 2009, pp. 57-58.
4. Shemiakin V. N., Karapetov A. E. "Vnedreniye tekhnologii szhiganiya v kipyashchem sloye kak odin iz putey resheniya vnedreniya mestnykh nizkosortnykh topliv v energetiku strany." *Novosti teplosnabzheniya*, no. 9(85), 2009, pp. 20-23.
5. Baskakov A. P., Mantsev V. V., Raspolov I. V. *Kotly i topki s kipyashchim sloiem*. Energoatomizlat, 1996.
6. Puzyrev E. M. *Issledovaniye topochnykh protsessov i razrabotka kotlov dlya nizkotemperaturnogo szhiganiya goryuchikh otkhodov i mestnykh topliv*. Diss. Polzunov Altai State Technical University, 2003.
7. Khan A.A., de Jong W., Jansens P.J., Spliethoff H. "Biomass combustion in fluidized bed boilers: Potential problems and remedies." *Fuel Processing Technology*, vol. 90, no. 1, 2009, pp. 21-50.
8. Li C., Gillum C., Toupin K., Donaldson B. "Biomass boiler energy conversion system analysis with the aid of exergy-based methods." *Energy Conversion and Management*, vol. 103, 2015, pp. 665-673.
9. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demircbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. "A review on biomass as a fuel for boilers." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 5, 2011, pp. 2262-2289.
10. Davidsson K.O., Åmand L.-E., Steenari B.-M., Elled A.-L., Eskinsson D., Leckner B. "Countermeasures against alkali-related problems during combustion of biomass in a circulating fluidized bed boiler." *Chemical Engineering Science*, vol. 63, no. 21, 2008, pp. 5314-5329.
11. Silvennoinen J., Hedman M. "Co-firing of agricultural fuels in a full-scale fluidized bed boiler." *Fuel Processing Technology*, vol. 105, 2013, pp. 11-19.
12. Sirisomboon K., Kuprianov V. I., Arromdee P. "Effects of design features on combustion efficiency and emission performance of a biomass-fuelled fluidized-bed combustor." *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, vol. 49, no. 3, 2010, pp. 270-277.
13. Sun P., Hui S., Gao Z., Zhou Q., Tan H., Zhao Q., Xu T. "Experimental investigation on the combustion and heat transfer characteristics of wide size biomass co-firing in 0.2 MW circulating fluidized bed." *Applied Thermal Engineering*, vol. 52, no. 2, 2013, pp. 284-292.
14. Strzalka R., Erhart T. G., Eicker U. "Analysis and optimization of a cogeneration system based on biomass combustion." *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 2, 2013, pp. 1418-1426.
15. Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P. "Coal-biomass co-combustion: An overview." *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 39, 2014, pp. 575-586.
16. Litun D. S., Riabov G. A. "Raschet unosa zoly i poter tepla s mekhanicheskim nedozhogom v kipyashchem sloye pri szhiganiy biomassy." *Izvestiya Rossiyskoy Akademii nauk. Energetika*, no. 5, 2015, pp 90-102.
17. Pavlov Yu. G. *Issledovaniye prirody mekhanicheskogo nedozhoga topliva v topkakh s kipyashchim sloiem i razrabotka putey uvelicheniya ikh ekonomichnosti*. Diss. Moscow, 1987.
18. Isemin R.L., Kuzmin S.N., Koniakhin V.V., Mikhalev A.V., Zorin A.T., Prokopchik A.P. "Issledovaniye szhiganiya agropellet v kipyashchem sloye." *Voprosy sovremennoi nauki i praktiki*, no. 2(12), 2008, pp. 20-24.
19. Karp I. N., Provalov A. Yu., Panykh K. E., Yudin A. S. "Issledovanie dinamiki vygoraniia drevesnykh opilok i luzgi podsolnechnika v kipiashchem sloe." *Energotekhnologii i resursosberezhenie*, no 3, 2010, pp. 9-13.
20. Karp I. N., Kolesnik V. V., Orlik V. N., Panykh K. E., Yudin A. S. "Matematicheskoe modelirovanie protsessa sgoraniia drevesnoi chastitsy." *Energotekhnologii i resursosberezhenie*, no 5, 2010, pp. 14-20.

УДК 697.325

Експериментальні дослідження спалювання біопалива в киплячому шарі

О. Ф. Редько¹, І. О. Редько², Ю. О. Півненко³

¹д.т.н., проф. Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків, Україна, redko.af@gmail.com,

²к.т.н., доц. Харківський національний університет міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків, Україна, gemes_s2006@ukr.net

³інженер, ООО «ПРОМОЛЮКС СЕРВИС», м. Вишневе, Україна, pivnenko.yura@gmail.com

Анотація. Представлені результати експериментальних досліджень показників втрат теплоти через механічний недопал різних видів деревного палива в топках киплячого шару. Показаний вплив температури шару та коефіцієнту надлишку повітря на величину механічного недопалу. Встановлено значне підвищення вмісту горючих складових у виносі за температури шару нижче ніж 750 °С. Повнота згоряння зростає за температури киплячого шару вище ніж 800 °С. Визначені оптимальні значення коефіцієнта надлишку повітря (1,4...1,6), що забезпечують мінімальний винос палива з об'єму топки котла, а також значення числа псевдозрідження для різних режимів роботи топки. Наведені результати визначення швидкості вигорання деревних відходів (щепи, тирси) і гранульованого деревного палива (пелети) в режимі відсутності відбору теплоти. Відзначено, що вигорання гранульованого палива більш тривале ніж швидкість горіння непідготовлених деревних відходів. При цьому втрати теплоти від механічної неповноти згоряння для подібного палива нижчі, оскільки пресоване паливо має більшу густину порівняно з тирсою і щепою.

Ключові слова: киплячий шар, топка, деревні відходи, механічний недопал, втрати теплоти, коефіцієнт надлишку повітря.

UDC 697.325

Experimental Studies of Combustion of Biofuel in a Fluidized Bed

O. Redko¹, I. Redko², Yu. Pivnenko³

¹Sc.D, professor, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv, Ukraine, redko.af@gmail.com,

²PhD, associate professor, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv, Kharkiv, Ukraine, gemes_s2006@ukr.net

³Engineer, Ltd "PROMOLUKS SERVIS", Vyshneve, Ukraine pivnenko.yura@gmail.com

Abstract. Results of experimental studies of heat losses due to mechanical underburning of various types of wood fuel in the furnaces of the fluidized bed are presented. Influence of the bed temperature and the air excess factor on the magnitude of mechanical underburning is shown. A significant increase in the content of combustible components in the entrainment is observed at the temperature below 750 °C, the completeness of combustion of the fuel increases at the temperature of the boiling layer above 800 °C. The optimum values of the excess air factor (1.4 ... 1.6) are determined, which ensure minimum fuel drift from the boiler furnace volume, as well as the fluidization number for various operating modes of the furnace. The results of determining the burning rate of wood waste (wood chips, sawdust) and granulated wood fuel (pellets) at the absence of heat removal are given. It is noted that the burning out of granulated fuel is more prolonged than the burning rate of unprepared wood waste, while the loss of heat due to mechanical incompleteness of combustion for such fuel is lower, since the compressed fuel has a higher density and less sail than sawdust and chips.

Keywords: fluidized bed, furnace, waste wood, mechanical underburning, heat loss, the air excess coefficient.

Надійшла до редакції / Received 11.12.2017.