

ОСОБЕННОСТИ СЖИГАНИЯ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ВЫСОКОЗОЛЬНОГО ГРАНУЛИРОВАННОГО БИОТОПЛИВА С НИЗКОПЛАВКОЙ ЗОЛОЙ

Бородуля В.А., Бучилко Э.К., Виноградов Л.М., Гребеньков А.Ж.¹⁾, Исьемин Р.Л.²⁾

¹⁾ Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь

²⁾ Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия

Введение

При реализации современной энергетической политики как России, так и Беларуси поставлена задача увеличить долю использования местных и возобновляемых энергоресурсов, в частности, различных видов биомассы и торфа с одновременным повышением эффективности используемых технологий сжигания таких топлив и топочного оборудования. Максимально широкое вовлечение в структуру действующего энергетического хозяйства возобновляемых источников энергии включает отходы лесопереработки и сельхозпроизводства, твердые коммунальные отходы. Отличительной особенностью таких топлив является повышенная зольность и низкая температура плавления золы, что приводит к образованию шлаковых агломератов, снижает эффективность и надежность котельного оборудования.

Из существующих способов энергетического использования биотоплив, отличающихся высоким содержанием золы и влаги, перспективным, на наш взгляд, является применение псевдооживленных систем. В этом случае процесс сжигания топлива осуществляется в кипящем (псевдооживленном) слое дисперсного инертного материала (кварцевый песок или зола).

Использование кипящего слоя при сжигании твердых топлив позволяет не только интенсифицировать процесс перемешивания частиц и достигнуть высокого коэффициента теплоотдачи от частиц к погруженной непосредственно в слой теплообменной поверхности, но автоматизировать топочный процесс с выводом из слоя топливной золы [1]. Дополнительные преимущества такой технологии проявляются при использовании в качестве материала кипящего слоя катализаторов, когда топливо окисляется преимущественно на их поверхности без образования пламени [2].

Вместе с тем непосредственное сжигание биомассы в топке кипящего слоя затруднено вследствие низкой плотности и высокой влажности, снижающих теплотворную способность. Поэтому требуется предварительная подготовка топлива, которая в основном предполагает измельчение и гранулирование с получением пеллет. В отличие от углей зола топлива из растительной биомассы содержит соединения щелочных металлов, которые вызывают шлакование теплообменных поверхностей котла и агломерацию материала кипящего слоя. Это приводит к нарушению пузырькового характера псевдооживления, ухудшению перемешивания в слое и необходимости повышения скорости псевдооживления, что в свою очередь изменяет режим горения биотоплива и отрицательно сказывается на эффективности и надежности работы топок кипящего слоя [3-7].

Цель экспериментов

Цель экспериментов состоит в исследовании влияния режимных параметров (материала и температуры слоя, типа и размера гранул топлива) на характеристики основных стадий горения: продолжительность выхода летучих и горения коксового остатка, а также температура в центре гранулы и на поверхности. Полученные результаты позволят предложить новые технологические решения для повышения эффективности сжигания различных видов биомассы.

Описание экспериментального стенда

Для экспериментального исследования процесса горения топливных гранул использовался универсальный стенд, основным элементом которого является камера сжигания с кипящим слоем (КС) дисперсного материала. Она представляет собой цилиндр с внутренним диаметром $D = 55$ мм, изготовленный из нержавеющей стали. Высота рабочей зоны над газораспределительной решеткой, изготовленной из шамотного кирпича толщиной 1,5 см и зажатой между двойными слоями жаростойкой сетки с ячейкой 0,5 мм, составляет 0,5 м. Над газораспределительной решеткой располагается КС инертного дисперсного материала (кварцевый или оливковый песок, катализатор). Температура КС измеряется с помощью хромель-алюмелевой тер-

мопары с открытым спаем (диаметр электродов 0,5 мм, изоляция – двухканальная керамическая соломка, помещенная в жаропрочную металлическую трубку). Для измерения вертикального профиля температуры термопара перемещается по высоте камеры сжигания. Камера сжигания, снабженная наружным электронагревателем в виде нихромовой спирали, покрыта тепловой изоляцией из каолина и стекловаты и помещена в защитный металлический кожух, что обеспечивает минимальные потери тепла. Мощность нагревателя регулируется вручную с контролем температуры слоя.

КС создается за счет псевдооживления воздухом, подаваемым с помощью компрессора. Для визуального наблюдения поверхности КС и процесса горения в нем топлива на выходе из камеры сжигания закреплено зеркало. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1, его общий вид – на рис. 2.

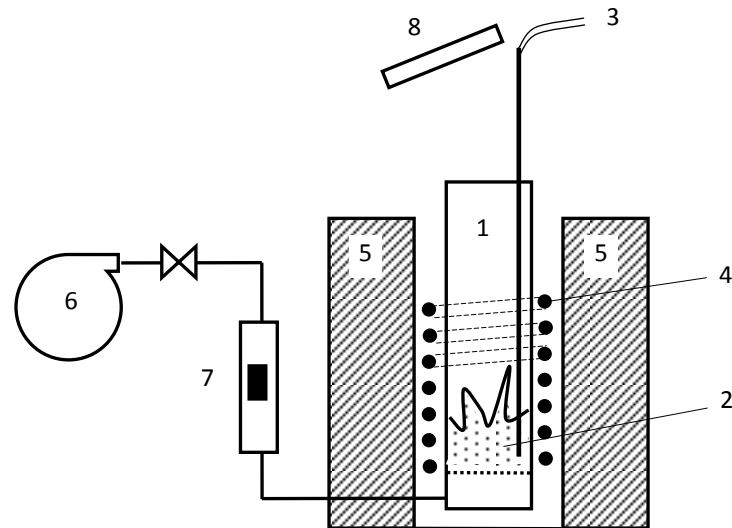


Рис. 1. Схема экспериментального стенда с КС: 1 – камера сжигания; 2 – кипящий слой; 3 – термопара; 4 – электрический нагреватель; 5 – термоизоляция; 6 – компрессор; 7 – ротаметр; 8 – зеркало.



Рис.2. Общий вид экспериментального стенда для исследования сжигания топлив в КС

Условия проведения и методика экспериментов

Характеристики материала слоя, использованного в экспериментах, показаны в табл. 1. В качестве каталитического КС служили сферические частицы алюмомеднохромового катализатора ИК-12-73 (фракция 0,4-0,7 мм). Для сравнения опыты проводились в инертном КС частиц кварцевого песка (фракция 0,355-0,5мм), близком по аэродинамическим характеристикам к слою катализатора.

Таблица 1 – Условия проведения экспериментов

Материал слоя, фракция, мм	d_p ¹⁾ мм	ρ_s ²⁾ кг/м ³	T_b ³⁾ °С	H_{mf} ⁴⁾ мм
катализатор 0,4-0,7	0,55	1310	650	55
	0,55	1310	760	55
кварцевый песок, 0,355-0,5	0,43	2540	650	55
	0,43	2540	760	55
оливиновый песок, 0,25-0,4	0,325	2830	650	55
	0,325	2830	760	55

¹⁾ d_p – средний диаметр частиц слоя; ²⁾ ρ_s – плотность частиц слоя; ³⁾ T_b , – температура слоя; ⁴⁾ H_{mf} – высота плотного слоя.

Характеристики топливных гранул, использованных в экспериментах, приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Характеристики топливных гранул

Вид топлива	Диаметр гранул, D , мм	Длина гра- нул, L , мм	Плотность гра- нул, ρ , кг/м ³
1. Гранулы из соломы (РФ)	6	10,5	1286
2. Гранулы из соломы и отходов сельхозпроизводства (Республика Беларусь)	8	15	1266
	14		
3. Древесные гранулы (Республика Беларусь)	6	10,5	1260

Методика проведения опытов была следующей. Одиночная гранула опускалась в предварительно разогретый КС сверху. Путем визуальных наблюдений за поверхностью КС измеряли время выхода летучих t_{ve} (на момент погасания факела), полное время горения частицы топлива t_{ce} (на момент исчезновения из вида светящейся на фоне слоя частицы кокса плюс полупериод циркуляции частицы в КС) и время горения коксового остатка $t_{ch} = t_{ce} - t_{ve}$. Достоверность визуальных измерений проверялась путем их сравнения с результатами измерений температуры гранул на поверхности и в центре.

Температура горячей частицы измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары, закрепленной на поверхности или в центре частицы (рис. 3). Электроды термопары были защищены керамической сололкой. Температура горячей частицы топлива является интеграль-

ной характеристикой процессов тепломассопереноса, протекающих как внутри частицы, так и на внешней ее границе.

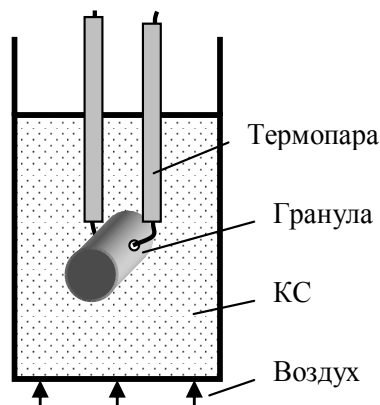


Рис. 3. Схема измерения температуры гранулы в КС

Зависимость температуры частицы топлива от времени позволяет с достаточно высокой точностью определять время окончания выхода летучих по характерному переходу на платообразный участок, типичный для горения коксового остатка. При измерении температуры термопара препятствовала перемещениям гранулы в вертикальном направлении и ограничивала в горизонтальном. Гранула размещалась в середине слоя (27,5 мм над решеткой).

Необходимо отметить, что в ряде экспериментов происходил срыв гранул с термопары, что на графиках определяется резким падением температуры частицы до температуры КС.

Результаты экспериментов

На рис. 4 приведены результаты экспериментального исследования горения одиночной гранулы из соломы №1 ($D=6$ мм, $L=10,5$ мм) в КС кварцевого песка и катализатора при различной температуре слоя.

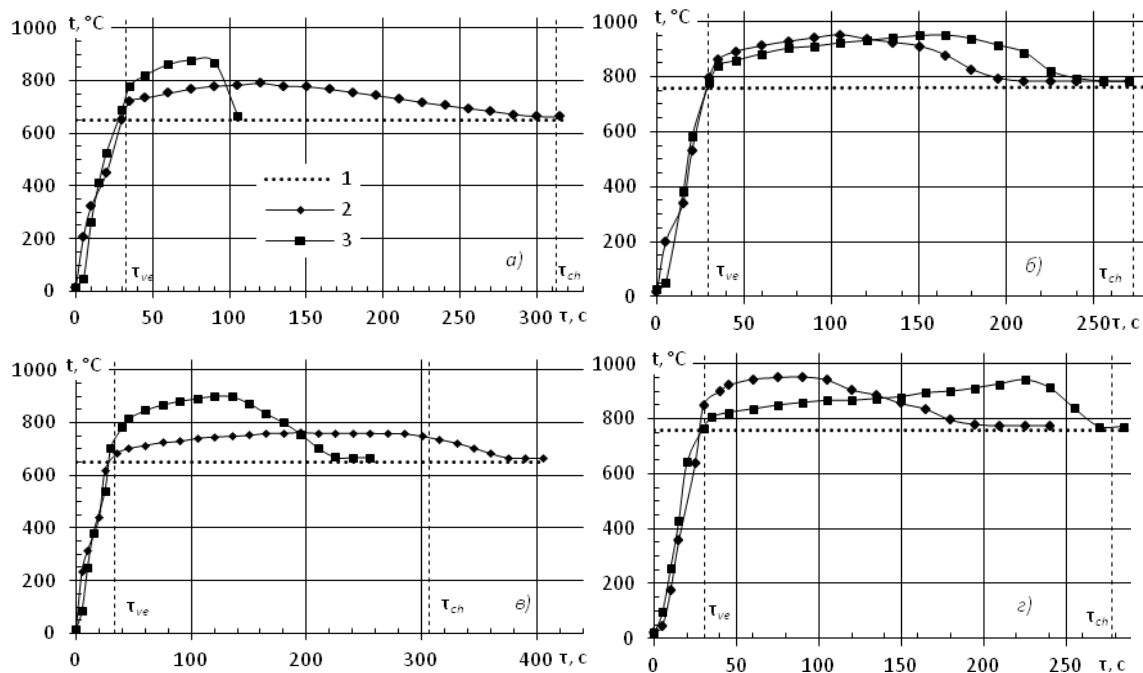


Рис.4. Температура кипящего слоя (1), поверхности (2) и центра (3) гранулы из соломы №1 в слое кварцевого песка (а, б) и катализатора (в, г): $\tau_{лв}$ – время выхода летучих; $\tau_{чг}$ – время горения кокса (по результатам визуального наблюдения)

В условиях опытов, в процессе выхода летучих одиночная свободная гранула топлива приблизительно половину времени плавала вблизи поверхности слоя, а летучие горели в факеле в надслоевом объеме. В КС кварцевого песка факел был достаточно устойчив и хорошо наблюдается на протяжении всего процесса, тогда как в каталитическом слое вследствие каталитического воздействия частиц слоя появление видимого пламени задерживалось по сравнению со слоем кварцевого песка, и горение было неустойчивым и пульсирующим, что затрудняло определение t_{ve} . Редкое появление пламени при сжигании в слое катализатора наблюдалось в конце выхода летучих. При переходе к горению углерода частица коксового остатка начинала ярко светиться на фоне более холодного слоя, однако при этом она начинала погружаться в слой, причем период циркуляции частицы увеличивался по мере ее выгорания, что также затрудняло наблюдения.

Продолжительность стадии выхода летучих, полученная путем визуальных наблюдений, равна времени нагрева гранулы до температуры КС. Для гранул из соломы №1 при температуре КС 760°C характерно образование прочного зольного остатка, который полностью выгорал, не срываясь с термопары (рис. 5).



Рис. 5. Внешний вид термопары после сгорания гранулы

На стадии горения кокса в КС температура гранулы часто достигает максимального значения, существенно превышающего температуру слоя, и мало изменяется со временем. Перегрев гранулы достигал 250°C. В практических применениях важно не допустить чрезмерно высоких значений температуры кокса, что может привести к размягчению минеральной части и агломерации золы в КС с последующим срывом процесса псевдооживления.

Перегрев гранулы приводит к размягчению минеральной части и агломерации золы. При температуре КС 650°C горение гранул сопровождалось фрагментацией гранулы (гранула распадалась на 2-4 части) и срыв с термопары. Это видно на рис. 4 по резкому падению температуры гранулы до окончания горения коксового остатка.

Заметного влияния материала слоя (кварцевый песок или катализатор) на время горения одиночной гранулы при температурах КС 760°C и 650°C не обнаружено.

Для сравнения были проведены исследования горения одиночной гранулы из соломы № 2 и гранулы из отходов древесины №3.

На рис. 6 приведены результаты экспериментального исследования горения одиночной гранулы из соломы №2 ($D=8$ мм) в КС кварцевого песка и катализатора при различной температуре слоя.

В ходе экспериментов установлено, что для гранул из соломы №1 и №2 продолжительность стадии выхода летучих равна времени нагрева гранулы до температуры КС. Для гранул из отходов древесины температура гранулы достигает температуры слоя до двух раз быстрее продолжительности стадии выхода летучих.

Эксперименты показали, что заметного влияния вид материала кипящего слоя (кварцевый песок или катализатор) на время горения одиночной гранулы при температурах КС 760°C и 650°C не оказывает.

Горение гранул из соломы № 2 и отходов древесины № 3 практически в каждом эксперименте сопровождалось фрагментацией гранулы (гранула распадалась на 2-4 части) и при горе-

нии в слое образованием существенного количества искр.

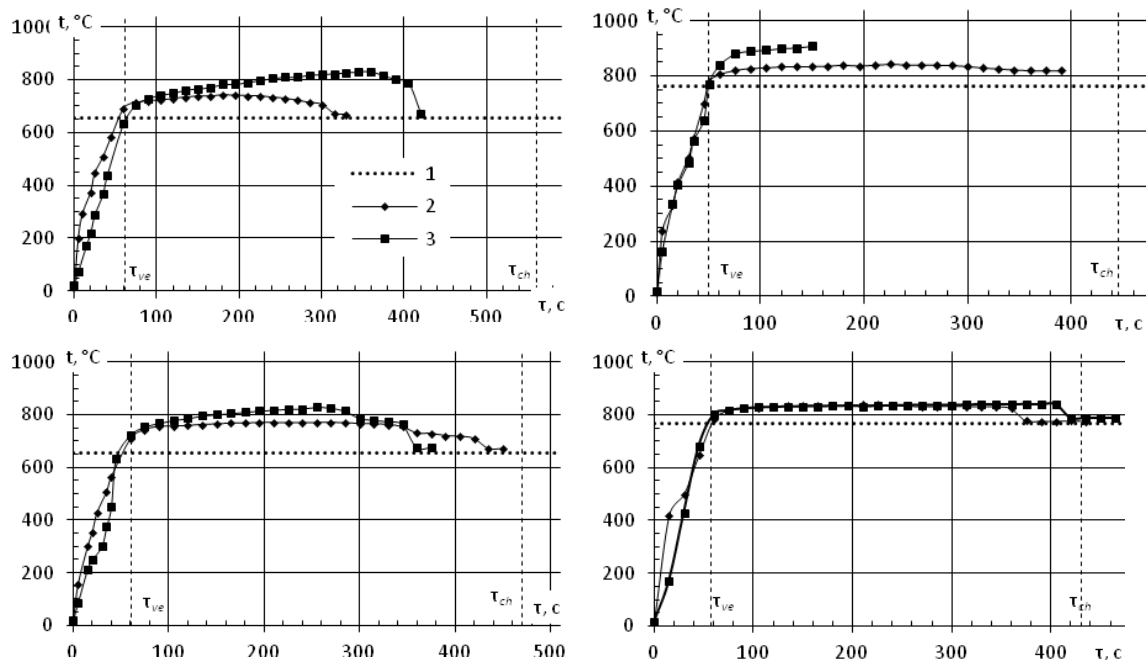


Рис.6 – Температура кипящего слоя (1), поверхности (2) и центра (3) гранулы из соломы №2 в слое кварцевого песка (а, б) и катализатора (в, з): τ_{ve} – время выхода летучих; τ_{ch} – время горения кокса (по результатам визуального наблюдения)

В экспериментах оливиновый песок как материал слоя рассматривается в качестве возможной замены дорогостоящему катализатору. По своему минеральному составу он представляет собой изоморфную смесь форстерита $2MgO \cdot SiO_2$ (в виде соединения Mg_2SiO_4) – 93 % и фаялита $2FeO \cdot SiO_2$ (в виде химического соединения Fe_2SiO_4) – 7 %. Типовой химический состав и некоторые свойства оливинового песка приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Типовой химический состав и свойства оливинового песка

MgO	49%	Параметр	Оливин
SiO ₂	41%	Цвет	зеленоватый
Fe ₂ O ₃	7%	Цвет черты	белая
Cr ₂ O ₃	0,3%	Блеск	стеклянный
Al ₂ O ₃	0,5%	Насыпная плотность, г/см ³	1,7
NiO	0,3%	Температура начала спекания, °C	1450
MnO	0,1%	Температура плавления, °C	1760
CaO	0,05%	Удельная теплоемкость, кДж/(кг·К)	0,95

Результаты экспериментального исследования продолжительности стадий выхода летучих и горения коксового остатка при горении одиночной гранулы в КС сведены в табл. 4.

Таблица 4 – Продолжительность основных стадий горения топливной гранулы в кипящем слое

Материал слоя	Стадия			
	Выход летучих, с		Горение кокса, с	
	Температура слоя		Температура слоя	
	650°C	760°C	650°C	760°C
Кварцевый песок	32,7	29,2	279,6	243,5
Оливиновый песок	32,0	29,3	275,3	245,0
Катализатор ИК-12-73	34,0	30,7	273,0	247,3

Из табл. 4 видно, что тип материала слоя не оказывает существенного влияния на продолжительность как стадии выхода летучих, так и стадии горения кокса. Эффект катализатора наблюдается лишь при более низкой температуре слоя (650°C) и только на стадии горения коксового остатка, при которой время этой стадии сокращается на 6,6 с (на 2,4 %, что на уровне ошибки метода визуального наблюдения), в отличие от времени горения в слое кварцевого песка.

Для экспериментального изучения влияния диаметра топливной гранулы на температуру ее горения в кипящем слое использованы гранулы из соломы №2. Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

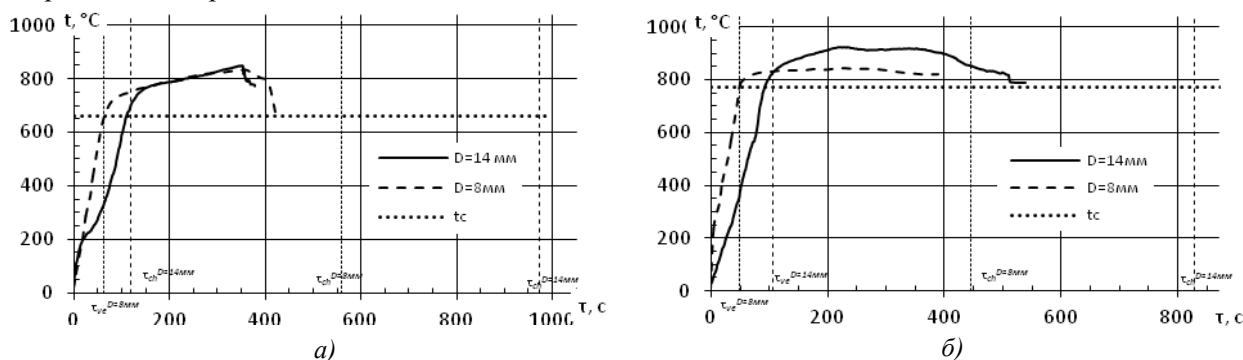


Рис. 7. Влияние диаметра гранулы на ее температуру при горении в кипящем слое кварцевого песка: $a - t_c = 650^{\circ}\text{C}$, $b - t_c = 760^{\circ}\text{C}$

Из рис. 7 видно, что увеличение размеров топливной гранулы приводит к росту величины перегрева частицы относительно температуры кипящего слоя. Так, уже при температуре слоя 760°C температура центра топливной гранулы достигает 1000°C .

Следовательно, с целью предотвращения агломерации кипящего слоя, наряду с температурой слоя в процессе сжигания, необходимо устанавливать оптимальные размеры топливных гранул.

Список литературы

1. Бородуля В.А., Виноградов Л.М. Сжигание твердого топлива в псевдооживленном слое. Мн.: Наука и техника, 1980, 192с.
2. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. Каталитическое сжигание: достижения и проблемы // Физика горения и взрыва. 2015, т. 51, №2. С. 5-13.
3. Осьмак А. А. Растительная биомасса как органическое топливо / А. А. Осьмак, А. А. Серёгин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. № 2(8). С. 57-61.
4. Г.Я.Кабо, А.В.Блохин, В.В.Симирский, О.А. Ивашкевич. Использование растительной биомассы для производства различных видов топлива в Республике Беларусь // Химические проблемы создания новых материалов и технологий: Сб. ст. Вып. 3 / под ред.О.А.Ивашкевича. – Минск, 2008. С.166-179.
5. Рябов Г.А., Дик Э.П., Соболева А.Н., Соловьева Т.Е. Особенности процессов сжигания биотоплив в котлах с кипящим слоем // Теплоэнергетика. 2005. №9. С. 54-60.
6. Дик Э.П., Рябов Г.А., Тугов А.Н. Сравнение свойств золы от сжигания углей и нетрадиционных видов топлива // Теплоэнергетика. 2007. №3. С. 60-64.
7. Безносик Ю.А., Логвин В.А., Коринчук К.А., Киржнер Д.А. Исследования сжигания твердого топлива в низкотемпературном кипящем слое с определением выбросов токсических веществ // Химическая промышленность. 2014. Т.9, №1. С. 15-19.