

Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое

Карп И.Н.¹, Провалов А.Ю.², Пьяных К.Е.¹, Юдин А.С.¹

¹ Институт газа НАН Украины, Киев

² Институт угольных энерготехнологий НАН Украины, Киев

Экспериментально определено время выгорания частиц древесных опилок и лузги подсолнечника в диапазоне влажности 0,5–25 % и размера частиц 1,0–3,0 мм. Показано, что минимальное время выгорания и максимальная температура горения достигаются при условии естественно-воздушной сушки топлив ($W^r = 10–12\%$). Повышенная и пониженная влажность сжигаемого материала приводит к увеличению общего времени выгорания. Увеличение размера частиц приводит к увеличению времени выгорания только за счет выгорания коксового остатка. Результаты исследования могут быть применены при конструировании топок тепловых агрегатов на альтернативных топливах.

Ключевые слова: время выгорания, древесные опилки, лузга подсолнечника, влажность, размеры частиц.

Експериментально визначено час вигорання частинок тирси та лузги соняшника у діапазоні вологості 0,5–25 % та розмірів частинок 1,0–3,0 мм. Показано, що найменший час вигорання та найбільша температура горіння досягаються за умов природно-повітряного сушіння палива ($W^r = 10–12\%$). Підвищена та знижена вологість матеріалу, що спалюється, призводить до збільшення загального часу вигорання. Збільшення розміру частинок призводить до збільшення часу вигорання тільки за рахунок вигорання коксівного залишку. Результати дослідження можуть бути використані при конструюванні топок теплових агрегатів на альтернативних паливах.

Ключові слова: час вигорання, тирса, лузга соняшника, вологість, розміри частинок.

Особенности выгорания топливных частиц с высоким выходом летучих.

Основной составляющей сухой массы органического сырья растительного происхождения является целлюлоза (до 90 % на сухую массу лузги, дерева, опилок; более 90 % на сухую массу влажных целлюлозных отходов). Целлюлоза является полисахаридом, мономером которого имеет химическую формулу $C_6H_{10}O_5$ и представляет собой кольцевую структуру, пять углов которой заняты углеродом с присоединенными группами H, OH и CH_2 , а шестой — гератоатомом кислорода [1].

Выгорание топливной частицы представляет собой комплекс сложных физико-химических явлений, который условно разделяют на следующие последовательные по времени основные стадии: 1) пиролиз частицы, состоящий из прогрева и сушки частицы до выхода летучих, затем образование, выход, воспламенение, а также выгорание летучих; 2) выгорание коксового остатка, включая его воспламенение. Указанные стадии имеют различную скорость, продол-

жительность и степень влияния на процесс горения в зависимости от технологических условий процесса. В общем случае полное время выгорания топливной частицы можно представить в виде суммы двух времен, соответствующих выходу и выгоранию летучих и выгоранию коксового остатка [2].

В ходе пиролиза топливной частицы происходит разрыв физико-химических связей внутри нее с образованием газообразных и жидких (смолы) конечных продуктов термического разложения. В состав газообразных продуктов пиролиза (летучих) обычно входит значительное количество горючих компонентов (CO , CH_4 , H_2 и др.). Летучие играют важную роль при воспламенении и на начальных стадиях горения топлива. Чем больше летучих содержится в исходном топливе, тем при прочих равных условиях быстрее происходит его воспламенение и тем интенсивнее оно выгорает. В то же время выход и горение летучих, опережая горение коксового остатка, может противодействовать диффузии окислителя к его поверхности. Это

объясняется тем, что интенсивное насыщение летучими прилегающей к частице пограничной пленки ведет к созданию в ней парогазовой смеси из горючих и окислителя. Выгорание этой смеси вызывает резкое снижение концентрации окислителя у поверхности частицы, следовательно, коксовый остаток практически не участвует в процессе воспламенения и начальных стадиях горения (гомогенно-гетерогенное воспламенение).

Следующей, как правило, наиболее продолжительной по времени стадией после выхода и выгорания летучих, является выгорание коксового остатка. Для этой стадии особую роль играют гетерогенные реакции, проходящие на поверхности топливной частицы. Согласно теории активных центров, реакция идет не на всей доступной газу-реагенту поверхности, а лишь на ее определенных участках — активных центрах. При этом последовательными элементарными актами взаимодействия являются физическая и химическая адсорбция, миграция промежуточного комплекса, десорбция продуктов реакции.

В большинстве случаев стадия выгорания коксового остатка определяет полноту утилизации топлива, эффективность технологического процесса и конструктивные особенности топочной камеры, а также режимные параметры технологического процесса.

Подготовка топлив к испытаниям.

Топлива доставлялись в капроновых мешках, что позволяло сохранять их начальные размеры и исходную влажность материала. Исходные образцы лузги подсолнечника представляли собой цельные половинки твердой оболочки семечки размером 10–14 мм. Древесные опилки были получены после фуговки древесины хвойных пород. Размеры опилок находились в пределах 10–25 мм. Для всех образцов был проведен технический анализ (табл.1).

По результатам технического анализа можно заключить, что все образцы являются малозольными ($A^d = 0,6-2,5\%$) и характеризуются высоким выходом летучих. При выгорании следует ожидать быстрого воспламенения частиц, а после выгорания — практически полного отсутствия золы.

В задачу эксперимента входило исследование динамики выгорания лузги подсолнечника

и древесных опилок с влажностью частиц W^r от 0 до 30 % и размером частиц от 1 до 3 мм. На первом этапе исходные образцы лузги и опилок были порезаны на лабораторной ножевой мельнице для волокнистых материалов РМ-120. Материал, подаваемый через загрузочный бункер, попадал в камеру дробления, где измельчался при попадании частиц между ножами ротора и ножами корпуса. За один оборот ротора происходит шесть циклов измельчения. При этом частицы материала испытывают сдвиговые деформации, подобные деформациям, возникающим при воздействии ножниц или ножа гильотины.

Пропущенный через мельницу материал был просеян на стандартных лабораторных ситах с размером ячеек 1,0; 1,6; 2,5 и 3,0 мм. Таким образом было получено три группы образцов с характерным размером частиц: 1,0–1,6; 1,6–2,5; 2,5–3,0 мм. Часть рассеянного материала всех размеров была высушена в сушильном шкафу до влажности 0,5 %. Для получения материала с влажностью около 30 % материал с влажностью 0,5 % смачивался водой до состояния, при котором мокрые частицы могли проходить по тракту подачи топлива в установку без налипания на стенки тракта. Влажность подготовленных этим способом образцов составила $W^r = 25\%$.

При подготовке образцов было получено 18 проб лузги подсолнечника и древесных опилок с влажностью $W^r = 0,5\%$; $W^r = 10,2\%$ (для лузги); $W^r = 12,5\%$ (для опилок) и $W^r = 25\%$. Все пробы до экспериментов во избежание изменения влажности хранились в герметично закрытых полиэтиленовых пакетах.

Эксперименты по определению динамики выгорания лузги подсолнечника и древесных опилок проводились на лабораторной установке РСК-2Д, предназначенной для изучения динамики выгорания различных образцов твердого топлива в кислороде воздуха в кипящем слое при давлении 0,1–2,5 МПа и температуре 500–1250 °С.

Основу установки составляет вертикальная трубчатая печь с помещенным внутрь цилиндрическим реактором, выполненным из жаропрочной стали. Внутренний диаметр реактора 0,035 м. Нижняя часть реактора заполнена инертной засыпкой из оксида магния и предназначена для прогрева поступающего с низу реактора газа-реагента. Сверху засыпки находится газораспределительная решетка из жаропрочной стали с размером ячеек 0,15 мм. Подача газа-реагента (воздуха) осуществляется от ramпы баллонов через систему вентиляций. Рас-

Таблица 1. Технический анализ исходных образцов

| Образец | A^d , % | V^{daf} , % | W^r , % |
|---------------------|-----------|---------------|-----------|
| Лузга подсолнечника | 2,3–2,5 | 76,2–77,4 | 10,0–10,4 |
| Древесные опилки | 0,6–0,9 | 80,1–82,4 | 12,2–12,5 |

Таблица 2. Скорость уноса лужги и опилок в зависимости от диаметра частиц

| Процесс | d = 1,0–1,6 мм | d = 2,5–3,0 мм |
|---------------------|----------------|----------------|
| Древесные опилки | | |
| Псевдоожигение | 0,3–0,4 м/с | 0,5–0,8 м/с |
| Вынос | 0,6–0,8 м/с | 0,9–1,5 м/с |
| Лужга подсолнечника | | |
| Псевдоожигение | 0,3–0,5 м/с | 0,5–0,7 м/с |
| Вынос | 0,8–0,9 м/с | 0,9–1,2 м/с |

ход газа, проходящего через реактор, устанавливается регулируемыми игольчатыми вентилями, размещенными на входе в реактор, а его измерение — ротаметрами на выходе из реактора. Исследуемые образцы подаются через тракт подачи топлива, состоящий из бункера и шлюза.

Запись данных на компьютер по динамике изменения температур в реакторе осуществляется на основании показаний ХА-термопары, расположенной внутри реактора. «Королек» термопары находится на расстоянии 3–5 мм от газораспределительной решетки, позволяя измерять температуру слоя исследуемого материала.

Компонентный состав продуктов сгорания CO, CO₂, O₂ и NO_x измеряется ИК-газоанализатором непрерывного действия «ULTRAMAT-23» немецкой фирмы Siemens.

В ходе проведения экспериментов в реакторе устанавливалась температура 900 °С, расход воздуха G = 1,0–1,2 л/мин.

По результатам предварительных экспериментов на холодной модели, целью которых было определение расхода воздуха для создания условий витания лужги или опилок, было выявлено следующее. Увеличение расхода воздуха не приводило к ожигению частичек материала в реакторе до некоторого порогового значения: частицы образовывали фильтрационный слабо подвижный слой. После достижения критического значения расхода (линейной скорости) происходил интенсивный вынос частиц из реактора. Результаты этих исследований представлены в табл.2.

Таким образом, лужга подсолнечника и древесные опилки относятся к материалам группы А, которые не способны к псевдоожигению в отсутствие слоеобразующего материала. В дальнейших опытах по изучению динамики выгорания частиц лужги в качестве слоеобразующего инертного материала использовалась предварительно отоженная при t = 950 °С зола мелкой фракции (d = 0,40–0,63 мм). Ее использование позволило организовать интенсивное перемешивание частиц лужги или опилок в реакционной зоне и связанное с этим условие равномерного

доступа кислорода воздуха к топливным частицам. При такой организации процесса удалось избежать градиентов концентрации продуктов реакции по слою, а следовательно, диффузионного торможения и неоднозначности, возникающей из-за неконтролируемого уноса недогоревшего материала из реакционной зоны из-за отсутствия в нем золы.

При проведении экспериментов расход воздуха выбирался, исходя из условия псевдоожигения указанных фракций частиц золы, а количество лужги или опилок в одной засыпке — по условию отсутствия диффузионного торможения (уровень кислорода в продуктах сгорания не менее 4 %).

Эксперимент проводился следующим образом. Реактор разогревался до заданной температуры (t = 900 °С), и устанавливался требуемый расход газа-реагента (G = 1,0–1,2 л/мин). Затем в реактор через тракт подачи топлива засыпалась смесь, состоящая из 0,1 г лужги или опилок и 1,0 г золы. Попадая в реактор, смесь воспламенялась, повышая температуру слоя. При проведении измерений обеспечивались непрерывный контроль и запись данных в виде зависимостей температуры от времени внутри реактора t = f(τ) (динамические кривые) и фиксировались максимальные значения компонентного состава отходящих газов CO, CO₂, O₂ и NO_x. После снижения температуры до исходного значения регистрация данных прекращалась, выгоревший образец через циклон выводился из установки.

Для получения динамической кривой выгорания на каждом образце проводилось не менее трех опытов.

Типичная динамическая кривая выгорания t = f(τ) дискретной навески лужги подсолнечника для условий естественной влажности и максимального размера частиц при атмосферном давлении и температуре 900 °С представлена на рис.1. В сопоставительных экспериментах масса навески лужги (m = 0,1 г) оставалась постоянной.

Из рис.1 видно, что динамическая кривая по температуре имеет два отличительных экстремальных участка (пика): первый соответствует выгоранию летучих, второй — выгоранию коксового остатка. Первый пик, с меньшим ин-

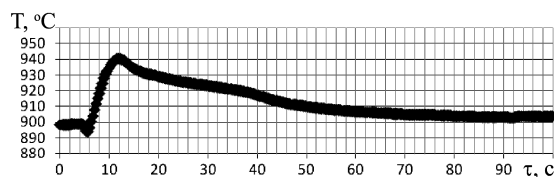


Рис.1. Динамика выгорания лужги подсолнечника (d = 2,5–3,0 мм, W = 10,5 %).

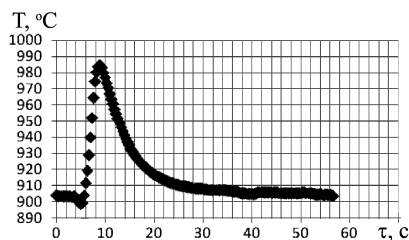


Рис. 2. Динамика выгорания древесных опилок ($d = 2,5-3,0$ мм, $W = 12,5\%$).

тервалом времени, имеет ярко выраженный максимум, величина которого резко снижается и выходит на плавную спадающую ветвь, соответствующую выгоранию коксового остатка. Второй пик реализуется в течение более длительного временного интервала. Этот пик становится заметным при размере частиц более 1,6 мм. Условно точка перегиба кривой может быть выбрана для разграничения окончания стадии выгорания летучих и начала выгорания коксового остатка.

Увеличение размера частиц лужги при одинаковой влажности образцов слабо влияет на амплитуду и продолжительность первого пика, то есть выхода летучих, а величина пика, который соответствует выгоранию коксового остатка, и его продолжительность возрастают, увеличивая тем самым общее время выгорания образца.

Наилучшие показатели выгорания (максимальные всплески температур и минимальная продолжительность импульсов) были получены при влажности $W_r = 10,5\%$. С уменьшением влажности процесс горения заметно ухудшался. Всплески температур у образцов с $W_r = 0,5\%$ были на $10-20\text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем у образцов с $W_r = 10,2\%$. Это можно объяснить двумя причинами. Первая заключается в том, что при попадании частицы топлива в зону с высокой температурой происходит интенсивное испарение влаги, находящейся в порах. Поры под воздействием высокого давления образовавшегося пара разрушаются, увеличивая реагирующую поверхность и соответственно скорость реакции.

Другой причиной улучшения горения может быть повышение скорости горения СО — одного из первичных продуктов реакции гетерогенного горения в присутствии водяного пара. Механизм этого процесса подробно рассмотрен в теории цепных реакций [3], который заключается в снижении энергии активации стадий горения, проходящих с участием радикалов Н и ОН. Повышение скорости горения «влажного» СО по сравнению с «сухим» на 2–3 порядка переводит зону гомогенного горения из объема слоя в окрестности частиц, что повышает ее температуру и в целом увеличивает скорость горения. Величину вклада каждого из этих процессов определить затруднительно, но в любом случае оба эти фактора приводят к улучшению горения.

Повышенная влажность частиц ($W_r = 25\%$) приводила к тому, что значительная часть теплоты, выделившейся при горении летучих, расходовалась на испарение влаги. Максимум пика выгорания летучих снижался на $20-30\text{ }^\circ\text{C}$, а суммарное время выгорания навески увеличивалось на 8–12 с.

Время выгорания летучих при влажности материала $0,5-10,2\%$ находилось в пределах 6–8 с. Время выгорания летучих при влажности 25% определить затруднительно из-за слияния пиков выгорания летучих и коксового остатка. Общее время выгорания дискретной засыпки для всех образцов лужги находилось в пределах 44–72 с.

Состав продуктов сгорания лужги: СО = $3,5-5,2\%$; $\text{CO}_2 = 14,8-16,5\%$; $\text{O}_2 = 3,8-4,6\%$; $\text{NO}_x = 235-250\text{ мг/м}^3$.

Типичная динамическая кривая выгорания $t = f(\tau)$ навески древесных опилок при исходной влажности и размере частиц $2,5-3,0$ мм представлена на рис. 2.

Опыты, проводимые с опилками, позволили заключить следующее. Как и в случае с лужгой, процесс горения высушенных до $W_r = 0,5\%$ частиц опилок был хуже, чем у опилок с влажностью $W_r = 12,5\%$. Максимум пика выгорания летучих у сухих опилок был на $20-25\text{ }^\circ\text{C}$ ниже, чем у опилок с влажностью $W_r = 12,5\%$.

Увеличение влажности материала до 25% также отрицательно сказывалось на процессе горения. Расход теплоты на испарение влаги в момент вбрасывания засыпки в реактор приводил к охлаждению слоя на $20-35\text{ }^\circ\text{C}$. Общее время выгорания влажных опилок увеличивалось на 15–25 с по сравнению со временем выгорания опилок, имеющих влажность $W_r = 12,5\%$.

Пик, соответствующий выгоранию коксового остатка, менее выражен, чем у лужги, и становится заметен лишь при размере частиц $2,5-3,0$ мм, что, по-видимому, следует объяснить меньшей плотностью древесины по сравнению с лужгой и, следовательно, более быстрым выделением влаги и летучих из тела частицы.

Общее время выгорания образцов древесных опилок в зависимости от влажности и размера частиц находилось в пределах 24–60 с.

Состав продуктов сгорания опилок мало отличался от состава при сгорании лужги: СО = $4,1-5,0\%$; $\text{CO}_2 = 15,3-17,8\%$; $\text{O}_2 = 3,6-4,2\%$; $\text{NO}_x = 230-250\text{ мг/м}^3$.

Обобщенные результаты исследований приведены на рис. 3. Полученные данные могут быть использованы при проектировании топочных устройств тепловых агрегатов (печей, котлов), для которых одним из определяющих па-

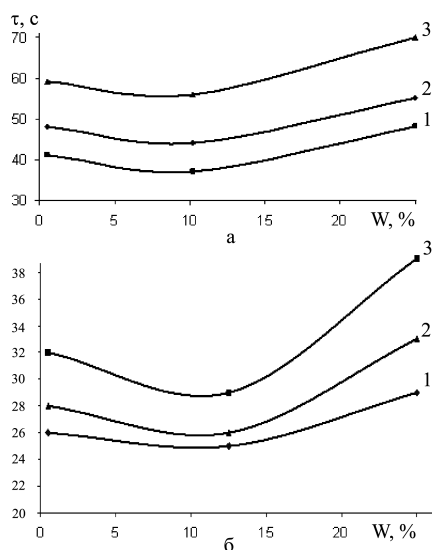


Рис.3. Зависимость времени выгорания лузги подсолнечника (а) и древесных опилок (б) от влажности и диаметра частиц, мм: 1 – 1,30; 2 – 2,05; 3 – 2,75.

раметров является время пребывания частиц топлива в топочном объеме. В частности, использование этих данных поможет решить вопрос о необходимости установок в топочном объеме рециркуляционного контура, устройства или циклонного предтопка.

Выводы

Получены динамические кривые температуры при выгорании дискретных навесок лузги подсолнечника и древесных опилок в кислороде воздуха при атмосферном давлении и температуре 900 °С.

Оценено характерное время стадий выхода и выгорания летучих, а также выгорания коксового остатка лузги подсолнечника и древесных

опилок. Так, время выгорания летучих лузги подсолнечника составляет 6–8 с. Точное время выгорания летучих древесных опилок установить не удалось. Общее время выгорания лузги подсолнечника в зависимости от влажности составляет 44–72 с. Общее время выгорания древесных опилок составляет 24–60 с.

Наилучшими характеристиками горения (минимальное время выгорания, достижение максимальной температуры горения) обладают лузга и опилки естественно-воздушной сушки ($W_r = 10\text{--}12\%$).

Повышенная влажность сжигаемого материала приводит к значительному охлаждению слоя и увеличению на 30–40 % общего времени выгорания.

Увеличение размера частиц приводит к увеличению времени выгорания только за счет выгорания коксового остатка.

Доминирующим процессом, вносящим основной вклад в полное время выгорания частиц лузги и опилок, является процесс выгорания коксового остатка. В связи с этим для определения оптимальных режимов их сжигания в промышленных аппаратах представляется целесообразным исследование именно стадии выгорания коксового остатка и связанных с ним характеристик процесса.

Список литературы

1. Камнева А.И., Платонов В.В. Теоретические основы химической технологии горючих ископаемых. — М. : Химия, 1990. — 288 с.
2. Головина Е.С. Высокотемпературное горение и газификация углерода. — М. : Энергоатомиздат, 1983. — 173 с.
3. Померанцев В.В., Арефьев К.М., Ахмедов Л.Б. и др. Основы практической теории горения. — Л. : Энергоатомиздат, 1986. — 312 с.

Поступила в редакцию 01.04.10

The Research of Sawdust and Sunflower Husks Burn-out Time Dynamic in Fluidized Bed

Karp I.N.¹, Provalov A.Y.², Pyanych K.E.¹, Yudin A.S.¹

¹ The Gas Institute of NASU, Kiev

² Institute of Coal Energy and Technology of NASU, Kiev

The burn-out time of sawdust and sunflower husks particles in a range of humidity 0,5–2,5 % and particles dimensions 1,0–3,0 mm is defined. It is shown, that minimal burn-out time and maximal combustion temperature are reached if fuel is of naturally-air drying ($W_r = 10\text{--}12\%$). Both increased and decreased humidity leads to burn-out time increasing. Particles dimensions increasing leads to burn-out time increasing only on account of coke remainder combustion time. The investigation results can be used at a combustion chambers for alternative fuels engineering.

Key words: burn-out time, sawdust, sunflower husks, humidity, particles dimensions.

Received April 1, 2010