

УДК 621.311.502

А.Р. СЕМЕНЕЙ, аспирант НТУ «ХПИ»

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ ПИРОЛИЗНОГО ТИПА

На основе имеющейся в литературе информации и результатах собственных экспериментальных исследований сформирована физическая модель теплофизических процессов в предложенном автором теплогенераторе пиролизного типа.

Ключевые слова: теплогенератор, пиролиз, кинетика, деструкция биомассы, эксперимент.

Введение. Постоянный рост стоимости природного газа и стремление в этой связи сократить его расходы за счет использования запасов возобновляемых источников энергии определил актуальность комплекса задач, связанных, в частности, с газификацией органических отходов в разного рода теплоутилизационных устройствах пиролизного типа. Однако, несмотря на давнюю историю развития знаний о термическом разложении топлива в условиях дефицита окислителя, получившего название пиролиза (первичные знания об этом относятся к началу 19 века) и большое разнообразие форм технической реализации этого процесса в разнообразных теплотехнологиях возможности существующих методов расчета соответствующих инженерных объектов остаются достаточно ограниченными. Прежде всего, это обусловлено тем, что пиролиз является весьма сложным многофакторным теплофизическим и термохимическим процессом, универсального аналитического описания которого не существует.

Анализ публикаций. В зависимости от физических свойств сырья, его структуры, температуры, давления, концентрации кислорода в рабочем пространстве (печи, колонны, реторты и т.д.) пиролиз протекает столь различным образом, что в ряде случаев оставляет неоднозначным даже температурный уровень начала процесса термического разложения вещества. Так, полагают [1, 2], что пиролиз сложных органических соединений биологического происхождения начинается при температурах, близких к 100 °С, разложение основных веществ древесины начинается при температуре около 200 °С, однако главные реакции идут при (400–800) °С [3, 4]. В некоторых случаях (при использовании электрических плазмогенераторов) пиролиз органического сырья проводят при (1300–1800) °С. В основном более или менее обоснованные методики расчета известны для случаев, когда органическое вещество, подвергающееся термическому разложению, находится в виде некой упорядоченной структуры. Это гранулы либо тонко диспергированная среда с известным распределением частиц по размерам, сформированная в результате предварительного механического дробления, либо модельные дискретные элементы топлива правильной геометрической формы [5]. Вместе с тем, специальная подготовка твердого топлива либо органических отходов производства и сельского хозяйства перед загрузкой в пиролизный теплогенератор требует существенных дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат. В ряде случаев, особенно в условиях утилизации древесных отходов (доски, щепы, шпалы, отходы мебельного производства) при утилизации отходов сельского хозяйства и отработавших автомобильных шин и покрышек – такой возможности для предварительной местной подготовки сырья часто вовсе не существует.

© А.Р. Семеней, 2013

Постановка задачі. Аналіз показав, що саме нерегулярний характер структури матеріала, піддаючогося піролізу, створює (помімо прочого) основні труднощі при формуванні відповідних математических моделей як основи для побудови методик інженерного розрахунку та оптимізації режимно-геометрических характеристик створюваного апарату. В зв'язі з цим розглянемо певну фізическу модель процесів в теплогенераторі піролізного типу (ТПТ).

Основна частина. Підприємством «Глобал технолоджи» розроблена та запатентована [6] «Установка для піролізної переробки вуглеродсодержащого сиров'язь», призначена для енергетическої конверсії біологіческих відходів будь-якої природи, а також легких пластиків, відходів нафтехламов, целюлозних виробів, автомобільних покриттів та т.д.

Одним із переваг цього теплогенератора піролізного типу є його «всезадність» відносно біологіческої природи, геометрическої структури сиров'язь та широкого діапазону його первинної вологості, що підтверджується цілим рядом випробувань та практическим використанням агрегату в реальних умовах його роботи [7]. При цьому основні енерго-екологіческі характеристики ТПТ, як і інші особливості, підлягають спеціальній інспекторській перевірці, виявилися повністю відповідними сучасним нормам, вимогам та правилам експлуатації.

Враховуючи це, саме універсальність агрегату в частині характеру використовуваного паливного сиров'язь в реальних умовах роботи створює ряд труднощів при формуванні математическої моделі процесів в ТПТ як основи для подальшого підвищення його ефективності. Загальна схема ТПТ показана на рис. 1.

Основними блоками ТПТ є піролізна камера (ПК) 13, піролізна плита (ПП) 5 та камера згорання піролізного газу (КС) 6, розташована всередині обмуровки 7. Через завантажувально-розвантажувальний люк 2 в ПК подається відповідна партія біомаси, після розжигу якої люк 2 закривається до моменту наступної дискретної завантажки. Через патрубок 1 надходить зовнішній повітря, рух якого забезпечується вентилятором-димососом на виході з блоку утилізації продуктів згорання піролізного газу, забезпечуючого нагрів або повітря як сушильного агента, або води при гарячому водопостачанні. За рахунок частичного використання теплоти, виділеної в ПК, зовнішній повітря попередньо нагрівається в каналі 11 між обшивкою агрегату 4 та зовнішньою поверхнею склепіння 12 та через систему отворів 3 з двох сторін надходить в ПК. Піролізний газ, утворений в результаті терміческого розкладання біомаси, через канал 9 в піролізній плиті надходить в КС. Утворені в КС продукти згорання піролізного газу через борони газоходу 8 надходять до теплопотребителя.

В нашій роботі [8] була здійснена спроба на основі *CFD* підходу, отримавши широке застосування для аналізу процесів горіння в різних огнетехніческих пристроях, побудувати модель терміческого розкладання деревини в ТПТ заданої (рис. 1) схемно-функціональної конфігурації.

Незважаючи на те, що результати математического моделювання [8] задовільно відобразили загальну якісну картину процесів та в певній мірі їх кількісні характеристики, виявилось, що нам бракувало більш глибокої деталізації представлень про фізическу модель процесів, супроводжуваних піролізом в ПК та горінням піролізного газу в КС. В даний час для опису процесів горіння використовуються різні математическі моделі, серед яких, на нашу думку, найбільш перспективною для аналізу процесів в печах є вихрева дисипативна модель (*Eddy-Dissipation Model*).

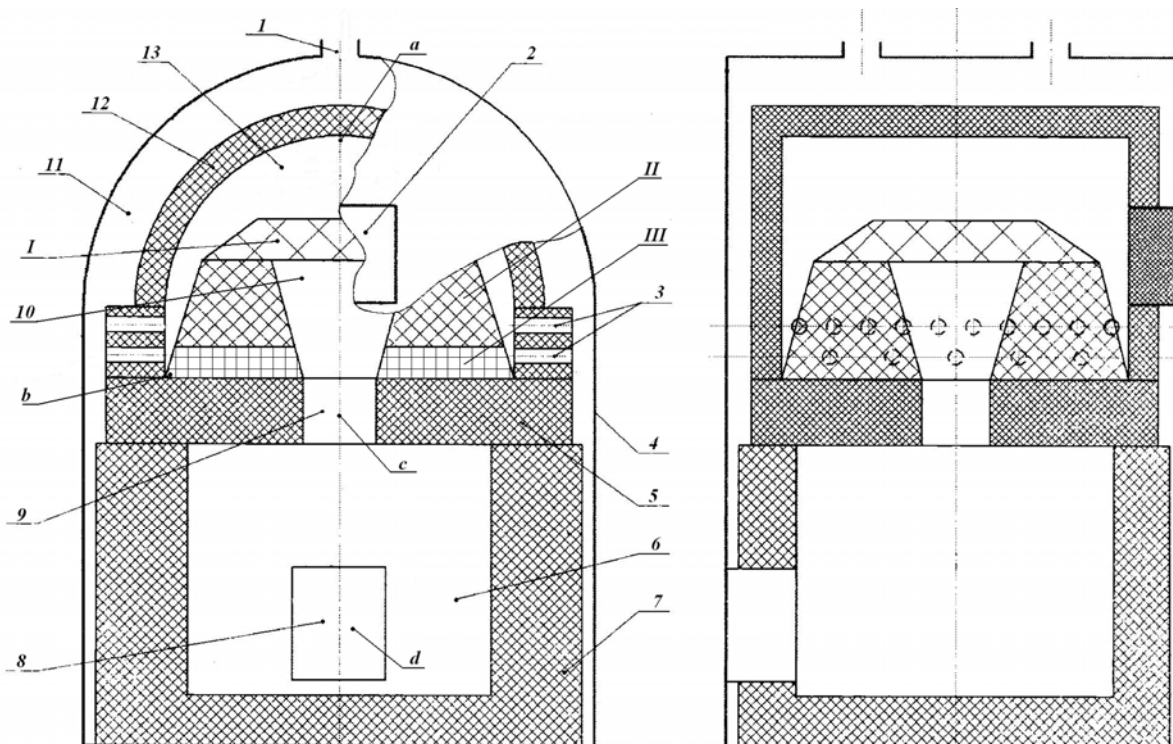


Рис. 1 – Общая схема теплогенератора пиролизного типа:

- I* – слой свежих порций дискретно забрасываемой древесины; *III* – слой древесного угля;
- II* – промежуточный слой, в котором присутствуют элементы *I* и *III* слоев;
- 1* – патрубок; *2* – загрузочно-разгрузочный люк; *3* – система отверстий;
- 4* – обшивка агрегата; *5* – пиролизная плита (ПП); *6* – камера сгорания пиролизного газа (КС);
- 7* – обмуровка; *8* – боров газохода; *9* – канал в пиролизной плите; *10* – кратер;
- 11* – канал; *12* – наружная поверхность свода; *13* – пиролизная камера (ПК)

Главная идея этой модели состоит в том, что скорость химической реакции горения определяется турбулентностью, и поэтому расчеты химической кинетики в соответствии с законом Арениуса не проводятся. За счет турбулентности происходит смешение топлива с окислителем и их перемещение в зону реакции, где происходит горение. Таким образом, скорость реакции определяется скоростью перемещения реагентов.

Отмеченная особенность этого модельного представления побудила автора выяснить некоторые гидродинамические характеристики взаимодействия слоя первичного сырья с воздухом, подаваемым в камеру пиролиза. С этой целью на первом этапе холодных продувок проводились измерения распределения давлений в пиролизной камере, загруженной отходами древесных пиломатериалов со средним размером отдельных элементов $120 \times 20 \times 4$ см.

Для имитации убыли сырья в процессе его выгорания в ПК загружались поочередно 70, 140 и 210 кг древесины, а с помощью частотного регулирования привода вентилятора при каждой из этих навесок измерялся расход воздуха, проходящего в КП от некоторого минимального уровня, равного $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ до максимума – $9150 \text{ м}^3/\text{ч}$.

С помощью электронных микроманометров измерялись перепады давления ΔP_{ad} и ΔP_{bd} . Здесь индексы при ΔP обозначают разности давлений между соответствующими точками *a*, *b*, *c* и *d*, показанными на схеме теплогенератора (рис. 1).

Результаты измерений представлены на рис. 2, из которого следует, что при существенном изменении массы загрузки и на всех режимах работы вентилятора гидравлическим сопротивлением слоя древесных отходов можно пренебречь, т.к. изменение ΔP при этом не превышает ± 5 Па. Результат, аналогичный данным рис. 2, оказался справедливым и для перепадов ΔP_{ac} , ΔP_{bc} и ΔP_{cd} .

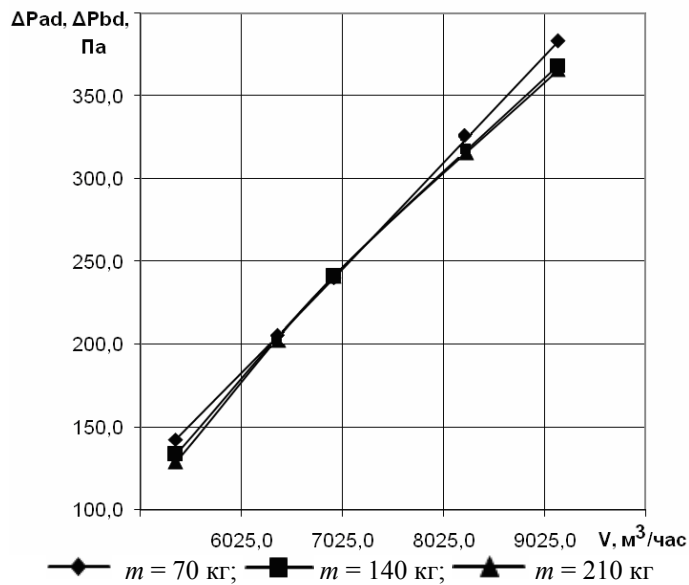


Рис. 2 – Зависимость перепадов давления от расхода воздуха

ширине 1,38 м и общем расходе воздуха через левые и правые каналы 9000 м³/ч, средняя скорость воздуха в слое (при его «пористости» 63 %) составит не более 2,5 м/с. С учетом известной зависимости [9] падения давления в канале от его геометрии, скорости и плотности потока воздуха, становятся понятными пренебрежимо малые изменения величины ΔP при различной загрузке ПК от 70 до 210 кг.

Представленная замена реального объемного слоя древесных отходов некой формально-упорядоченной структурой с известной пористостью и соответствующие изменения падения давления в этом слое позволяют в дальнейшем исследовании считать приемлемым допущение об аэродинамической прозрачности слоя древесины на первой стадии его термического разложения, когда происходит лишь выход газопаровых летучих веществ. В свою очередь, при столь малой скорости течения газовой среды сквозь слой древесных отходов трудно отдать предпочтение влиянию турбулентного переноса в качестве определяющего фактора.

Как известно [10], выгорание топливной частицы представляет собой сложный термохимический процесс, который лишь условно в общей кинетике окисления можно разделить на отдельные последовательные стадии. В этом смысле интерес представляет работа [5], выполненная учеными Института газа НАН Украины, в которой представлена математическая модель кинетики выгорания одиночной древесной частицы. При этом проведено детальное численное исследование стадий разогрева, удаления влаги, выделения и сгорания летучих компонентов и горения углеродного остатка частицы. Результаты расчета по предложенной модели удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента [11] тех же авторов. Не вдаваясь в подробности структуры математической модели, следует лишь отметить, что механизм турбулентного тепло- и массопереноса в работе [5] не рассматривался и в качестве определяющих фигурировали процессы нестационарной теплопроводности, испарения

При плотности древесины (сосна) 546 кг/м³, массе максимальной навески, загружаемой в ПК – 210 кг, площади ПК над пиролизной плитой 1,9 м² и измеренной высоте слоя древесных отходов 0,55 м легко показать, что объем пустот этого слоя составляет 63 %. Если боковую поверхность слоя, через которую поступает воздух, из каналов 3 (см. рис. 1) приближенно представить, как некое «сито», через которое половина объемного расхода воздуха далее уходит сквозь слой в канал пиролизной плиты 9, то при высоте слоя 0,55 м, его

и радиационного воздействия с учетом поверхностной и внутренней пористости частицы.

Очевидно, что слоевое выгорание древесных отходов произвольной геометрической формы на пиролизной плите ТПТ, рассматриваемое в нашей работе, представляет собой существенно более сложный теплофизический процесс, в котором весь комплекс явлений, сопровождающих горение одиночной частицы, осложнен целым рядом дополнительных, трудно поддающихся математическому моделированию реальных обменных процессов на внешних поверхностях древесных элементов и в слое. Это – уже упомянутое разнообразие геометрии отдельных элементов древесины, нерегулярность общей структуры слоя, неравномерность распределения его порозности и связанная с этим неопределенность ориентации плоскости элементов в пространстве. Последнее (не менее осложняющее моделирование) приводит к существенно неравномерному распределению потоков окислителя (воздуха) в слое, а, следовательно, должно вызывать неравномерность интенсивности термического разложения топлива. С учетом последнего осложняется возможность расчетной оценки эффекта теплопередачи от сгорающих при температуре (1000–1200) °С продуктов пиролиза в КС к среде в ПК, разделенных пиролизной плитой. К сказанному следует добавить такие факторы, как изменение формы древесных (или другой природы) элементов в процессе пиролиза, экранирующее влияние оттока водяных паров на стадии высушивания древесины, переменную степень ее черноты и теплофизических свойств, немонотонное (в отличие от распространенной в литературе точки зрения) влияние влажности сырья в процессе пиролиза. Если всю совокупность объема древесных отходов (см. рис. 1) рассматривать в виде трех условных слоев, где *I* – это слой свежих порций дискретно забрасываемой древесины, *III* – слой древесного угля и *II* – промежуточный слой, в котором присутствуют элементы *I* и *III* слоев, то уже на этой стадии абстрагирования возникает трудно моделируемый эффект радиационно-конвективного взаимодействия между слоями с одной стороны и внутренней поверхностью камеры пиролиза – с другой. Очевидно, что дополнительные трудности при моделировании создают и труднопрогнозируемые эффекты взаимного влияния практически всех перечисленных выше факторов.

Изложенная (возможно, далеко не полная) физическая картина процессов в рассматриваемом теплогенераторе позволяет предположить, что перспектива моделирования с установлением прогнозируемых количественных характеристик работы аппарата возможна (в отличие от методов, справедливых для отдельной частицы структурированного топлива) лишь с использованием неких феноменологических подходов, не требующих информации обо всей совокупности внутренних элементарных актов обменных термохимических процессов. Анализ литературных источников и некоторые факты, установленные в наших экспериментах [12], позволяют считать, что неким интегральным эффектом протекания всех внутренних взаимодействующих процессов, сопровождающих пиролиз, является скорость выгорания общей массы сырья, загруженного в аппарат.

На рис. 3 и 4 представлены некоторые результаты опытов [12], полученные при испытаниях ТПТ, когда в качестве топлива использовались отходы древесины (сосновые доски с размерами 1,2×0,18×0,03 м), влажность которых составляла (25–35) %.

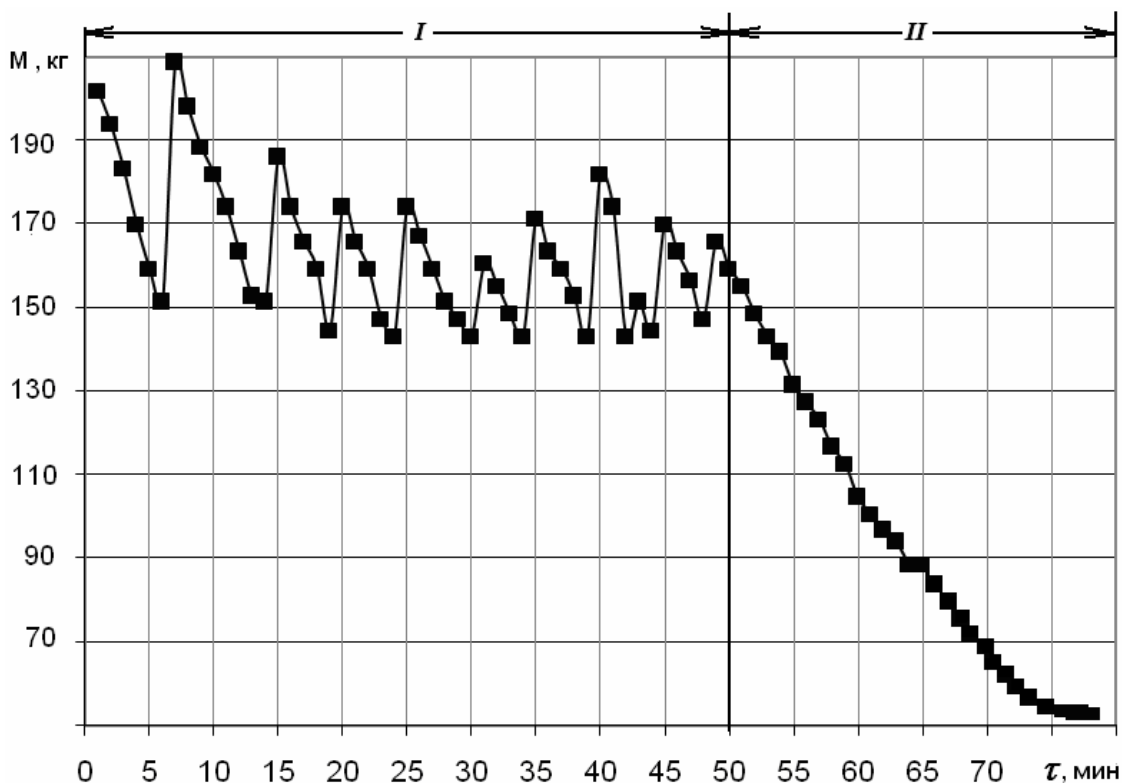


Рис. 3 – Изменение массы топлива в процессе его выгорания в пиролизной камере

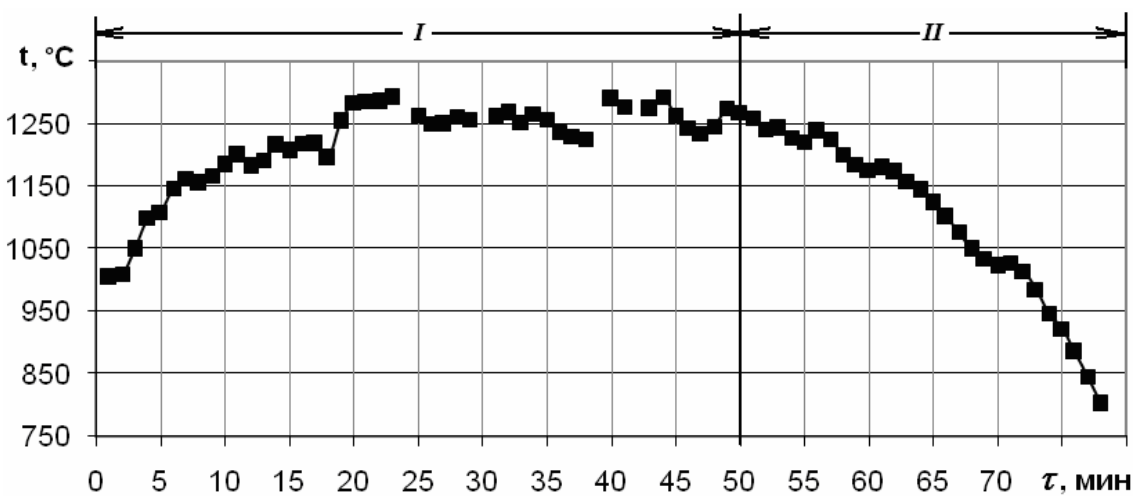


Рис. 4 – Температура продуктов сгорания на выходе из КС

Ети результати на I етапі (рис. 3, 4) отримані при стабілізованому тепловому стані ТПТ і відображають динаміку вигорання палива, дискретно подаваного в ПК. В ході проведення експеримента середня температура в піролізній камері складала (500–550) °C, а температура горіння піролізного газу змінювалась в відповідності з графіком рис. 4. Из рис. 3 видно, що маса окремих порцій завантаження на I етапі складала від 40 до 20 кг при зміні загальної маси палива і утвореного деревного вугілля (перед кожною завантаженням) від 210 до 140 кг. Як слід з графіка, періодичність завантаження, встановлена практикою експлуатації, складала від 7 до 10 хвилин, що, з урахуванням теплової інерційності огнеупорной

обмуровки ТПТ, забезпечувало (рис. 4) достаточний устійний рівень температури газів (1150–1250 °С) на виході з камери згорання.

Если исключить период от 40 до 47 минуты, связанный с некоторым сбоем в регулярности ручной загрузки пиролизной камеры, то легко видеть, что угол наклона кривых выгорания остается практически одинаковым, что свидетельствует о практически одинаковой скорости выгорания, которая в среднем составляла 0,055 кг/с в течение всего времени между очередными загрузками. Это с известной степенью приближения можно объяснить следующим. Всю высоту слоя, подвергающегося термическому разложению в ПК (см. рис. 1) можно представить в виде трех основных слоев. Первый – слой *I* «свежей» заброшенной порции, в котором реализуются стадии нагрева древесины, ее высушивания и инициирования выхода летучих. В *III* слое – идет выгорание коксового остатка (древесного угля). Во *II* слое – происходит и дальнейшее выпаривания свободной и связанной влаги из глубинных слоев древесины, и дальнейший выход летучих веществ (внутренний пиролиз), горение летучих, а также поверхностное обугливание отдельных фрагментов. В этой связи следует отметить, что локальные скорости убыли массы древесины в каждой точке экспериментальной зависимости на рис. 3 отражают эффект всех стадий термической деструкции во всех трех слоях – одновременно. Это, на первый взгляд, очевидное утверждение определяет существенное отличие динамики процесса при слоевом сжигании от динамики выгорания отдельных частиц, рассмотренной в работах [3, 5, 11]. При дальнейшей попытке формирования соответствующих математических моделей выгорания в пиролизной камере ТПТ эта особенность процессов в слое является весьма существенной. Как показано в [5, 11], доминирующим процессом, определяющим основной вклад в полное время выгорания, является выгорание коксового остатка. В связи с этим рассмотрим участок динамической кривой *II* на рис. 3. Это была завершающая фаза эксперимента, когда «свежие» порции топлива не забрасывались, и процесс шел как выгорание уже присутствующего в ПК объема углеводородного остатка. Визуальные наблюдения показали, что к 70–80-й минуте в ПК образовался слой выгорающего древесного угля. При этом средняя скорость выгорания, найденная во *II* периоде, составляет от 0,066 (в период от 50-й до 65-й минуты) до 0,022 кг/с – в период от 65-й до 80-й минуты. Это хорошо согласуется даже с относительной продолжительностью периодов при разложении одиночной древесной частицы [5, 11].

Некоторой дополнительной информацией в общей физической модели, которая в дальнейшем также может служить исходной при разработке расчетной математической модели процессов в ТПТ, является ожидаемая высота трех основных слоев общего объема материала в ПК. В соответствии с кривой выгорания (*II* стадия, рис. 3) остаток тлеющего древесного угля при 210 кг общей массы в ПК составляет около 40 кг, а масса загрузки свежей древесины – порядка 40 кг. С учетом насыпной плотности сосновых досок 250–300 кг/м³ и плотности древесного угля 190 кг/м³ при площади пиролизной плиты 1,9 м² высота слоя «свежей» древесины составит примерно 0,1 м, высота угольного слоя – 0,150 м и при общей (визуально определенной) высоте содержимого порядка 0,6 м высота промежуточного слоя равна 0,35 м.

Кроме этого, визуальными наблюдениями в период перезагрузки ПК удалось обнаружить, что над каналом в пиролизной плите и до уровня свежеступившего сырья образуется своеобразный кратер *10*, схематично показанный на рис. 1. Это представляется существенным с точки зрения гидродинамики взаимодействия топлива с воздухом и условий радиационно-конвективного теплообмена.

Выводы

1 Анализ имеющихся результатов исследования пиролизного сжигания твердых органических отходов (древесина, солома, лузга и т.п.) показал, что в настоящее время нет достаточных экспериментально-теоретических исследований, позволяющих обоснованно учесть всю многофакторность термохимических процессов при слоевом характере термической деструкции сырья.

2 На основе экспериментальных испытаний предложенной автором конструкции теплогенератора пиролизного типа сформирована физическая модель слоевого пиролиза древесных отходов, отражающая кинетику всех стадий процесса.

3 Полученные результаты представляют комплекс исходных данных и обоснованных допущений как основы для последующего математического моделирования с разработкой инженерной методики расчета аппарата.

Список литературы: 1. Левин, Э.Д. Теоретические основы производства древесного угля [Текст] / Э.Д. Левин. – М.: Лесная промышленность, 1980. – 153 с. 2. Фенгель, Д. Древесина: химия, ультраструктура, реакции [Текст] / Д. Фенгель, Г. Вегенер. – М.: Лесная промышленность, 1996. – 347 с. 3. Золотовська, О.В. Моделювання теплообміну в камері піролізу [Текст] / О.В. Золотовська // Вісник Дніпропетровського Державного аграрного університету. – 2010. – № 4. – С. 75-80. 4. Чирков, В.Г. Учет теплофизических свойств при оценке производительности процесса пиролиза растительной биомассы [Текст] / В.Г. Чирков, Э.Ф. Вайнштейн // Труды 4-й Международной научно-технической конференции (12-13 мая 2004 г. Москва, ГНУ ВИЭСХ). – Ч. 4. – С. 245-251. 5. Карп, И.Н. Математическое моделирование процесса сгорания древесной частицы [Текст] / И.Н. Карп, В.В. Колесник, В.Н. Орлик, К.Е. Пьяных, А.С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 5. – С. 13-20. 6. Патент 42719 Україна. Установка для піролізної переробки вугленізмистої сировини / Циганков І.Ю., Люберцев С.В., Семеней О.Р.; Заявник та патентовласник НТУ «ХП». – № 99020889; опубл. 10.07.09. 7. Семеней, А.Р. Результаты испытаний и промышленного внедрения теплогенераторов пиролизного типа [Текст] / А.Р. Семеней // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2013. – № 2(108). – С. 2-10. 8. Семеней, А.Р. Модель термогидравлических процессов в теплогенераторе пиролизного типа [Текст] / А.Р. Семеней, А.И. Тарасов, Э.Г. Братута // Интегровані технології та енергозбереження. – 2011. – № 3. – С. 44-47. 9. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям [Текст] / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с. 10. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения [Текст] / В.В. Померанцев, К.И. Арефьев, Д.Б. Ахмедов [и др.]. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с. 11. Карп, И.Н. Исследование динамики выгорания древесных опилок и лузги подсолнечника в кипящем слое [Текст] / И.Н. Карп, А.Ю. Провалов, К.Е. Пьяных, А.С. Юдин // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – № 3. – С. 9-13. 12. Семеней, А.Р. Методика оценки эффективности теплогенератора пиролизного типа в нестационарном режиме эксплуатации [Текст] / А.Р. Семеней, Э.Г. Братута // Интегровані технології та енергозбереження. – 2010. – № 4. – С. 19-22.

Поступила в редколлегию 15.02.13

УДК 621.311.502

Физическая модель процессов в теплогенераторе пиролизного типа [Текст] / А.Р. Семеней // Вісник НТУ «ХП». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – Х.: НТУ «ХП», 2013. – № 14(988). – С. 134-141. – Бібліогр.: 12 назв. – ISSN 2078-774X.

На підставі відомої з літератури інформації та результатів власних експериментальних досліджень сформовано фізичну модель теплофізичних процесів в запропонованому автором теплогенераторі піролізного типу.

Ключові слова: теплогенератор, піроліз, кінетика, деструкція біомаси, експеримент.

On the basis of an information existing in the literature and results of own experimental researches the physical model of thermophysical processes in the pyrolysis heat generator proposed by author is offered.

Keywords: steam generator, pyrolysis, kinetics, destruction of biomass, experiment.