

**МОДЕЛЬ ТЕРМОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ТЕПЛОГЕНЕРАТОРЕ ПИРОЛИЗНОГО ТИПА**

Несмотря на перспективность внедрения теплогенераторов пиролизного типа (ТПТ) [1–4] и использования этих устройств в различных технологиях, создание их в основном базируется на некоторых частных эмпирических данных без учета теплофизических особенностей биотоплива и взаимовлияний режимно-геометрических характеристик ТПТ. Очевидно, что такое состояние знаний в этой области не позволяет обобщенно, на основе современных способов оптимизации, повысить эффективность генерирования теплоты.

В тех случаях (возможно, наиболее перспективных) [3] когда теплогенератор является одним из блоков автономных мини теплоэлектростанций, необходимость в оптимизации ТПТ становится особо актуальной.

В связи с этим общей задачей исследования (часть результатов которого представлена в настоящей статье) является разработка на основе математического моделирования методики инженерного расчета ТПТ соответствующего параметрического ряда по теплопроизводительности с адаптацией к конкретному виду биотоплива.

Моделирование процессов в камерах пиролиза представляет собой достаточно сложную задачу в силу неопределенности условий протекания процессов во времени и пространстве. Известно, что пиролиз древесины (сухая перегонка древесины) происходит при нагревании до 450 °С без доступа воздуха с образованием газообразных и жидких (в т.ч. древесной смолы) продуктов, а также твердого остатка – древесного угля. При этом древесина разлагается на газообразные продукты (метан, СО, Н₂) и смолы, в состав которых входит фенол, вода, левоглюкозан, ароматические углеводороды и др. вещества.

В настоящее время для анализа процессов горения в различных огнетехнических устройствах широко применяют так называемый CFD подход, который основан на численном решении системы дифференциальных уравнений, состоящих из уравнений движения вязкой жидкости, уравнения энергии, а также дополнительных уравнений для транспорта компонент химических реакций и моделей турбулентности. Непосредственно для описания процессов горения используются различные математические модели, среди которых наибольший интерес для процессов в печах представляет вихревая диссипативная модель (Eddy-Dissipation Model). Главная идея данной модели заключается в том, что скорость химической реакции горения определяется турбулентностью и поэтому расчеты химической кинетики в соответствии законом Аррениуса не проводятся. За счет турбулентности происходит смешение топлива с окислителем и их перемещение в зону реакции, где они сгорают. Таким образом, скорость реакции определяется скоростью перемешивания реагентов.

Непосредственное применение вихревой диссипативной модели для пиролиза древесины не возможно. Поэтому в настоящей работе рассматривается ряд допущений, позволяющих проводить инженерный анализ в пиролизных камерах.

Предметом анализа в данной работе является теплогенератор (рис. 1), состоящий из двух блоков: камеры пиролиза 1 и камеры дожигания пиролизного газа 2. Между камерами в пиролизной плите имеется канал 3 для перепуска пиролизного газа из верхней камеры в нижнюю. В пиролизную камеру загружается древесина, которая в конкретно рассмотренном объекте [4] занимает приблизительно 2/3 объема камеры (загрузочный проем на рисунке не показан). Выгорание 90 % древесины по данным предварительных испытаний [6] происходит примерно в течение 20 мин. Средний расход древесины составляет 0,12 кг/с. Первичный воздух поступает в полость между сводом печи и металлическим корпусом, нагревается и по каналам 4 попадает в камеру 1. Вторичный воздух поступает в камеру 2 через отверстие 5 и струя воздуха рассекает поток перетекающих газов из верхней камеры. Движение воздуха осуществляется за счет разрежения, создаваемого вентилятором-дымососом.

В зависимости от количества первичного воздуха возможны два основных варианта процесса. В первом варианте при ограниченной подаче наружного воздуха в верхней камере происходит термическое разложение топлива, т.е. пиролиз. Во втором варианте при избытке воздуха топливо горит в верхней камере, и дожигание выделившихся газов происходит в нижней камере.

Областями анализа являлись камеры 1 и 2 и система каналов для подвода воздуха, перепуска и отвода газов. Задача теплопроводности в стенках объекта не рассматривалась и, по сути, решалась задача газодинамики, теплообмена и горения газовой среды.

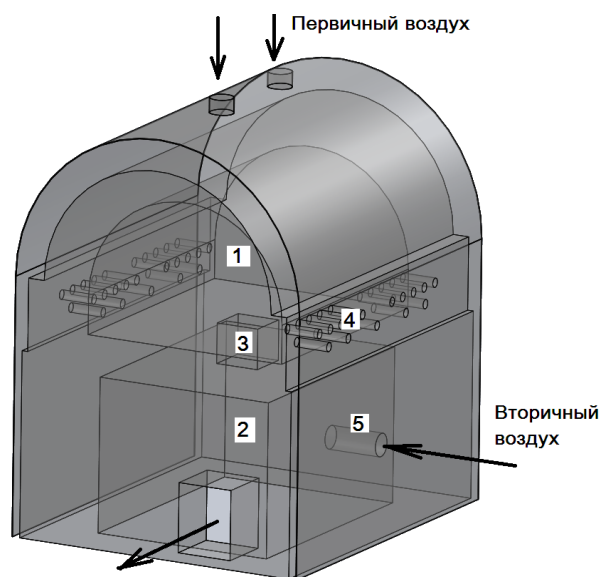


Рисунок 1 – Пиролизная печь

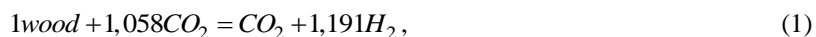
1 – верхняя (пиролизная) камера; 2 – нижняя камера дожига; 3 – канал перпуска пиролизного газа; 4 – каналы подачи первичного воздуха; 5 – канал подачи вторичного воздуха

Все вычисления выполнены в CFD пакете FLUENT (авторы благодарят компании ANSYS и ProcessFlow за возможность воспользоваться CFD-пакетом FLUENT). Расчетная сетка содержала приближенно 700 тысяч тетраэдральных и гексаэдральных элементов.

В общем случае размеры кусков дерева и их размещение в камере 1 может быть достаточно различным и меняющимся от загрузки к загрузке. Это существенно усложняет математическое описание процесса и заставляет использовать некоторые осредненные характеристики топлива. В связи с этим камера 1 условно рассматривалась заполненной некоторой пористой средой с пористостью 0,5 и коэффициентом сопротивления – 20. Эти значения в соответствии с [5] относятся к засыпке с размером частиц порядка 50 мм.

Предполагалось также, что в камере 1 происходит выделение летучих веществ, т.е. пиролизного газа. На самом деле в камере 1 происходит выделение и частичное горение пиролизного газа, а также горение твердого остатка. Моделирование столь сложного процесса невозможно и поэтому реальный процесс был заменен условным. При этом ставилась цель, чтобы в тепловом отношении оба процесса (реальный и условный) приближались друг к другу. Поэтому в качестве топлива задавалась древесная стружка.

Стехиометрическое уравнение горения стружки было задано в соответствии с рекомендациями FLUENT как



т.е. один моль древесины с некоторыми осредненными теплофизическими свойствами вступал в реакцию с 1,058 молями кислорода. Очевидно, что замена реальной древесины стружкой достаточно условна и поэтому необходим тщательный анализ такого перехода. В настоящей работе излагаются только первые результаты такого анализа.

Несмотря на значительное число работ по пиролизу, все они носят в основном описательный характер. Один из возможных подходов при моделировании предполагает использование зависимости скорости выхода горючих веществ от температуры. Опираясь на экспериментальные данные для рассматриваемой установки [6], удалось определить, что расход топлива, отнесенный к объему пиролизной камеры, составляет $0,067 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^3)$. Полагая также, что термическое разложение древесины, т.е. пиролиз, становится заметным при 450 К, было принято, что величина объемного источника горючих веществ m , $(\text{кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^3))$, может быть отражена зависимостями вида

$$\begin{aligned} m &= 0 && \text{при } T \leq 773; \\ m &= 120(T - 773) && \text{при } 773 < T \leq 1273 \\ m &= 0,06 && \text{при } T > 1273. \end{aligned} \quad (2)$$

Режим работы печи зависит от расходов первичного и вторичного воздуха, регулирование которыми осуществляется соответствующими заслонками.

Рассмотрим вначале режим с расходом первичного воздуха равным $G_1 = 0,058$ кг/с и вторичного – $G_2 = 0,376$ кг/с. При таком соотношении расходов печь работает в штатном режиме. В верхней камере происходит горение с недостатком кислорода. Температура в области струй первичного воздуха находится на уровне 900 К (рис. 2). В верхней части камеры она равняется 700 К. При этом происходит выделение горючих элементов, которые окончательно сгорают в нижней камере. Максимальная температура здесь достигает 2500 К. Интересно отметить, что в струе вторичного воздуха температура составляет 700 К. Средняя по объему температура в камере 1 равняется 777 К, а в камере 2 – 2150 К. Расход топлива равняется 0,034 кг/с, что несколько меньше опытного значения. Массовая доля CO_2 на выходе из печи составляет 0,204, а паров воды – 0,099.

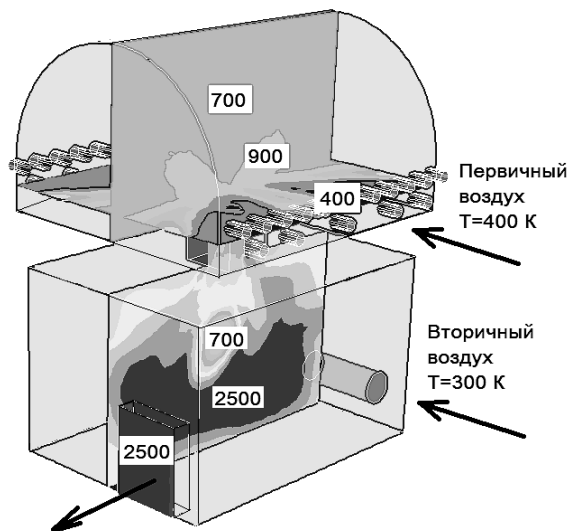


Рисунок 2 – Температура газов в печи для режима 1

Горение в печи характеризуется сложной аэродинамикой (рис. 3). Большая часть первичного воздуха движется параллельно нижней стенке камеры 1 и поступает в канал перепуска в пиролизной плите. Остывшая часть поднимается к своду камеры и затем вместе с пиролизным газом также устремляется в канал 3.

Струя газов из верхней камеры разрушается потоком вторичного воздуха, что приводит к сложному вихревому движению. В результате топливо находится в камере дольше и практически полностью выгорает.

При открытии заслонки первичного воздуха (режим 2) ситуация резко изменяется. Расход первичного воздуха увеличивается и достигает $G_1 = 0,349$ кг/с, а расход вторичного воздуха возрастает незначительно и составляет $G_2 = 0,404$ кг/с. При этом в камере 1 наблюдалось горение топлива с достаточным количеством воздуха. Максимальная температура здесь составляет 1100 К. Топливо практически полностью выгорает, и поэтому в нижней камере горение не активно. Температура здесь составляет 450–770 К. В выходном отверстии температура газов равняется 581 К.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Принятая модель процессов в теплогенераторе пиролизного типа, несмотря на ряд принятых допущений, с достаточной степенью адекватности описывает реальный уровень температур в отдельных блоках установки при коэффициентах избытка воздуха, имевших место во время проведения натурных испытаний [6].

2. При соответствующем согласовании и уточнении математической модели путем привлечения дополнительных сведений из эксперимента, касающихся величины объемного источника горючих веществ m , величины реальной порозности в объеме топливной массы и ее гидродинамического сопротивления, представленная методика может быть использована для разработки инженерных основ проектирования теплогенераторов пиролизного типа.

3. После экспериментально-теоретической отработки отдельного модуля, к примеру, теплопроизводительностью порядка 1 МВт, представляется возможным [7] создавать автономные линии ТЭС заданной мощности, обеспечиваемой соответствующим числом однотипных модулей.

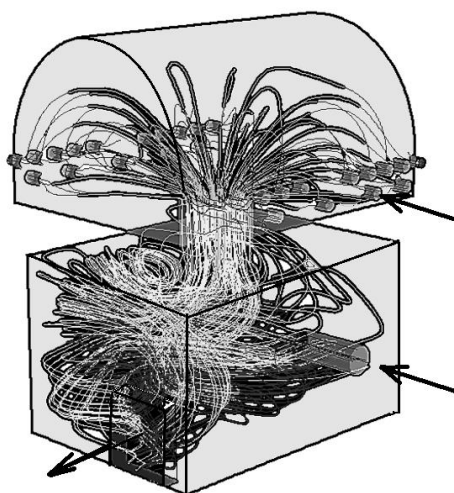


Рисунок 3 – Аеродинамика печи

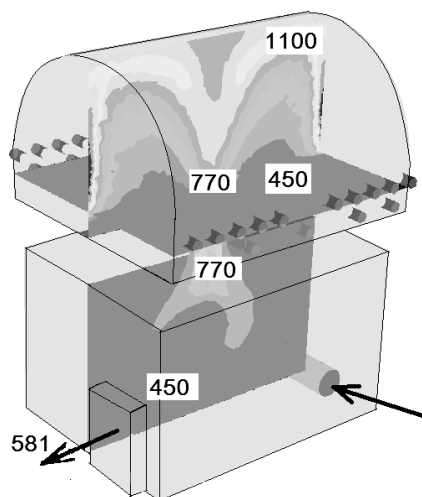


Рисунок 4 – Температура газів в печі для режиму 2

Література

1. Енергія навколо нас / А.С. Конеченков, М.М. Федосенко, Г.А. Шиловіч та інші. – К., 1999. – 192 с.
2. Энергетические установки и окружающая среда / Под ред. Маляренко В.А. – Харьков: ХГАГХ, 2002. – 398 с.
3. Чирков В.Г., Вайнштейн Э.Ф. Учет теплофизических свойств при оценке производительности процесса пиролиза растительной биомассы // Труды 4-й Международной научно-технической конференции (12–13 мая 2004 г., Москва, ГНУ ВИЭСХ) ч.4. – С. 245–251.
4. Братута Э.Г. Перспективы использования топочных агрегатов пиролизного типа / Братута Э.Г., Семеней А.Р // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2010. – № 4/ 74. – С. 8–12.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
6. Семеней А.Р. Методика оценки эффективности теплогенератора пиролизного типа в нестационарном режиме эксплуатации / Семеней А.Р., Братута Э.Г. // Інтегровані технології та ресурсозбереження. – 2010. – № 4. – С. 19–22.
7. Братута Э.Г. Оценка эффективности использования пиролизного теплогенератора в системах тепло- и электроснабжения / Братута Э.Г., Семеней А.Р // Энергосбережение, энергетика, энергоаудит. – 2011. – № 5. – С. 23–28.

УДК 621.311.502

Семеней О.Р., Тарасов О.І., Братута Е.Г.

МОДЕЛЬ ТЕРМОГІДРАВЛІЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ТЕПЛОГЕНЕРАТОРІ ПІРОЛІЗНОГО ТИПУ

Дається опис методики моделювання процесів генерування теплоти на базі піролізу органічного палива з використанням припущення, що інтенсивність термічного розкладення деревини в основному визначається рівнем об'ємного джерела горючих речовин, який, в свою чергу, є функцією температури горіння.

Semenei A.R., Tarasov A.I., Bratuta E.G.

THE MODEL OF THERMOHYDRAULIC PROCESSES IN PYROLYSIS STEAM GENERATORS

The method of modeling of heat generating processes on the base of organic fuel pyrolysis is given. The model is based on an assumption that intensity of wood thermal decomposition is determined basically by the level of volume source of combustible substances. In turn this level depends from combustion temperature.