

Теоретические и экспериментальные исследования кинетики пиролиза растительных материалов в трубах-пиролизерах

Голубкович А. В., доктор техн. наук

ГНУ "ВИМ", Москва

На основе уравнений тепломассопереноса получены математические модели и исследована кинетика пиролиза растительных материалов в трубах-пиролизерах. Установлены рациональные режимы процесса и параметры устройства. Теоретические выкладки подтверждены экспериментом.

Ключевые слова: растительные отходы, пиролиз, тепломассоперенос.

В сельском хозяйстве нашли применение трубы-пиролизеры, в которых термически перерабатывают растительные материалы (РМ) с получением теплоты и электроэнергии [1, 2]. Эти устройства могут быть установлены в любом хозяйстве, они просты в изготовлении и эксплуатации, а для нагрева РМ может быть использована бросовая теплота, в частности, от дизель-генераторов и теплогенераторов. Цель настоящей статьи — обоснование параметров и режимов работы пиролизной установки.

Труба-пиролизер диаметром D и длиной L оборудована кожухом, куда подаются топочные газы для нагрева РМ. Перемещение РМ по трубе осуществляется с помощью поршня, который периодически отводит назад для загрузки новой порции РМ. Топочные газы обеспечивают нагрев, сушку и пиролиз поступающих в трубу растительных материалов, а образующиеся при этом газообразные продукты выводятся из трубы и конденсируются. Несконденсировавшиеся газы и жидкая фракция сжигаются с получением теплоты и электроэнергии.

Сначала происходит термообработка (сушка и пиролиз) слоя, прилегающего к внутренней поверхности трубы, затем — последующих слоев, фронт термообработки перемещается как по радиусу, так и по длине трубы. Теплота РМ передается кондуктивно от греющей поверхности и конвективно от выделяемых газообразных продуктов. Движение поршня обеспечивает полный контакт частиц с греющей поверхностью, которые при термической деструкции измельчаются и проваливаются в поры нижерасположенных слоев, снижая их порозность.

Поставленная задача не имеет однозначного решения, так как взаимодействие потока энергии с материалом при термической деструкции описывается системой из нескольких линейных уравнений, которые со-

держат неизвестные члены. Поэтому приемлемый метод решения — создание и анализ упрощенной математической модели.

Уравнение теплопереноса для плоского слоя толщиной b можно записать в следующем виде [3]:

$$q = \frac{T_1 - \theta_{\text{cp}}}{b/\lambda}, \quad (1)$$

где q — поток теплоты, Вт/м²; T_1 — температура греющей поверхности, °С; $\theta_{\text{cp}} = (T_1 + \theta_0)/2$ — средняя температура слоя, °С; θ_0 — начальная температура РМ, °С; λ — теплопроводность РМ, Вт/(м · °С).

Поток теплоты q можно также записать при условии, что влагосодержание РМ после сушки $W \approx 0$:

$$q = \frac{G_0 [Wr \eta_1 + \Delta U (1 - W) q_0 \eta_2]}{F_0 \tau_i}, \quad (2)$$

где G_0 — масса РМ, кг; W — влагосодержание, кг/кг (количество влаги на количество сухого материала); ΔU — убыль термонеустойчивой массы сырья, кг/кг сухого материала; r и q — удельные количества теплоты испарения влаги и термодеструкции, кДж/кг; η_1 и η_2 — доли теплоты, пошедшей на испарение влаги и термодеструкцию; $F_0 \approx F(1 - \varepsilon_{\text{cp}})$ — контактная теплообменная поверхность, м²; F — полная теплообменная поверхность, м²; $\varepsilon_{\text{cp}} = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon_0$ — средняя порозность слоя; ε_0 и $\Delta\varepsilon_0$ — начальная порозность слоя и доля ее уменьшения; τ_i — время, ч.

Величину $\Delta\varepsilon_0$ можно записать в виде

$$\Delta\varepsilon_0 = (1 - \varepsilon_0)(1 - \eta_0),$$

где η_0 — коэффициент термической деструкции РМ.

Принимая, что отношение G_0/F_0 — это обратная величина удельной поверхности

слоя РМ $1/f$, и приравняв правые части выражений (1) и (2), получаем:

$$\tau_i = \frac{2[Wr\eta_1 + \Delta U(1-0,1W)q_0\eta_2]b}{f\lambda(1-\varepsilon_{cp})(T_1 + \theta_0)}. \quad (3)$$

Длительность пиролиза в установке диаметром R_0 до полной термической деструкции

$$\tau_i = \frac{R_0\tau_i}{2b}. \quad (4)$$

Значение b можно определить по формуле [4]

$$b = \frac{d_3\Phi_1}{\Phi_2}, \quad (5)$$

где d_3 — характерный размер частицы РМ, м.

Входящие в формулу (5) тепловые сопротивления конвективному и кондуктивному переносу теплоты рассчитывают по формулам:

$$\Phi_1 = \frac{1}{4\pi R\lambda} \frac{1}{Bi};$$

$$\Phi_2 = \frac{1}{4\pi R\lambda} (y^{-1/3} - 1),$$

где R — радиус частицы, м; Bi — теплообменный критерий Био; $y = G/G_0$; G — содержание термонеустойчивой части в РМ (при $G \approx 0$, $b \approx 4d_3/Bi$).

Для определения Bi необходимо предварительно вычислить коэффициент свободной теплоотдачи α_c из выражения

$$Nu = 0,5(Gr Pr)^{0,25},$$

где $Nu = b\alpha_c/\lambda$ — число Нуссельта; $Gr = q\beta T_{cp}b^3/\nu^2$ — число Грасгофа; Pr — число Прандтля; β — коэффициент объемного расширения, K^{-1} ; q — ускорение свободного падения, m/c^2 ; ΔT_{cp} — разность температур, $^\circ C$; ν — кинематическая вязкость газа, m^2/c .

Рассчитаем минимальную температуру топочных газов, необходимую для пиролиза, для чего рассмотрим тепловой баланс. Количество теплоты, переданное РМ топочными газами, можно определить из выражения

$$Q = k F_0 \Delta T, \quad (6)$$

где k — коэффициент теплопередачи, $Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)$; $\Delta T = T_n - \theta_0$; T_n — температура топочных газов на входе в трубу, $^\circ C$.

В выражении (6) пренебрегаем потерями теплоты. Величину k , пренебрегая теплопроводностью стенки трубы, можно рассчитать по формуле

$$k = \frac{\alpha_1 \alpha_c}{\alpha_1 + \alpha_c},$$

где α_1 — коэффициент теплоотдачи от топочных газов к трубе, $Вт/м^2 \cdot ^\circ C$.

Количество теплоты, потраченное на пиролиз, определим по формуле

$$Q = G_0 \Delta U q_0. \quad (7)$$

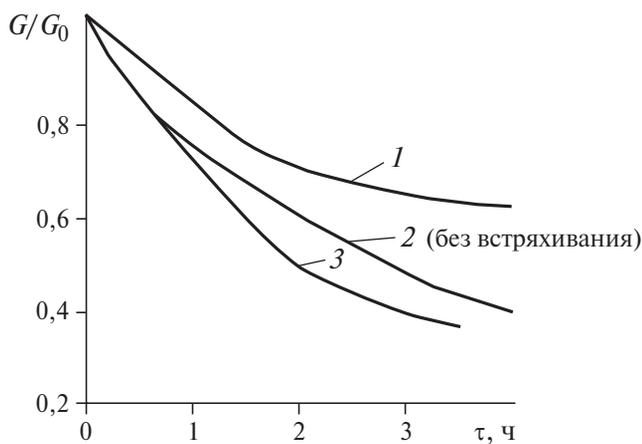
Приравняв значения Q , рассчитанные по формулам (6) и (7), получим:

$$T_n = \frac{G_0 \Delta U q_0}{k F_0} + \theta_0. \quad (8)$$

Радиус трубы установки рекомендуется выбирать в интервале $R_0 = b(1,5 \div 3)$. Этот выбор обусловлен требованиями к качеству продукта и эффективности процесса. При $R_0 \geq 1,5b$ полностью формируется фронт пиролиза, и часть слоя, прилегающая к греющей поверхности, достигает конечного термического превращения $\eta_n \approx 0,4$, частицы которого измельчаются и заполняют поры нижерасположенных слоев, уменьшая их порозность. При $R \geq 3$ высока неравномерность по η_0 пиролизованных РМ. Эта неравномерность возникает из-за разной скорости распространения тепловых и массовых полей, которые характеризуются критериями Bi и Bi_d , где Bi_d — дифференциальный критерий Био (для условий пиролиза $Bi_d/Bi \approx 3$) [5].

Оценим длину сушильной части l относительно общей длины устройства L (за исключением загрузочной части). Для этого раскроем скобки правой части выражения (3), учтем неравномерность распространения температурного и влажного полей сушильной части, примем максимальные значения $W = 0,4 \div 0,6$ кг/кг, $r = 2,5$ МДж/кг, $q_0 = 9,5$ МДж/кг, средние значения $\eta_1 \approx 0,7$ и $\eta_2 \approx 1,0$. Тогда получим $l/L = 0,3 \div 0,35$.

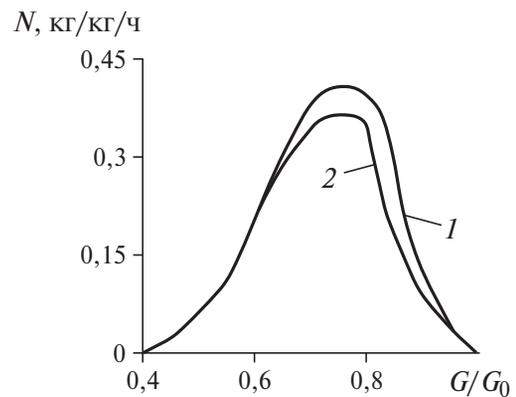
Разработанная приближенная математическая модель пиролиза РМ содержит ряд параметров, в том числе λ , которые являются эффективными, учитывающими весь комплекс явлений, — насыщение слоя пиролизными частицами, снижение порозности и конвективную теплоотдачу от частиц пиролизным газом. Таким образом, идентификация данной модели сводится к экспериментальному определению λ в расчетном выражении (3). Если будет получен результат, согласующийся с экспериментальными данными, модель можно использовать для анализа и расчета.

Рис. 1. Зависимости G/G_0 от τ :

1 — $T_1 = 240$ °C; 2, 3 — $T_1 = 280$ °C

В проведенных с этой целью опытах исследовали пиролиз РМ больших и малых размеров образцов (рапс $R = 0,9 \cdot 10^{-3}$; пшеница $R = 2 \cdot 10^{-3}$; кукуруза $R = 4 \cdot 10^{-3}$ м). Анализировали два случая: в первом моделировали непрерывное движение РМ (исключение пустот, непрерывное поступление пиролизованных частиц в слой), во втором — периодическое, в соответствии с загрузкой (возможное образование пустот, неравномерное поступление пиролизованных частиц).

В качестве модельной установки использовали цилиндрический пенал внутренним диаметром 90 мм, длиной 200 мм, толщиной стенки 3 мм, закрытый с одной стороны. С другой стороны устанавливали перфорированный диск, в котором закрепляли датчики температуры по радиусу на расстоянии от греющей поверхности 10, 20 и 45 мм. Диск нагружали массой 3 кг и устанавливали вертикально в сушильный шкаф, прогретый до температуры $T_1 = 240 \div 280$ °C. После прогрева цилиндра засыпали РМ, помещали в сушильный шкаф, измеряли температуру и периодически взвешивали. При взвешивании встряхивали и уплотняли РМ в цилиндре (первый случай), часть опытов проводили без встряхивания (второй случай). РМ пиролизовали в зависимости от T_1 до $\eta_0 = 0,4 \div 0,6$. Кривые изменения массы G/G_0 и температуры сырья в зависимости от времени τ показывают заметное изменение длительности и температуры РМ от условий проведения опытов (рис. 1). При периодическом уплотнении РМ и встряхивании цилиндра (рис. 2), что интенсифицировало пиролиз, теплопроводность $\lambda = 0,12$ Вт/(м · °C), без уплотнения и встряхивания $\lambda = 0,109$ Вт/(м · °C) с соответствующим возрастанием длительности процесса.

Рис. 2. Зависимости N от G/G_0 при $T_1 = 280$ °C (пшеница): 1 и 2 — при встряхивании и без него

Только при $T_1 = 280$ °C достигнуто значение $\eta_0 = 0,4$, при других температурах η_0 выше.

Выводы

1. Длительность пиролиза РМ в трубах-пиролизерах зависит от их влагосодержания, физико-механических, тепловых свойств и температуры топочных газов. Для зерна она может быть рассчитана при эффективном коэффициенте теплопроводности $\lambda = 0,09 \div 0,12$ Вт/(м · °C).

2. При термообработке РМ необходимо непрерывно перемещать сырье, что обеспечивает плотный контакт с греющей поверхностью.

3. Минимальная температура топочных газов не должна быть ниже 280 °C. При выборе радиуса трубы-пиролизатора рекомендуется интервал $R_0 = (1,5 \div 3,0)b$. Длина сушильной части устройства для регионов с достаточным увлажнением $l = (0,3 \div 0,35)L$.

Список литературы

1. Голубкович А. В., Чижиков А. Г. Обоснование методов расчета параметров пиролиза растительных материалов. — Промышленная энергетика, 2011, № 12.
2. Голубкович А. В., Чижиков А. Г. Тепломассоперенос при пиролизе растительных материалов. — Промышленная энергетика, 2013, № 2.
3. Теория тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. — М.: Высшая школа, 1979.
4. Математическое моделирование переноса тепла и вещества при решении инженерных задач / Р. А. Испарян, А. В. Клиндер, Н. М. Пузырев и др. — Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2002.
5. Сорочинский В. Ф. Повышение эффективности конвективной сушки и охлаждения зерна на основе интенсификации тепломассообменных процессов. Дисс. на соиск. учен. степени доктора техн. наук: М., 2003.