

Тепломассоперенос при пиролизе растительных материалов

Голубкович А. В., доктор техн. наук

ГНУ ВИМ, Москва

Чижиков А. Г., канд. техн. наук, Кожевников Ю. А., инж.

ГНУ ВИЭСХ, Москва

На основе предложенных физико-математических моделей рассмотрен тепломассоперенос при пиролизе растительных материалов в слое различного состояния — плотном неподвижном, псевдооживленном и перемещаемом. Приведены примеры расчета длительности пиролиза в указанных слоях и рекомендации по выбору способа пиролиза в зависимости от состояния слоя.

Ключевые слова: растительные материалы, тепломассоперенос, пиролиз, модели, длительность, расчет, предложения.

Ранее в [1, 2] был исследован ряд параметров процесса пиролиза растительных материалов (РМ) в частных случаях. В данной статье рассмотрен тепломассоперенос на основе физико-математических моделей, предложены методика и примеры расчета длительности пиролиза в плотном неподвижном, псевдооживленном и перемещаемом слоях.

Физическая модель пиролиза РМ в плотном неподвижном слое при кондуктивном нагреве. Когда влажность РМ при термической обработке становится ниже кондиционной начинается пиролиз, при котором температура частиц материала повышается и асимптотически приближается к температуре греющей поверхности в нижнем слое. При этом происходит выход летучих веществ, достигающий у древесины 87 % [3]. Столь высокий процент объясняется тем, что их органическая масса состоит большей частью из теплоустойчивых молекул. Летучие вещества через поры в слое материала удаляются из зоны нагрева, при этом возможен также мольный перенос теплоты, который при повышенной влажности играет существенную роль.

При низкой влажности РМ скорость пиролиза лимитируется в основном теплопроводностью. Обозначим время начала пиролиза τ_0 . Вся теплота, подведенная к материалу кондуктивно от нагретой поверхности с температурой $t_{н.п}$, затрачивается на испарение теплоустойчивой части РМ с образованием газообразных продуктов. Переносом теплоты в материале конвекцией пренебрегаем, а пиролиз осуществляется движением ее фронта со скоростью, соответствующей теплопроводности.

Математическая модель. Уравнение, определяющее скорость пиролиза РМ, можно представить в виде

$$-Vq \frac{dU_{(\tau)}}{d\tau} \rho = \lambda H (t_{н.п(\tau)} - \theta_{(\tau)}), \quad (1)$$

где V — объем пиролизуемого материала, m^3 ; $U_{(\tau)}$ — концентрация теплоустойчивой части материала в его общем объеме, kg/kg ; q — удельное количество теплоты, требуемое для пиролиза с образованием газообразных продуктов разложения (в первом приближении принято равным теплотворной способности материала), kJ/kg материала; H — определяющий размер (высота слоя), m ; λ — теплопроводность материала, $kJ/(m \cdot ^\circ C \cdot ч)$; $\theta_{(\tau)}$ — средняя температура пиролизуемого материала, $^\circ C$; τ — длительность пиролиза, $ч$; ρ — плотность материала, kg/m^3 .

Искомое решение имеет вид:

$$U_{(\tau)} = \frac{1}{\rho} \left[U_0 \rho - \frac{\lambda H}{qV} (t_{н.п} - \theta) (\tau - \tau_0) \right]. \quad (2)$$

Согласно [4]

$$\lambda_\theta = \lambda_{10} \left[1 + \frac{\Delta\lambda}{100} (\theta - 10) \right], \quad (3)$$

где $\lambda_{10} = 0,0420$ $kJ/(kg \cdot ^\circ C \cdot ч)$ — теплопроводность материала при $10^\circ C$; $\Delta\lambda \approx 1,2$ $\%/^\circ C$.

Пиролиз продолжается до тех пор, пока концентрация теплоустойчивой части материала не достигнет величины U_k , равной или меньшей концентрации твердого остатка в РМ.

Комплекс $H/(\rho V)$ в выражении (2) преобразуем следующим образом: числитель и знаменатель умножим на H , тогда получим $F/(H\rho V) \approx f/H$ (где F — поверхность теплообмена, m^2 ; f — удельная поверхность материала, m^2/kg), а поскольку значение H в процессе пиролиза РМ уменьшается в несколько

раз, то в первом приближении можно принять $H/(\rho V) \approx 0,5H/f$.

Длительность пиролиза в плотном неподвижном слое определяется из выражения (2):

$$\tau = \frac{0,5q(U_0 - U_k)H}{\lambda_0 f(t_{н.п} - \theta)}. \quad (4)$$

Пример расчета. Пиролизу подвергаются зерновые отходы от предварительной очистки зерна: $\lambda_0 = 0,18$ кДж/(м · °С · ч), $\rho = 600$ кг/м³, $U_0 = 4,0$ кг/кг, $U_k = 0,4$ кг/кг, $q = 8,4$ МДж/кг, $H = 0,2$ м. Примем $t_{н.п} = 700$ °С, $t_M = 550$ °С, $t_0 = 20$ °С; $\theta = t_M + t_0/2$, где t_M и t_0 — максимальная и начальная температуры материала. Тогда $(t_{н.п} - \theta) = 415$ °С.

При эквивалентном диаметре частиц РМ $d_{эКВ} = 1,5$ мм, учитывая, что f_3 зерна с $d_3 = 3$ мм составит $2,5$ м²/кг, получим $f_3 \approx (d_3/d_{эКВ})^2 \approx 9$ м²/кг [5]. После расчета по формуле (4) находим $\tau = 3$ ч.

Физическая модель пиролиза РМ в псевдооживленном слое. Как и выше, рассматривается случай пиролиза сухих РМ. При термообработке частиц происходят испарение теплоустойчивого материала в газообразные продукты и разложение вплоть до твердого остатка. Продукты поступают в газовый поток, а скорость пиролиза лимитируется скоростью их отвода от поверхности частиц в поток газов. Вся теплота подводится к материалу конвективно и затрачивается на испарение теплоустойчивой части, а перенос теплоты теплопроводностью внутри частицы отсутствует.

Математическая модель. Запишем уравнение, задающее скорость пиролиза частицы РМ в псевдооживленном слое:

$$-Vq \frac{dU(\tau)}{d\tau} \rho = \alpha S [t_{п}(\tau) - \theta(\tau)], \quad (5)$$

где α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °С); V и S — объем, м³, и площадь поверхности частиц, м²; $t_{п}$ — температура газового потока, °С.

Искомое решение имеет вид:

$$U(\tau) = \frac{1}{\rho} \left[U_0 \rho - \frac{3}{Rq} \alpha (t_{п} - \theta) (\tau - \tau_0) \right], \quad (6)$$

где R — радиус частицы РМ шарообразной формы.

Длительность пиролиза

$$\tau = \frac{(U_0 - U_k)qV}{3\alpha(t_{п} - \theta)} = \frac{(U_0 - U_k)\rho R}{\alpha(t_{п} - \theta)}. \quad (7)$$

Пример расчета. Рассмотрим расчет длительности пиролиза частицы РМ дымовыми газами в псевдооживленном слое при скорости дымовых газов $v = 1,5$ м/с, кинематической вязкости $\nu = 56 \cdot 10^{-6}$ м²/с; теплофизические свойства РМ берем из предыдущего примера.

Число $Re = vd/\nu = 40$, $Nu = 0,106Re = 4,24$, $\alpha = 140$ Вт/(м² · °С), длительность пиролиза, рассчитанная по формуле (7), $\tau = 0,12$ ч.

Физическая модель пиролиза РМ в перемещаемом слое. Рассматривается перемещение РМ по нагретой поверхности без перемешивания отдельных частей слоя, плотный контакт между частицами отсутствует. Пограничный слой высотой h_i подвержен воздействию теплоты как при контакте с нагретой поверхностью, так и излучением. Причем контактный теплообмен — кратковременный, поскольку объем частиц, соприкасающихся с нагретой поверхностью, сокращается в несколько раз. На смену ему опускается следующая слой и т. д. Плотность материала после пиролиза

$$\rho_{п} = \rho \frac{100 - V_{г}}{100},$$

где ρ — плотность РМ до пиролиза; $V_{г}$ — объем пиролизных газов.

Высоту пограничного слоя h_i можно принять равной двум-трем диаметрам частиц [4]. Определив время пиролиза слоя высотой h_i , можно рассчитать время пиролиза слоя высотой h .

Математическая модель пиролиза РМ в перемещаемом слое. Уравнение скорости пиролиза перемещаемого слоя высотой h_i запишем по аналогии с выражением (2), но с заменой величины λH на $\alpha_{эф} F$, что обусловлено конвективной теплоотдачей:

$$U(\tau) = \frac{1}{\rho} \left[U_0 \rho - \frac{\alpha_{эф} F}{qV} (t_{н.п} - \theta) (\tau - \tau_0) \right], \quad (8)$$

где $\alpha_{эф} = \alpha_k + \alpha_l$ — эффективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · °С); α_k — коэффициент теплоотдачи при кратковременном контакте; α_l — коэффициент лучистой теплоотдачи.

Согласно [5]

$$\alpha_k = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\sqrt{\lambda c \rho}}{\sqrt{\tau_k}}, \quad (9)$$

где c — теплоемкость, кДж/(кг · °С); τ_k — время контакта, с.

Согласно [6]

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{(T_1 - T_2)F}, \quad (10)$$

где $Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} \sigma [(T_1/100)^4 - (T_2/100)^4] F$ — тепловой поток, Вт; $\sigma = 5,7 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ — коэффициент излучения абсолютно черного тела; $\varepsilon_{\text{пр}} = 1/(1/\varepsilon_1 + 1/\varepsilon_2 - 1)$ — приведенная степень черноты; ε_1 и ε_2 — степени черноты греющей поверхности и РМ; $T_1 = t_{\text{н.п}}$ и $T_2 = \theta$ — температуры поверхностей, К.

Длительность пиролиза слоя высотой h_i можно определить по формуле

$$\tau_i = \frac{q(U_0 - U_{\text{к}})V_{\text{р}}}{\alpha_{\text{эф}}(t_{\text{н.п}} - \theta)F}. \quad (11)$$

Входящий в формулу (11) комплекс $F/(V_{\text{р}})$ представляет собой обратную величину удельной поверхности f , которая берется из специальных справочников или рассчитывается аналогично расчету для материалов с известными значениями f_0 :

$$f = f_0(d_0/d)^2,$$

где f_0 и d_0 — удельная поверхность и диаметр известного материала.

Окончательно получим

$$\tau = \tau_i \frac{h}{h_0}. \quad (12)$$

Пример расчета. Пиролизу подвергаются РМ с теплофизическими свойствами из первого примера и высотой слоя 0,2 м; $h_i = 3d_0 = 4,5 \approx 5$ мм, $f_3 \approx 9 \text{ м}^2/\text{кг}$. Степень черноты греющей поверхности $\varepsilon_1 = 0,7$; степень черноты РМ $\varepsilon_2 = 0,6$; $\varepsilon_{\text{пр}} = 0,52$. Значение $\alpha_{\text{л}}$, определенное по формуле (10), составит $6,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$.

Зададим $\tau_i = 5$ мин, после расчета по формуле (11) получим $\alpha_{\text{к}} = 18,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$ и $\alpha_{\text{эф}} = 34,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$. При таком значении

$\alpha_{\text{эф}}$ имеем $\tau_i \approx 4$ мин. Учитывая потери в окружающей среде, принимаем $\tau_i \approx 5$ мин, тогда длительность пиролиза РМ $\tau = 111$ мин. По сравнению с пиролизом в плотном неподвижном слое длительность пиролиза в перемещаемом слое примерно в 1,6 раза меньше.

Приведенные соотношения для тепломассообмена позволяют рассчитать длительность пиролиза при основных состояниях слоя РМ независимо от способа подвода теплоты. Установлено, что наименьшее время пиролиза РМ — в псевдооживленном слое дымовыми газами. Однако растительные отходы характеризуются низкой сыпучестью и могут псевдооживляться не полностью, в частности, при наличии соломистых и мелких включений требуется сортировка во избежание забивания механизмов и повышенного уноса. Наиболее простой способ — в плотном неподвижном слое, однако он довольно длительный и не исключает затрат ручного труда на обслуживание. Наиболее рациональный способ — в перемещаемом слое по нагретой поверхности. При этом существенно интенсифицируется процесс за счет лучистой составляющей и кратковременного контакта частиц материала с нагретой поверхностью.

Список литературы

1. **Расчет** пиролиза растительных материалов в высоком слое / А. В. Голубкович, В. Г. Систер, И. А. Порев, А. Г. Чижиков. — Промышленная энергетика, 2010, № 1.
2. **Голубкович А. В., Чижиков А. Г.** Обоснование методов расчета параметров пиролиза растительных материалов. — Промышленная энергетика, 2011, № 12.
3. **Голубкович А. В.** Топки на растительных отходах. — М.: ГНУ ВИМ Россельхозакадемии, 2011.
4. **Орлов А. И.** Исследование кондуктивного и конвективного нагрева в процессе сушки семенного зерна: Дисс. на соиск. учен. степени канд. техн. наук. М., 1970.
5. **Кришер О.** Научные основы техники сушки. — М.: Иностранная литература, 1961.
6. **Теория** тепломассообмена / Под ред. А. И. Леонтьева. — М.: Высшая школа, 1979.

Alex.grig.10@yandex.ru