

Сушка растительных материалов при термической деструкции

Голубкович А. В., доктор техн. наук

Государственное научное учреждение “Всероссийский научно-исследовательский институт механизации сельского хозяйства” Российской академии сельскохозяйственных наук (ГНУ ВИМ Россельхозакадемии), Москва

Растительные материалы (РМ), представляющие собой отходы основных технологических процессов растениеводства, после переработки в трубах-пиролизерах с получением продуктов пиролиза могут быть использованы, в частности, для получения теплоты и электроэнергии. Показано, что сушку РМ с помощью альтернативных источников теплоты целесообразно проводить в том же реакторе, в котором пиролизуют РМ, и использовать для этой цели продукты их разложения. Предваряющая пиролиз сушка растительных материалов осуществляется при комбинированном воздействии на материалы теплопроводности, свободной, вынужденной конвекции пиролизных газов и лучистой энергии. На основе теории распространения теплоты в плоском слое разработаны приближенные модели теплопереноса с указанными составляющими и определены длительности и условия сушки и параметры сушильной камеры.

Ключевые слова: пиролиз, сушка, теплоперенос, растительные материалы, параметры.

Влажные растительные материалы перед пиролизом подвергают сушке, так как этот процесс возможен только в сухом материале. Рассмотрим особенности сушки РМ применительно к трубам-пиролизерам, получившим распространение в ряде отраслей народного хозяйства. Продукты пиролиза — несконденсированный газ, жидкая и твердая фракции — находят применение при выработке теплоты и электроэнергии на фермах, в малых хозяйствах и др. [1, 2]. Исследования процесса сушки влажных РМ необходимы для оптимизации режима работы пиролизера и обоснования параметров камеры сушки.

Постановка задачи. В трубе поршнем циклично-непрерывно перемещают РМ. В начальный момент в трубу подают партию РМ с влажностью W_0 , в конце пиролиза разгружают твердую фракцию (древесный уголь), а в кожух трубы направляют топочные газы. В общем случае можно выделить три фазовых состояния РМ в трубе-пиролизере: к греющей поверхности прилегает (пиролизуемый) слой, ниже находится высушиваемый, ближе к центру трубы — влажный слой. При движении РМ образуется и перемещается по радиусу трубы фронт сушки, за ним — фронт пиролиза, и непрерывно сокращается толщина влажного слоя (рис. 1).

Из термообрабатываемых РМ выделяются газообразные продукты, пары отводятся из сушильной камеры наружу, а продукты разложения РМ фильтруются в конденсатор. Вследствие перепада температур возникают вихревые потоки водяных паров, захваченно-

го воздуха, а также газообразных продуктов разложения РМ, наблюдаются вынужденная и свободная конвекции газов.

Теплота от греющей поверхности трубы передается РМ как теплопроводностью, так и конвекцией, а в ряде случаев (при температуре греющего газа $T_1 \geq 400^\circ\text{C}$) — лучистой энергией. Сушку РМ рассмотрим в две стадии: на первой, когда формируется ее фронт, влияние термической деструкции минимально и ею пренебрегаем, а на второй — при перемещении фронта сушки — учитываем.

Уравнение теплопроводности, описывающее одномерное стационарное температурное поле в теле плоской формы, может быть записано в следующем виде [3]:

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

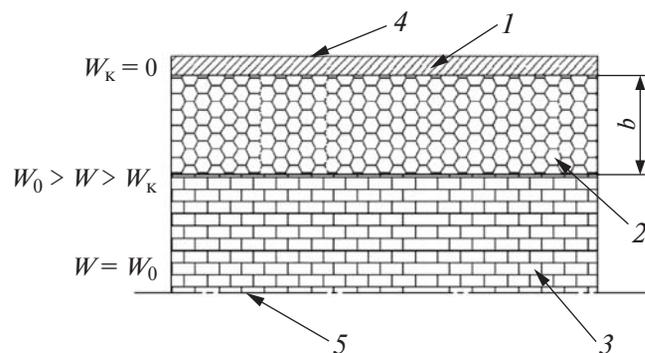


Рис. 1. Схема расположения слоев РМ в трубе-пиролизере: 1–3 — пиролизуемый, высушиваемый и влажный слой; 4 — греющая поверхность; 5 — ось трубы; b — ширина фронта сушки

где q — поток теплоты, Вт/м²; λ — коэффициент теплопроводности, Вт/(м · °С); T_1 — температура греющей поверхности, °С; $\theta_{cp} = (T_1 - \theta_0)/2$ — средняя температура высушиваемого слоя, °С; θ_0 — начальная температура РМ, °С; b — толщина слоя (фронт сушки), м.

Левую часть уравнения (1) можно записать следующим образом:

$$q = \frac{W_0 G_0 r}{F_0 \tau_i \eta} \quad (2)$$

где W_0 — начальное влагосодержание РМ, кг/кг (отношение масс сухих и влажных материалов); G_0 — масса РМ, кг; τ_i — длительность сушки, ч; F_0 — площадь контактной теплообменной поверхности, м²; η — доля теплоты, пошедшей на испарение влаги до $W \approx 0$; r — теплота испарения, кДж/кг.

Основная доля теплоты, передаваемой частице, расходуется на теплоту испарения. Для подтверждения этого оценим затраты теплоты на испарение влаги $Q_{и}$ и на нагрев РМ $Q_{н}$ от начальной температуры $\theta_0 = 20$ °С до температуры кипения $\theta_{и} = 100$ °С:

$$\frac{Q_{н}}{Q_{и}} = \frac{(c + c_{в} W_0)(\theta_{и} - \theta_0)}{r W_0},$$

где c и $c_{в}$ — теплоемкости материала и воды, кДж/(кг · °С).

Расчеты позволяют оценить количество теплоты, поступающей на испарение влаги: $\eta = 1 - Q_{н}/Q_{и} \approx 0,73$ для РМ с $W_0 = 0,25$ кг/кг.

Площадь контактной поверхности F_0 можно определить по формуле

$$F_0 \approx F(1 - \varepsilon_0),$$

где F — площадь полной поверхности частиц, м²; ε_0 — порозность слоя.

Очевидно, что чем больше порозность слоя и меньше точек соприкосновения между частицами, тем меньше F_0 .

На первой стадии сушки при формировании ее фронта $\varepsilon_0 \approx \text{const}$ и $\eta_1 \approx \text{const}$. На второй стадии, когда начинается деструкция частиц, прилегающих к греющей поверхности, $\varepsilon_0 \neq \text{const}$, но снижается и составляет ε_1 . Это обусловлено тем, что срезаются и измельчаются частицы пиролизованного слоя, которые заполняют поры нижерасположенных слоев, увеличивая контактную поверхность F_0 и долю теплоты η_2 , а это приводит

к сокращению длительности сушки на второй стадии τ_2 .

Оценим сниженную порозность высушиваемого слоя, полагая, что пиролизованные частицы распределяются в объеме высушиваемого слоя:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon_0, \quad (3)$$

где $\Delta\varepsilon_0 = (1 - \eta_{п})(1 - \varepsilon_0)$; $\eta_{п}$ — коэффициент термического превращения РМ.

Принимая, что теплота пиролизованных частиц идет на повышение температурного потенциала высушиваемых частиц, запишем:

$$\eta_2 = 1 - \frac{Q_{н} + \Delta Q_{н}}{Q_{и}}, \quad (4)$$

где $\Delta Q_{н} = (1 - \eta_{п})(1 - \varepsilon_0) \frac{T_1 + \theta_0}{2}$.

Длительность первой стадии сушки определяется из выражения

$$\tau_1 = \frac{2W_0 b r}{f \lambda_1 (T_1 + \theta_0)(1 - \varepsilon_0) \eta_1}, \quad (5)$$

где $f = F_0/G_0$ — удельная поверхность слоя, м²/кг; λ_1 — эффективный коэффициент теплопроводности на первой стадии, Вт/(м · °С); η_1 — доля теплоты, пошедшая на испарение влаги при формировании фронта сушки.

Длительность второй стадии сушки

$$\tau_2 = \frac{2W_0 b r}{f \lambda_2 (T_1 + \theta_0)(1 - \varepsilon_1) \eta_2}, \quad (6)$$

где λ_2 — эффективный коэффициент теплопроводности на второй стадии, Вт/(м · °С); η_2 — доля теплоты, пошедшей на испарение влаги при сформированном фронте сушки.

Суммарная длительность сушки РМ в трубе радиусом R_0 при условии достижения влагосодержания РМ в центре $W_0 \approx 0$ определяется из выражения

$$\tau_0 = \tau_1 + \frac{R_0}{2b} \tau_2. \quad (7)$$

Ширину фронта сушки рассчитываем по формуле [4]

$$b = \frac{d_3 \Phi_1}{\Phi_2} = \frac{(y^{-1/3} - 1)}{Bi}, \quad (8)$$

где $d_3 = 2R$ — характерный размер частицы; R — радиус частицы, м; Φ_1 и Φ_2 — тепловое со-

противление конвективному и кондуктивному переносу теплоты; $y = G/G_0$; G — содержание в G_0 термонеустойчивой части РМ (при $G \approx 0$; $b \approx 4d_3/\text{Vi}$); Vi — теплообменный критерий Био.

Для расчета по формуле (8) необходимо в общем случае сначала определить

$$\alpha_{\text{эф}} = \alpha_{\text{с}} + \alpha_{\text{в}} + \alpha_{\text{л}},$$

где $\alpha_{\text{эф}}$ — эффективный коэффициент теплоотдачи; $\alpha_{\text{с}}$, $\alpha_{\text{в}}$, $\alpha_{\text{л}}$ — свободная, вынужденная конвекции и лучевая теплоотдача, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Значение $\alpha_{\text{с}}$ можно рассчитать, предварительно вычислив произведение $\text{Gr} \cdot \text{Pr}$ (где Gr и Pr — числа Грасгофа и Прандтля), в качестве определяющего размера принять $b/2$, а в качестве температурного фактора — $\Delta T = (T_1 - \theta_0)$.

Значение $\alpha_{\text{в}}$ можно рассчитать исходя из $\text{Nu} = f(\text{Re})$, приняв в качестве определяющего размера R_0 и найдя скорость газообразных продуктов в трубе. Поскольку последняя достаточно мала, величиной $\alpha_{\text{в}}$ пренебрегаем.

Значение $\alpha_{\text{л}}$ находим при $T_1 > 400^\circ\text{C}$ по формуле

$$\alpha_{\text{л}} = \frac{Q_{\text{л}}}{(T_1 - \theta_{\text{ср}})F_{\text{Т}}},$$

где $Q_{\text{л}}$ — лучевой тепловой поток, Вт ; $F_{\text{Т}}$ — площадь поверхности теплообмена трубы, м^2 .

Оценим отношение l/L , где l и L — длины сушильной и пиролизной частей установки. Это можно выполнить на основе затрат теплоты на сушку $Q_{\text{с}}$ и на пиролиз $Q_{\text{п}}$. При расчете длины сушильной части установки учтем различную инерционность распространения полей температуры и влагосодержания по радиусу в соответствии с отношением $\text{Vi}_{\text{д}}/\text{Vi}$:

$$l = \frac{LQ_{\text{с}}}{Q_{\text{п}}} = \frac{LW_0(\eta_1 + \eta_2)r}{2G_{\text{п}}g_0\eta_{\text{п}}} \frac{\text{Vi}_{\text{д}}}{\text{Vi}},$$

где g_0 — удельная теплота пиролиза, $\text{кДж}/\text{кг}$ (принятая равной удельной теплоте сгорания РМ); $\eta_{\text{п}} \approx 1$ — доля теплоты, пошедшей на пиролиз; $G_{\text{п}} = (1 - W_0)$; Vi и $\text{Vi}_{\text{д}}$ — теплообменный и массообменный критерии Био, характеризующие инерционность распространения температурного и влажностного полей (согласно [5] для условий, близких к пиролизу, $\text{Vi}_{\text{д}}/\text{Vi} \approx 3$).

Разработанная приближенная математическая модель кондуктивной сушки содержит

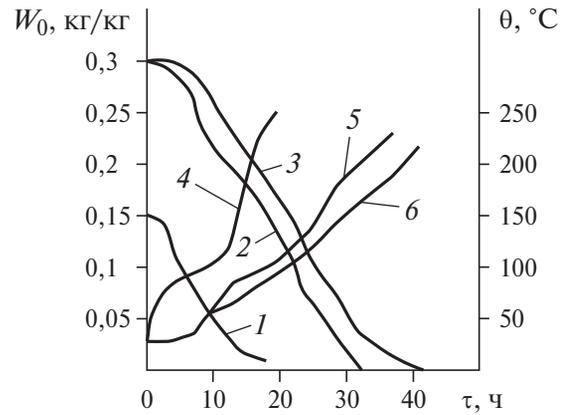


Рис. 2. Зависимости влагосодержания W_0 (кривые 1–3) и температуры θ (кривые 4–6) РМ от τ ($l = 45$ мм; кривые 4 и 5 — с встряхиванием и уплотнением)

ряд параметров, в том числе ε , η_2 и λ , которые учитывают комплекс явлений, связанных с фазовыми превращениями. Однако наиболее универсальным является λ , от которого зависят также ε_1 и η_2 . Таким образом, идентификация данной модели сводится к экспериментальному определению λ на первой и второй стадиях сушки. Если подстановка значений λ_1 и λ_2 в расчетные выражения (5) и (6) даст результат, согласующийся с экспериментом, модель можно использовать для анализа и расчетов.

Программа-методика исследований. Высушивали РМ с влагосодержанием $W_0 = 0,15$ и $0,3$ $\text{кг}/\text{кг}$ (зерно пшеницы с $R = 2 \cdot 10^{-3}$ м, $f = 1$ $\text{м}^2/\text{кг}$) в массивном цилиндрическом пенале диаметром 90 мм, длиной 200 мм, закрытом с одной стороны и с перфорированным диском с другой стороны, по радиусу которого на расстоянии $l \approx 10, 20$ и 45 мм от стенки были закреплены датчики температуры.

Пенал прогревали, заполняли РМ, помещали в сушильный шкаф и выдерживали при температурах $220 - 280^\circ\text{C}$ в течение $1 - 2$ ч. Периодически замеряли температуру и влагосодержание в местах расположения датчиков. В ряде опытов встряхивали цилиндр и уплотняли загруженную массу РМ, моделируя таким образом вторую стадию сушки. Был проведен также опыт без встряхивания и уплотнения (первая стадия).

Установлено, что внутри пенала образуются три зоны: пиролизуемого, высушиваемого и влажного материала. Экспериментальные кривые сушки (рис. 2) носят экстремальный характер с рядом критических точек. Это означает, что кинетика сушки определяется не только внешними условиями нагрева, но и

фазовыми превращениями. На кривых сушки практически отсутствуют линейные участки, что свидетельствует о протекании процесса в период падающей скорости сушки. Уменьшение ее с течением времени обычно связано с обезвоживанием поверхностных слоев и углублением фронта испарения. Это особенно характерно для случая, когда материал нагревается за счет теплообмена со средой, температура которой намного превышает температуру кипения воды. На первой стадии сушки удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных ($\pm 12\%$) получено при $\lambda = 0,13 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, на второй — при $\lambda = 0,16 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot ^\circ\text{С})$, т. е. длительность сушки на второй стадии ниже примерно на 20 %.

Выводы

1. Сушка РМ в трубах-пиролизерах осуществляется за счет кондуктивного подвода теплоты от греющей поверхности, контактной теплоотдачи от пиролизуемых частиц и конвекции от газообразных продуктов пиролиза. Необходимым условием сушки является наличие пиролизованного слоя РМ, прилегающего к греющей поверхности.

2. С образованием и смещением фронта сушки по радиусу и длине трубы начинается процесс фазовых превращений РМ. Он существенно ускоряется при образовании слоя

пиролизированных частиц. Необходимо постоянное перемещение сырья в трубе с избыточным давлением, создаваемым поршнем, что обеспечивает отсутствие газовых пузырей, максимальную теплообменную поверхность и эффективную сушку.

3. Для сушки влажных материалов с влажностью до $W_0 = 0,5 \text{ кг}/\text{кг}$ не менее $1/3$ реактора на входе отводится под сушку, и в этой части должны предусматриваться средства для отвода паров.

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 тепломассобмена / 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. Клиггер, Н. М. Пузырев и др. — Тверь: Тверской гос. техн. ун-т, 2002.
5. Сорочинский В. Ф. Повышение эффективности конвективной сушки и охлаждение зерна на основе интенсификации тепломассообменных процессов: Автореф. дисс. на соиск. степени доктора техн. наук. М., 2003.

agolubkovich@yandex.ru