

УДК 620.93

Исследование процессов нагрева и сушки слоя органосодержащих отходов в термическом реакторе

О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, Р.Н. Габитов, О.В. Самышина
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И.Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: При расчете процесса конвективной сушки решается сопряженная задача теплообмена и массообмена. Опытные данные по интенсивности тепло- и массообмена поверхности влажного материала с потоком сушильного агента обычно представляют в виде связи между критериями подобия. В работах А.В. Лыкова, П.Г. Романкова, Б.С. Сажина, В.И. Коновалова, Л.Г. Голубева, В.И. Муштаева, В.Н. Кисельникова, С.В. Федосова, В.Ф. Фролова, А.И. Сокольского рассматривались однокомпонентные структуры. Для слоя ТБО, который является сложной многокомпонентной полидисперсной пористой структурой, известные критериальные уравнения дают погрешность. Это обусловлено тем, что в уравнениях не учитывают влияние многокомпонентного влажного слоя на протекающие в нем тепломассообменные процессы. В связи с этим актуальным является получение критериальных уравнений для многокомпонентного слоя с учетом влажности сырья.

Материалы и методы: В качестве материала для исследования тепломассообменных процессов использована органическая составляющая твердых бытовых отходов, представляющая собой сложную многокомпонентную полидисперсную пористую структуру. Процесс сушки в слое многокомпонентного влажного материала исследуется в экспериментальной установке шахтного типа.

Результаты: На основе экспериментальных исследований процесса конвективной сушки слоя органосодержащего сырья получены критериальные уравнения для нахождения критериев Нуссельта и Шервуда. На основе полученных уравнений определены коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи слоя твердых бытовых отходов.

Выводы: Полученные решения применяются в расчетах и проектировании конструкции реакторов по термической переработке многокомпонентных органических отходов, в том числе и твердых бытовых отходов, и в частности для определения конструктивных параметров зоны подсушки. В дальнейших исследованиях необходимо расширить диапазон скорости сушильного агента в целях интенсификации процесса сушки.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, термическая переработка, конвективная сушка, критериальные уравнения, тепло- и массообмен, влажность, скорость сушки, кривые сушки.

Research into heating and drying processes of thermal reactor organic waste layer

O.B. Kolibaba, O.I. Gorinov, R.N. Gabitov, Samyshina O.V.
Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Abstract

Background: Calculation of the convective drying process helps to solve the conjugate heat transfer and mass transfer problem. Experimental data on the intensity of heat and mass transfer of a wet material surface with the flow of the drying agent is usually presented in the form of a relationship between the similarity criteria. The works of A.V. Lykov, P.G. Romankov, B.S. Sazhin, V.I. Konovalov, L.G. Golubev, V.I. Mushtaev, V.N. Kisel'nikov, S.V. Fedosov, V.F. Frolov, A.I. Sokolsky considered one-component structures. However, solid domestic waste is a complex multicomponent poly-disperse porous structure, which leads to errors in the known criteria equations as the latter do not take into account the effect of the multicomponent wet layer on the heat and mass transfer processes in it. Therefore, an urgent task is to determine criteria equations for a multicomponent layer, with the moisture content of the raw material taken into account.

Materials and methods: The organic component of solid domestic waste, representing a complex multicomponent poly-disperse porous structure, has been chosen as the material for studying heat and mass transfer processes. The drying process in the multicomponent wet material layer was investigated in the experimental shaft-type facility.

Results: Based on the experimental studies of convective drying in a layer of organic materials, we derived criteria equations for calculating Nusselt and Sherwood numbers. The proposed equations allowed us to determine the coefficients of heat transfer and mass transfer in solid waste layer.

Conclusions: The obtained solutions are used in the calculation and design of reactors of thermal processing of multicomponent organic waste, including solid domestic waste, and in particular for the determination of the drying zone design parameters. In further research it is recommended to extend the drying agent speed range in order to intensify the drying process.

Key words: solid domestic waste, thermal processing, convective drying, criteria equations, heat and mass transfer, moisture, drying rate, drying curves.

Развитие топливной энергетики непосредственно связано с разработкой новых технологий производства газообразного топлива из органического сырья, к которому относятся твердые бытовые отходы (ТБО), представляющие собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава (бумага, текстиль, пластмассы, пищевые и растительные компоненты, камни, кости, кожа, резина, дерево, черные и цветные металлы, стекломой). Органическая составляющая в них доходит до 85 %. Термическая переработка сырья позволяет получить не только горючий газ, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов, а также способствует рекультивации земельных угодий. Наиболее перспективными из термических методов переработки ТБО являются пиролиз и газификация.

Процесс термического разложения ТБО, как правило, осуществляется в печах шахтного типа (термических реакторах) [1, 2]. В термическом реакторе (1) твердые бытовые отходы (2) проходят последовательно зоны подсушки (3), пиролиза (4) и газификации (5) (рис. 1).

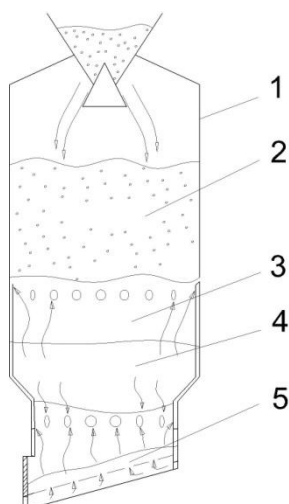


Рис. 1. Схема термического реактора

В зоне подсушки осуществляется нагрев и сушка слоя ТБО при температуре 100–180°C за счет теплообмена с потоком газа из ниже расположенной зоны пиролиза, а выделившаяся в процессе влага совместно с легкими летучими соединениями поступает на газификацию твердого углеродистого остатка (ТУО).

В зоне пиролиза температура находится в пределах 450–550°C, горючие составляющие ТБО пиролизуются, образуя пиролизный газ, жидкий продукт (жизку), состоящий из полиароматических углеводородов, и твердый углеродный остаток (ТУО). Твердый углеродный остаток постепенно проходит в нижнюю часть реактора, поступает в зону газификации. Там же подается газообразный окислитель (смесь пара H_2O и CO_2). Образующийся в результате газификации ТУО топливный газ (термогаз) в смеси с пиролизным газом является высокока-

чественным горючим, пригодным для использования.

Для достижения требуемой полноты обезвреживания отходов необходимо расчетно-экспериментальное определение оптимальной температуры и продолжительности процесса. При этом большую роль играет влажность ТБО, которая может быть достаточно высокой. Так, для среднего состава ТБО при учете органической и неорганической части первоначальная влажность материала должна быть не более 5 %. В установках термической переработки ТБО, где используется предварительная подготовка по выделению из ТБО негорючей части, первоначальная влажность сырья может доходить до 40 % [3, 4].

Твердые бытовые отходы можно отнести к кусковым материалам, которые при наличии внутренней влаги требуют повышенных затрат энергии и времени на процесс сушки. Для выбора рационального режима работы реактора необходимо определить время сушки сырья при определенных внешних условиях. Продолжительность процесса сушки, затраты энергии на его осуществление и температурное поле слоя ТБО позволяют найти высоту зоны подсушки термического реактора и, следовательно, правильно его сконструировать.

При расчете процесса конвективной сушки решается сопряженная задача тепло- и массообмена, для которой характерно следующее:

- сушильный агент отдает теплоту высушиваемому материалу и воспринимает испарившуюся влагу;

- высушиваемый материал воспринимает теплоту сушильного агента и отдает ему влагу; сушильный агент используется и как транспортирующее средство.

Непосредственные измерения показывают, что около влажной поверхности материала формируются различные пограничные слои: гидродинамический, тепловой и концентрационный. В общем случае подобие скорости, температуры теплоносителя и его влагосодержания вблизи влажной поверхности материала отсутствует.

В теории сушки используется метод анализа внешнего теплообмена [5], основанный на совместном рассмотрении следующих уравнений:

- движения и неразрывности вязкого несжимаемого потока:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad} \vec{v} = \vec{g} - \frac{1}{\rho} \text{grad} P + \nu \nabla^2 \vec{v}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \text{div} \rho \vec{v} = 0; \quad (2)$$

- конвективно-диффузионного переноса влаги в движущемся сушильном агенте

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad} C = D \nabla^2 C; \quad (3)$$

• уравнения, описывающего поле температуры в потоке теплоносителя

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \text{grad} t = a \nabla^2 t, \quad (4)$$

где v – скорость сушильного агента, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ – плотность сушильного агента, кг/м³; P – давление, Па; ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с; C – концентрация влаги, м³/м³; D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с; t – температура, °С; a – коэффициент теплопроводности теплоносителя, м/с².

Опытные данные по интенсивности тепло- и массообмена поверхности влажного материала с потоком сушильного агента обычно представляют в виде связи между критериями подобия, которые получают из уравнений (1)–(4) и условий однозначности.

Для слоя ТБО, который является сложной многокомпонентной полидисперсной пористой структурой, известные критериальные уравнения [6] дают погрешность. Это обусловлено тем, что в уравнениях не учитывается влияние влажности компонентов слоя на протекающие в нем тепломассообменные процессы, в то время как влажность ТБО, загружаемых в реактор, может быть достаточно высокой.

Целью данного исследования является получение критериальных уравнений тепло- и массообмена, учитывающих влияние влажности сырья. Ввиду плохой газопроницаемости слоя ТБО, ограничимся случаем ламинарного режима.

Нами были проведены экспериментальные исследования процесса сушки влажного слоя ТБО в четырех температурных режимах. Первый режим сушки осуществлялся при постоянной температуре сушильного агента 107°С. Второй, третий и четвертый режимы – при температурах 127, 147, 167°С соответственно.

На рис. 2 приведена схема экспериментальной установки для исследования процессов тепломассообмена между слоем ТБО и сушильным агентом. В качестве сушильного агента использовался пиролизный газ (CH₄ = 56,4 %, CO = 17 %, CO₂ = 25,3 %, H₂ = 1,3 %). Установка состоит из шахты (1) с окном загрузки (2) и выгрузки ТБО (3), калорифера (4), трубы для отвода теплоносителя (5), воздуходувки (6), регулирующей заслонки (7).

Твердые бытовые отходы среднего морфологического состава с известными плотностью и влажностью засыпаются в шахту. Шахта представляет собой стальную трубу, в нижней части которой расположена металлическая сетка для поддержания слоя ТБО. Теплоноситель, поступающий в слой ТБО, подается воздуходувкой через калорифер. Расход газа регулируется заслонкой. Теплоноситель, поступая в калорифер, нагревает газ до заданной температуры. После нагрева в теплооб-

меннике газ проходит через слой ТБО, высушивая его, а теплоноситель удаляется через отводящую трубу.

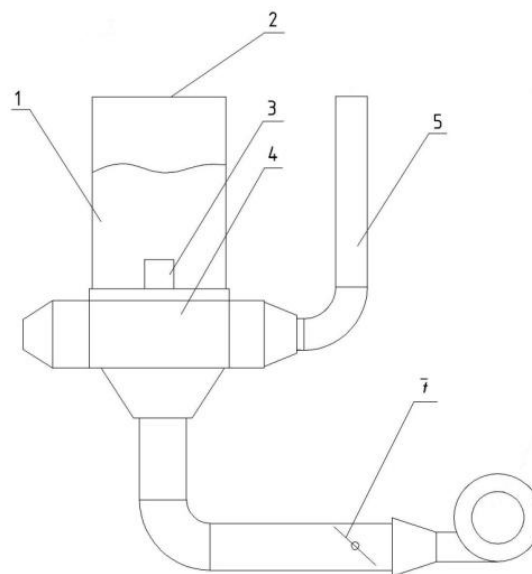


Рис. 2. Схема установки для исследования процессов сушки ТБО

В процессе экспериментального исследования измерялись следующие параметры: избыточное давление в шахте, температура и влажность сырья, температура сушильного агента (газа), состав газа на входе и выходе из шахты, расход сушильного агента.

На рис. 3 приведены экспериментальные кривые изменения температуры слоя ТБО в результате его нагрева при различных температурных режимах.

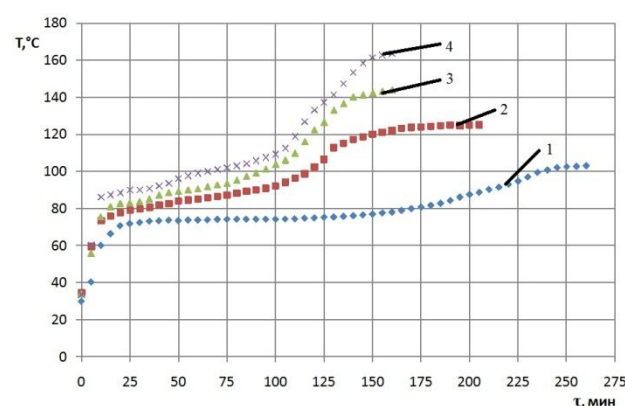


Рис. 3. Температурные кривые процесса сушки при постоянных температурных режимах: 1 – 107°С; 2 – 127°С; 3 – 147°С; 4 – 167°С

В зависимости от времени пребывания сырья в шахте установки определялось изменение массы материала. Затем проводился расчет влажности сырья и скорости изменения содержания влаги. На рис. 4 представлены кривые кинетики сушки при различных температурах в шахте.

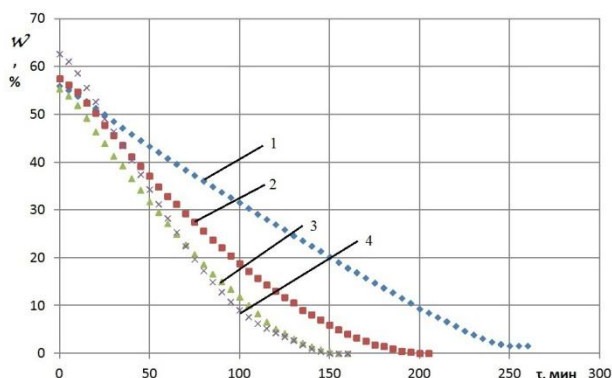


Рис. 4. Зависимости изменения влажности ТБО от времени сушки при постоянных температурных режимах: 1 – 107°C; 2 – 127°C; 3 – 147°C; 4 – 167°C в аппарате

На рис. 5 приведены кривые скорости сушки, полученные в процессе нагрева слоя ТБО сушильным агентом постоянной температуры. Зависимости получены в виде сплайн-функций в диапазонах влажности:

- 65÷50 % – параболой с погрешностью 2 %;
- 50÷15 % – прямой линией с погрешностью 7 %;
- 15÷0 % – параболой с погрешностью 5 %.

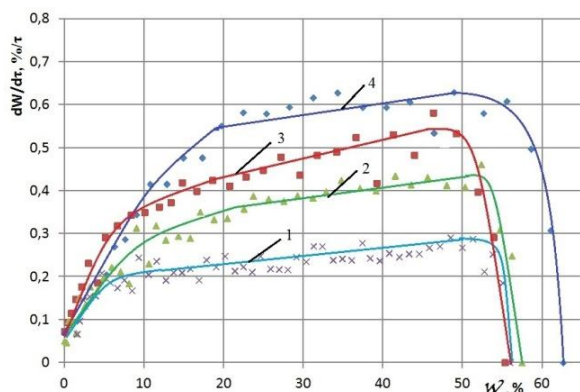


Рис. 5. Кривые скорости сушки при нагреве слоя ТБО сушильным агентом при постоянных температурных режимах: 1 – 107°C; 2 – 127°C; 3 – 147°C; 4 – 167°C в аппарате

Применительно к дисперсным материалам при определенных условиях задача определения коэффициентов межфазного обмена может решаться как внешняя с использованием уравнений:

- массоотдачи

$$\frac{\partial W}{F \partial \tau} = \beta (C_{\text{пп}} - C); \quad (5)$$

- теплоотдачи

$$\frac{\partial Q}{F \partial \tau} = \alpha (t_r - t_m), \quad (6)$$

где W – масса влаги, кг; α , β – коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи, Вт/(м²·К), кг/(м²·с); $C_{\text{пп}}$, C – концентрация влаги на поверхности материала и в окружающей среде, м³/м³; t_r , t_m – температуры газа и материала, °C; F – поверх-

ность материала, м²; Q – величина теплового потока, Вт.

Поверхность материала определяют по выражению

$$F = \frac{6 \cdot m}{d \rho_m}, \quad (7)$$

где m – масса материала, кг; d – эквивалентный диаметр куска слоя, м; ρ_m – плотность материала, кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи может быть оценен из материального и теплового баланса:

$$\alpha = \frac{Q}{F(t_g - t_m)(1 - \varepsilon)}, \quad (8)$$

где ε – доля поверхности, не омываемая газовым потоком.

После обработки экспериментальных данных были получены критериальные уравнения, позволяющие определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи.

Для расчета критерия Нуссельта рекомендуется зависимость

$$\text{Nu} = 1,24 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,3} \text{Re}^{0,33} E^{-0,084}, \quad (9)$$

где H – высота слоя, м; E – симплекс, определяемый видом материала и учитывающий изменение влажности материала;

$$E = \frac{1 - \omega}{\omega}, \quad (10)$$

где ω – относительная влажность.

По Кришеру [7], расчет массообмена можно свести к расчету теплообменного процесса, используя соотношение

$$\text{Nu} = \text{Sh} \cdot K_c, \quad (11)$$

где Sh – критерий Шервуда; K_c – поправочный коэффициент для диффузионного потока:

$$K_c = \frac{1}{1 - p^{cp}}, \quad (12)$$

где p^{cp} – среднелогарифмическое давление паров в пограничном слое.

Для расчета критерия Шервуда получена зависимость

$$\text{Sh} = 0,911 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,3} \text{Re}^{0,33} E^{-0,084}. \quad (13)$$

Заключение

Полученные на основе экспериментальных исследований процесса конвективной сушки слоя органосодержащего сырья критериальные уравнения для нахождения критериев Нуссельта и Шервуда позволяют вычислить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи сложного многокомпонентного полидисперсного пористого слоя с учетом изменения влажности материала.

Список литературы

1. Пат. 2433344 Российская Федерация МПК F23G. Установка для термического разложения не сортированных твердых бытовых отходов / Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, Е.С. Семин, О.В. Самышина, О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, В.А. Горбунов. Оpubл. 10.11.2011
2. Пат. 2254518 Российская Федерация МПК F23G. Способ обработки твердых бытовых отходов / Д.А. Долинин, Р.Н. Габитов, Е.С. Семин, О.В. Самышина, О.Б. Колибаба, О.И. Горинов, В.А. Горбунов. Оpubл. 2011.
3. О влиянии влажности твердых бытовых отходов, содержащих древесину, на температурный режим термической переработки / О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, О.В. Самышина, В.А. Горбунов // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – № 3. – С. 35–36.
4. Prabir Basu. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory / Academic Press, Corporate drive. – Burlington, USA, 2010. – 365 p.
5. Соколовский А.И. Термическая обработка дисперсных материалов в аппаратах с вихревыми двухфазными потоками: дис. ... д-ра техн. наук. – Иваново, 2005. – 320 с.
6. Wronski S., Pohorecki R., Siwinski S. Przyklady obliczen z terodynamiki I kinetuki procesow inzynierii chemicznej // Warszawa. – 1979. – 360 p.
7. Кришер О. Научные основы техники сушки. – М.: Инлит., 1961. – 538 с.

References

1. Dolinin, D.A., Gabitov, R.N., Semin, E.S. Samyshina, O.V., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A., Gorinov, O.I. *Ustanovka dlya termicheskogo razlozheniya ne sortirovannykh tverdykh bytovykh otkhodov* [Unsorted domestic solid waste thermal decomposition unit]. Patent RF, no. 2433344, 2011.
2. Dolinin, D.A., Gabitov, R.N., Semin, E.S. Samyshina, O.V., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A., Gorinov, O.I. *Sposob obrabotki tverdykh bytovykh otkhodov* [Method of processing solid domestic waste]. Patent RF, no. 2254518, 2011.
3. Gorinov, O.I., Kolibaba, O.B., Samyshina, O.V., Gorbunov, V.A. O vliyani vlazhnosti tverdykh bytovykh otkhodov, soderzhashchikh drevesinu, na temperaturnyy rezhim termicheskoy pererabotki [On the influence of moisture content in solid domestic waste containing wood on the temperature regime of thermal processing]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*, 2012, no. 3, pp. 35–36.
4. Prabir, Basu. Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, Corporate drive. Burlington, USA, 2010. 365 p.
5. Sokol'skiy, A.I. *Termicheskaya obrabotka dispersnykh materialov v apparatakh s vikhrevymi dvukhfaznymi potokami*. Diss. d-ra tekhn. nauk [Thermal processing of dispersed materials in apparatuses with whirl-type two-phase flows. Dr. tech. sci. diss]. Ivanovo, 2005. 320 p.
6. Wronski, S., Pohorecki, R., Siwinski, S. *Przyklady obliczen z terodynamiki I kinetuki procesow inzynierii chemicznej*. Warszawa, 1979. 360 p.
7. Krisher, O. *Nauchnye osnovy tekhniki sushki* [Scientific basis of drying equipment]. Moscow, Inlit, 1961. 538 p.

Колибаба Ольга Борисовна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
адрес: г. Иваново, ул. Строительная, д.4, ауд. Г-202,
телефон: (4932) 26-96-15,
e-mail: Koli-baba@mail.ru

Горинов Олег Иванович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
кандидат технических наук, профессор кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
адрес: г. Иваново, ул. Строительная, д.4, ауд. Г-202,
телефон: (4932) 26-96-12,
e-mail: gorinov@tvsp.ispu.ru

Габитов Рамиль Наилевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
адрес: г. Иваново, ул. Строительная, д.4, ауд. Г-202,
телефон: (4932) 26-96-14,
e-mail: tevp@tvsp.ispu.ru

Самышина Ольга Васильевна,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
аспирант кафедры энергетики теплотехнологий и газоснабжения,
адрес: г. Иваново, ул. Строительная, д.4, ауд. Г-202,
телефон: (4932) 26-96-14,
e-mail: tevp@tvsp.ispu.ru