

ве утеплителя внутренней поверхности того же помещения могут рассматриваться древесно-цементные материалы [1], [2].

Литература

1. Андреев, А. А. Древесно-цементный композит с добавкой стеатита как конструкционный и демпфирующий материал / А. А. Андреев, Г. Н. Колесников, А. А. Чалкин // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2014. – № 6. – С. 75–78.
2. Андреев, А. А. О рациональном соотношении количества опилок и стружки в древесно-цементном композите / А. А. Андреев, Г. Н. Колесников // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. Сер.: Естественные и технические науки. – 2014. – №4 (141). – С. 85–87.
3. Вуколов, Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию

операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э. А. Вуколов. – М., 2008.

4. Мельников, А. В. Влияние теплоизоляции фундаментов на изменение температурного режима сезонно промерзающего основания в районе глубокого сезонного промерзания / А. В. Мельников // Вестник гражданских инженеров. – 2012. – № 6 (35). – С. 77–83.

5. Черняев, Л. А. Применение информационных технологий в планировании и обработке результатов факторных экспериментов / Л. А. Черняев, Т. А. Гаврилов // Научно-образовательная информационная среда XXI века: Материалы VIII Международной научно-практической конференции. – Петрозаводск, 2014. – С. 202–204.

6. American Society of Civil Engineers, SEI/ASCE 32-01, Design and Construction of Frost-Protected Shallow Foundations. – 2001. – URL: <http://www.PUBS.ASCE.org>.

7. Sun, Shu Xia Finite Element Computation Method for Heat Transfer / [Shu Xia Sun et al.] // Advanced Materials Research. – 156 (2011): 766-770. – URL: <http://www.scientific.net/AMR.156-157.766>.

УДК 620.93

О. Б. Колибаба, А. И. Сокольский, Р. Н. Габитов

Ивановский государственный энергетический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СУШКИ СЛОЯ ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ В ПРОЦЕССЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ

Исследуется процесс конвективной сушки слоя твердых бытовых отходов в экспериментальной установке шахтного типа. На основе исследований получены критериальные уравнения тепло- и массообмена для нахождения критериев Нуссельта и Шервуда. Предложенные уравнения позволяют определить коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи в слое твердых бытовых отходов. Полученные решения используются в расчетах при проектировании реакторов для термической переработки многокомпонентного органического сырья, в частности для определения конструктивных параметров зоны сушки.

Твердые бытовые отходы, термическая переработка, конвективная сушка, критериальные уравнения, тепло- и массообмен, влажность, скорость сушки, кривые сушки.

The authors studied the convective drying bed of solid waste in an experimental setup of shaft-type. Based on the research the authors got the criteria equations of heat and mass transfer for finding the Nusselt and Sherwood. The proposed equations enable us to determine the coefficients of heat and mass transfer in the layer of solid waste.

The resulting solutions are used in calculating the design of reactors for thermal processing of multicomponent organic waste, including MSW, and the determination of the design parameters, drying zone, in particular. Further research is necessary to extend the range of the speed of the drying agent to intensify the drying process.

Solid municipal waste, thermal processing, convective drying, dimensionless equations, heat and mass transfer, humidity, drying rate, drying curves.

Введение.

К твердым бытовым отходам (ТБО) относят отходы, образующиеся у населения, в торговых предприятиях, учреждениях, муниципальных службах. ТБО представляют собой гетерогенную смесь сложного морфологического состава, включающую бумагу, текстиль, пластмассы, пищевые и растительные компоненты, камни, кости, кожу, резину, дерево, черные и цветные металлы, стекломой.

Любые ТБО состоят из органической и неорганической составляющих и воды. Вода обуславливает такое важное свойство ТБО как влажность. Наибольший интерес, с точки зрения утилизации ТБО, представляет органическая составляющая, которая

является нетрадиционным энергоносителем, и удельный вес которой в составе ТБО доходит до 85 %.

Широко распространенными технологиями утилизации отходов являются термические методы, к которым относятся пиролиз и газификация. Термическая переработка сырья позволяет получить не только горючий газ, но и решить экологическую проблему, связанную с загрязнением городов и рекультивацией земельных угодий.

Основная часть.

Процесс термической переработки ТБО чаще всего осуществляется в печах шахтного типа (термиче-

ских реакторах) [2]. Твердые бытовые отходы загружаются в верхнюю часть реактора и последовательно проходят зоны сушки, пиролиза и газификации.

В зоне сушки осуществляется нагрев и сушка слоя ТБО за счет теплообмена с потоком газа из нижерасположенной зоны пиролиза, а выделившаяся в процессе влага совместно с легкими летучими соединениями поступает на газификацию твердого углеродистого остатка (ТУО).

В зоне пиролиза горючие составляющие ТБО пиролизуются, образуя пиролизный газ, жидкий продукт (жизку), состоящий из полиароматических углеводородов и ТУО. Твердый углеродный остаток, постепенно опускаясь в нижнюю часть реактора, поступает в зону газификации. Туда же направляется газообразный окислитель (паровоздушная смесь). Образуемый в результате газификации ТУО топливный газ в смеси с пиролизным газом является качественным горючим, пригодным для использования.

Для достижения требуемой полноты обезвреживания отходов необходимо расчетно-экспериментальное определение температуры и продолжительности процесса. При этом большую роль играет влажность ТБО, которая может оказаться 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 достигать 40 % [1], [8].

Твердые бытовые отходы можно отнести к кусковым материалам, которые при наличии внутренней влаги требуют повышенных затрат энергии на процесс сушки. Для выбора рационального режима работы реактора необходимо определить температурное поле слоя ТБО, время сушки сырья и затраты энергии на процесс. Знание этих параметров позволяет рассчитать скорость загрузки сырья, высоту зоны сушки 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.

В теории сушки используется метод анализа внешнего тепломассообмена [6], основанный на совместном рассмотрении 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:

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

и 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 температуропроводности теплоносителя, м²/с.

В приведенной системе уравнений взаимное влияние процессов переноса импульса, массы и теплоты учитывается зависимостью кинетических коэффициентов от потенциалов переноса. Уравнения справедливы не только для ламинарного движения потока, но также и для турбулентного течения, если локальные значения функций P, t, C понимать как усредненные по времени, а коэффициенты переноса ν, D, a – как состоящие каждое из двух слагаемых: молекулярного и турбулентного коэффициентов переноса импульса, массы и теплоты. Сложность анализа процессов тепломассообмена в турбулентных потоках заключается в зависимости турбулентных слагаемых коэффициентов переноса от турбулентного состояния потока и от расстояния до твердой поверхности, с которой контактирует поток [7]. Теория пограничного слоя позволяет существенно упростить общую систему приведенных уравнений, однако и в этом случае теоретически удастся решить лишь несколько наиболее простых задач для изотермических условий гидродинамического обтекания тел малой кривизны.

В связи с этим, трудности анализа внешнего тепломассопереноса теоретическими методами приводят к необходимости применения теории подобия с использованием экспериментальных данных.

При одновременном протекании процессов тепло- и массообмена для определения коэффициента теплообмена используют соотношение, предложенное А. В. Нестеренко [4]:

$$Nu = A Pr^{0,33} Re^n Gu^m, \quad (5)$$

где $Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерий Прандтля, $Re = \frac{wd}{\nu}$ – критерий Рейнольдса, $Gu = \frac{T_c - T_M}{T_c}$ – критерий Гухмана,

T^c, T^M – температура соответственно среды и адиабатного испарения жидкости, К.

Это соотношение выведено для плоской пластины при конвективном подводе тепла. За определяю-

щий размер плиты принят ее размер в направлении потока газов, для шара и цилиндра – их длина в направлении потока.

Наиболее применимым можно считать универсальное критериальное уравнение для коэффициента теплообмена влажных тел, полученное П. Д. Лебедевым [3], которое позволяет рассчитывать коэффициенты теплообмена для любого момента времени всего процесса сушки для всех влажных материалов. Уравнение имеет вид:

$$Nu = A Re^n \left(\frac{T^C}{T^M} \right)^m \left(\frac{\omega}{\omega_K} \right)^K, \quad (6)$$

где ω – интегральная текущая влажность материала в период падающей скорости сушки; ω_K – интегральная критическая влажность материала.

Значения величины A и показателя степени K параметрического критерия $\left(\frac{\omega}{\omega_K} \right)$ обусловлены формой связи влаги с материалом и разницей между геометрической и истинной поверхностями испарения.

Структура зависимости (6) легла в основу обработки многочисленных экспериментальных данных по конвективной сушке различных материалов (торфа, гипса и др.) [4]. Однако ее применение для слоя кускового многокомпонентного материала требует корректировки. Такая необходимость обусловлена влиянием на тепломассообмен соотношения между эквивалентным диаметром куска и толщиной прогреваемого слоя.

Целью данного исследования является получение критериальных уравнений тепло- и массообмена в слое твердых бытовых отходов при его сушке.

Нами были проведены экспериментальные исследования процесса конвективной сушки влажного слоя ТБО в четырех температурных режимах при скоростях газового потока: 0,1, 0,5, 1, 1,5, 2 м/с. Первый режим сушки осуществлялся при постоянной температуре сушильного агента, равной 107 °С. Второй, третий и четвертый – при температурах: 127, 147, 167 °С.

На рис. 1 приведена схема экспериментальной установки для исследования процессов тепломассообмена между слоем ТБО и сушильным агентом (воздухом). Экспериментальная установка состояла из участка трубы (1) с металлической сеткой для удержания слоя ТБО (рабочая зона) и электрического калорифера (2) для нагрева сушильного агента (воздуха). Подача воздуха осуществлялась вентилятором (4), расположенным перед калорифером. Скорость потока воздуха и его температура регулировались при помощи блока управления (3) с экраном для вывода информации. Температура и влажность воздуха фиксировались с помощью датчиков RHP-2S11 (5) с выводом показаний на экран блока управления. Скорость потока воздуха измерялась анемометром Testo 416(6). В процессе эксперимента температура образца измерялась 5 термопарами ТХА. Преобразо-

ватель ОВЕН МВА8 передавал сигнал на ПК. Сушка образца продолжалась до установления его постоянной массы.

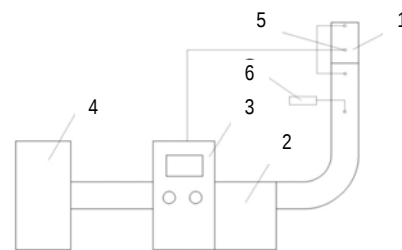


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для исследования процессов сушки ТБО

До начала опыта образцы твердых бытовых отходов среднего морфологического состава (см. таблицу) помещались в водяную ванну на 20 ч. С помощью центрифуги из образцов удалялась избыточная влага. Затем образец ТБО помещался в рабочую зону установки. Для определения влажности из образца ТБО извлекалась навеска. Ее взвешивали на лабораторных электронных весах (ВЛ Э134) 4-го класса точности, помещали в сушильный шкаф, нагретый до температуры 107 °С, и выдерживали до достижения постоянной массы.

Таблица

Морфологический состав ТБО для разных климатических зон, % по массе

Компонент, %	Климатическая зона		
	средняя	южная	северная
Металл	3,5...5,5	2,5...4,5	3,5...5,5
Бумага	32...35	22...30	26...35
Древесина	1...2	1...2	2...5
Текстиль	3...5	3...5	4...6
Пластмасса	3...4	3...6	3...4
Резина, кожа	0,5...1	1	2...3
Пищевые отходы	35...45	40...49	32...39
Стекло	2...3	2...3	4...6
Керамика, камни	0,5...1	1	1...3
Кости	1...2	1...2	1...2
Прочее	1...2	3...4	1...2

В зависимости от времени пребывания сырья в рабочей зоне установки определялось изменение массы материала. Затем проводился расчет влажности сырья и скорости изменения содержания влаги.

На рис. 2 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 %;

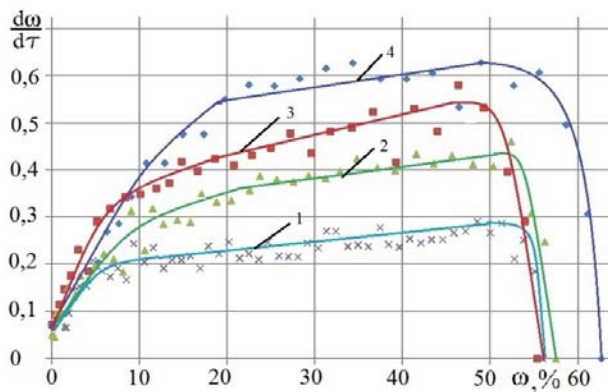


Рис. 2. Кривые скорости сушки слоя ТБО в температурных режимах: 1 – 107 °С, 2 – 127 °С, 3 – 147 °С, 4 – 167 °С. Скорость воздуха 0,1 м/с

Анализируя полученные кривые скорости сушки, можно заметить, что в первом периоде скорость сушки отклоняется от постоянных значений. Это объясняется тем, что в отличие от классического монодисперсного слоя, где удаляется равное количество влаги в первом периоде, мы имеем дело с полидисперсным слоем, компоненты которого состоят из разных материалов. Во втором периоде характер кривых обусловлен формой связи влаги с материалом и соответствует капиллярно-пористым коллоидным телам.

Опытные данные обрабатывались в виде критериальной зависимости:

$$Nu = A \left(\frac{d}{H} \right)^k Re^n E^m, \quad (7)$$

где H – высота слоя, м; d – определяющий размер; E – симплекс, учитывающий изменение влажности материала (ТБО), т. е. влияние массообмена на теплообмен.

$$E = \frac{1 - \omega}{\omega}, \quad (8)$$

где ω – интегральная относительная влажность материала.

Расчет массообмена можно свести к расчету теплообмена, используя соотношение [4]:

$$Nu = Sh \cdot K_c, \quad (9)$$

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

$$K_c = \frac{1}{1 - p^{cp}}, \quad (10)$$

где p^{cp} – среднелогарифмическое давление паров в пограничном слое, взятое по справочным данным [5].

После обработки экспериментальных данных были получены уравнения для определения критериев Нуссельта и Шервуда.

Для ламинарного режима рекомендуются зависимости:

$$Nu = 1,24 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,3} Re^{0,33} E^{0,084}, \quad (11)$$

$$Sh = 0,911 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0,2} Re^{0,33} E^{0,084}. \quad (12)$$

Для турбулентного режима критериальные уравнения имеют вид:

$$Nu = 0,107 \left(\frac{d}{H} \right)^{0,38} Re^{0,82} E^{0,12}, \quad (13)$$

$$Sh = 0,066 \left(\frac{d}{H} \right)^{-0,49} Re^{0,82} E^{0,12}. \quad (14)$$

За определяющий размер в случае теплообмена принят эквивалентный диаметр куса, а в случае массообмена – длина поверхности испарения. За определяющую температуру принята средняя температура сушильного агента.

Используя уравнения (11)–(14), рассчитываем коэффициенты тепло- и массоотдачи соответственно по формулам:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot d}{\lambda}, \quad (15)$$

$$\beta = \frac{Sh \cdot d}{D}, \quad (16)$$

где λ – коэффициент теплопроводности сушильного агента, Вт/м·К.

На рис. 3 представлены средние значения коэффициентов теплоотдачи в процессе сушки слоя ТБО. Графики показывают, что с уменьшением относительной влажности материала величины коэффициента теплоотдачи снижаются.

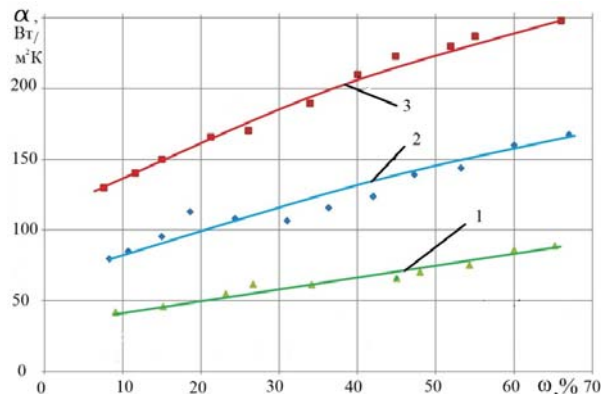


Рис. 3. Зависимости изменения коэффициента теплоотдачи от относительной влажности в процессе сушки при постоянной температуре 107 °С и скоростях воздуха: 1 – 1 м/с, 2 – 1,5 м/с, 3 – 2 м/с

Выводы.

1. На основе экспериментальных исследований процесса конвективной сушки слоя органосодержащего сырья получены критериальные уравнения для нахождения критериев Нуссельта и Шервуда.

2. Уравнения позволяют вычислить коэффициенты теплоотдачи и массотдачи в процессе сушки сложного многокомпонентного пористого слоя с учетом изменения влажности материала.

Литература

1. *Горинов, О. И.* О влиянии влажности твердых бытовых отходов, содержащих древесину, на температурный режим термической переработки / [О. И. Горинов и др.] // Известия ВУЗов. Лесной журнал. – 2012. – №3. – С. 35 – 36.
2. *Долинин, Д. А.* Патент №2433344 Российская Федерация МПК F23G Установка для термического разложения несортированных твердых бытовых отходов / Д. А. Долинин, Р. Н. Габитов, Е. С. Семин, О. В. Самышина, О. Б. Колибаба, О. И. Горинов, В. А. Горбунов. Опубл. 10.11.2011.
3. *Лебедев, П. Д.* Теплоиспользующие установки промышленных предприятий / П. Д. Лебедев, А. А. Щукин. – М., 1970.
4. *Лыков, М. В.* Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М., 1970.
5. *Романков, П. Г.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / П. Г. Романков, К. Ф. Павлов, А. А. Носков. – Л., 1987.
6. *Сокольский, А. И.* Термическая обработка дисперсных материалов в аппаратах с вихревыми двухфазными потоками: дис. ... д-ра техн. наук / А. И. Сокольский. – Иваново, 2005.
7. *Фролов, В. Ф.* Моделирование сушки дисперсных материалов / В. Ф. Фролов. – Л., 1987.
8. *Prabir, B.* Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory / B. Prabir // Academic Press, Corporate drive. – Burlington, USA, 2010.

УДК 66-933.6

С. М. Корнилаев*Череповецкий государственный университет*

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ТОРКРЕТИРОВАНИЯ ФУТЕРОВКИ ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОЙ ПЕЧИ (ДСП)

В статье представлена автоматизация технологического процесса торкретирования футеровки электросталеплавильной печи (ДСП) с помощью роботизированного торкрет-манипулятора для горячего ремонта. Рассмотрена работа торкрет-робота с заходом стрелы через верх и через рабочее окно с помощью технологических операций печного участка ДСП. Аппарированными результатами являются: экономия огнеупорных материалов, увеличение эффективности и безопасности электросталеплавильной печи.

Торкретирование, горячий торкрет-ремонт, футеровка электросталеплавильной печи (ДСП), роботизированный торкрет-манипулятор, торкрет-робот.

The article presents the automation of the shotcrete lining process of the electric arc furnace (EAF) with a robotic shotcrete-manipulator for hot repair. The paper also considers the work of shotcrete robot into an arrow through the top and through the working window with the help of technological operations and furnace area EAF. The proven results are considered to be the saving of refractory material, increasing the efficiency and security of the electric arc furnace.

Gunite work, hot gunning repair, lining of the electric arc furnace (EAF), robotic shotcrete-manipulator, shotcrete-robot.

Введение.

Применение процесса торкретирования в качестве горячего ремонта футеровки сталеплавильных агрегатов с целью снижения себестоимости стали является одним из приоритетных направлений совершенствования сервиса технологии сталеплавильной плавки на отечественных предприятиях. Оно широко используется в электросталеплавильных цехах металлургических предприятий всех странах мира, в бывшем СССР успешно прошло испытания на крупнейших металлургических заводах и комбинатах. Автоматизация горячего торкрет-ремонта нацелена на достижение высоких результатов работы технологии торкретирования: позволяет достичь экономию магнезиальной торкрет- и заправочной масс, увеличить полезное время работы сталеплавильного агрегата, улучшить экологические показате-

тели производства, сделать труд технолога-сталепла- вильщика безопасным.

За последнее время исследования и разработки в области процесса торкретирования (включая производство оборудования для торкрет-ремонтов) принадлежат российским компаниям ЗАО «НПП им. М. И. Платова», ЗАО МО «Прогресс» и иностранным компаниям "RHI AG" (Австрия), "PigoMET A. S." (Турция), "Minteq" (США) и проч. Их научные разработки направлены на холодные и горячие ремонты с помощью процессов торкретирования и шоткретирования металлургических агрегатов [3]. Нерешенной частью общей проблемы автоматизации этих процессов является комплексное использование роботизированного оборудования в условиях российских металлургических предприятий.