

УДК 620.93

Метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья

О.И. Горинов, О.Б. Колибаба, 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: Для расчета процессов термической переработки твердых бытовых отходов необходимо знать их теплофизические свойства. Существующие методы рассматривают слой твердых бытовых отходов как мультикомпонентную смесь, теплофизические свойства которой определяются с учетом объемных долей компонентов и свойств этих компонентов, а порозность слоя при этом не учитывается. В связи с этим актуальной является задача определения теплофизических свойств слоя с учетом его порозности.

Материалы и методы: В основу предложенного решения положен метод дискретного удовлетворения краевых условий.

Результаты: Рассмотрена задача определения эффективных теплофизических свойств пористой структуры. Предложен метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя органосодержащего сырья, построенный на базе решения обратной задачи теплопроводности. Найдена зависимость эффективного коэффициента температуропроводности твердых бытовых отходов от порозности слоя.

Выводы: Разработанный метод определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя твердых бытовых отходов может быть использован в расчетах процессов нагрева различных пористых структур.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, термическая переработка, пористость, коэффициент температуропроводности.

Method of determining effective temperature conductivity coefficient of the layer of materials containing organic substances

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

Abstract

Background: Calculation of the solid household waste thermal utilization processes requires employing their thermal physical properties. The existing methods consider the solid household waste layer as a multi-component mixture with its thermophysical characteristics defined on the basis of the volume fractions and properties of the components and with the layer porosity not taken into account.

Materials and methods: The proposed solution is based on the method of boundary condition discrete satisfaction.

Results: The paper deals with the problem of determining porous structure effective thermophysical characteristics. The authors propose a method of determining the effective temperature conductivity of organic raw material layer based on solving the inverse heat conductivity problem. The effective temperature conductivity coefficient of solid household waste was found to be dependent on the layer porosity.

Conclusions: The developed method of determining effective temperature conductivity coefficient of solid household waste layer can be used to calculate the processes of heating different porous structures.

Key words: solid household waste, thermal utilization, porosity, temperature conductivity coefficient.

Твердые бытовые отходы (ТБО) подвергаются термической переработке в специальных печах шахтного типа – термических реакторах [1]. При этом слой ТБО последовательно проходит процессы нагрева, сушки и пиролиза с последующей газификацией твердого углеродистого остатка (ТУО). Образующийся в результате переработки горючий газ используется в качестве топлива. В большинстве случаев имеет место предварительная подготовка ТБО, заключающаяся в их сортировке и сушке [2].

Для расчета процесса нагрева слоя ТБО, представляющего собой многокомпонентную

пористую структуру, на основе основного дифференциального уравнения теплопроводности необходимо знать теплофизические свойства (ТФС) всех компонентов слоя. В большинстве случаев теплофизические свойства рассчитываются исходя из знания объемных долей компонентов слоя и свойств этих компонентов [3], а порозность слоя и влияние ее на ТФС не учитывается, что вносит явную погрешность в последующие расчеты.

Будем рассматривать слой ТБО как условное пористое тело, наделенное эффективными теплофизическими свойствами: плотностью $\rho_{эф}$,

теплопроводностью $\lambda_{эф}$ и теплоемкостью $c_{эф}$, связанными воедино эффективным коэффициентом температуропроводности $a_{эф}$:

$$a_{эф} = \frac{\lambda_{эф}}{c_{эф} \rho_{эф}}. \quad (1)$$

Одним из перспективных подходов к определению ТФС пористых тел является проведение расчетно-экспериментальных теплофизических исследований, основанных на обработке экспериментальных данных методами обратных задач теплопроводности (ОЗТ), когда по результатам измерения граничных условий и температуры во внутренних точках исследуемого тела требуется определить неизвестные эффективные теплофизические характеристики этого тела [4].

Предлагается расчетно-экспериментальный метод решения ОЗТ для слоя ТБО, не требующий знания параметров внешнего теплообмена. Сущность метода заключается в том, что образец нагревается произвольным, но монотонно меняющимся тепловым потоком. По экспериментально замеренным температурам поверхности $T(1, Fo)$ и теплового центра $T(0, Fo)$ слоя и приближенно заданному значению эффективного коэффициента температуропроводности рассчитывается температурное поле неограниченной пластины $T(X, Fo)$. Полученные расчетом значения температур в центральной точке сравниваются с экспериментальными данными в этой же точке при условии минимизации среднеквадратичного отклонения расчета и эксперимента.

В основу предлагаемого решения ОЗТ положен известный метод дискретного удовлетворения граничных условий (ДУКУ) [5], в соответствии с которым дифференциальное уравнение теплопроводности удовлетворяется непрерывно, а граничные условия – дискретно в g моментах времени, равномерно выбранных на рассматриваемом отрезке времени Fo .

Конкретные моменты времени, для которых формулируются граничные условия, определяются выражением $\frac{Fo_k}{g}$, где $i \in \{1, \bar{g}\}$. Чем

больше величина g , тем точнее приближенное решение, но тем сложнее решение задачи. При $g \rightarrow \infty$ приближенное решение стремится к точному. В результате проведенных исследований установлено, что в инженерной практике для расчета температурных полей термически тонких тел достаточно принимать $g = 2-3$, для расчета нагрева термически массивных тел $g = 2-3$, при этом погрешность расчета не превышает 3%. Начальные условия в методе ДУКУ также удовлетворяются дискретно в m точках, равномерно распределенных по прогреваемой толщине тела. При решении прикладных задач с погрешностью, не превышающей 3 %, можно принимать $m = 2-3$.

В основу метода положено точное аналитическое решение задачи теплопроводности для

тел простейшей формы при граничных условиях I рода. Для неограниченной пластины это решение имеет следующий вид:

$$T(X, Fo) = \varphi(Fo) - 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos(\delta_l X) \times \\ \times \exp(-\delta_l^2 Fo) \int_0^{Fo} \exp(\delta_l^2 Fo) \frac{\partial \varphi(Fo)}{\partial Fo} dFo + \\ + 2 \sum_{l=1}^{\infty} \cos(\delta_l X) \cdot \exp(-\delta_l^2 Fo) \int_0^1 [T(X, 0) - T(1, 0)] \times \\ \times \cos(\delta_l X) dX, \quad (2)$$

где $\varphi(Fo) = T(1, Fo)$ – заданное граничное условие I рода; $T(X, 0)$ – начальное условие; $\delta_l = \frac{2l-1}{2} \pi$ – характеристические числа; X – безразмерная координата; Fo – безразмерное время.

Первые два слагаемых в правой части уравнения (2) – это составляющие температурного поля от действия граничных условий, третье слагаемое – составляющая температурного поля от действия начальных условий.

В соответствии с методом ДУКУ, решение (2) представляется в виде

$$T(X, Fo) = T(1, Fo) - \sum_{n=1}^g A_n \cdot \Phi_{X,n}(Fo) + \sum_{n=1}^m a_n \cdot f_{X,n}(Fo), \quad (3)$$

где $f_{X,n}(Fo)$ – вспомогательные функции составляющей температурного поля от действия начальных условий; $\Phi_{X,n}(Fo)$ – вспомогательные функции составляющей температурного поля от действия граничных условий:

$$\Phi_{X,n}(Fo) = 2 \sum_{l=1}^{\infty} \frac{(-1)^{l+1}}{\delta_l} \cos(\delta_l X) \Phi_{o,n}(l, Fo), \quad (4)$$

$$\text{где } \Phi_{o,n}(l, Fo) = \frac{n}{2} \exp(-\delta_l^2 Fo) \int_0^{Fo} \exp(\delta_l^2 Fo) Fo^{\frac{n-1}{2}} dFo;$$

$$f_{X,n}(Fo) = 2 \sum_{l=1}^{\infty} \cos(\delta_l X) f_{o,n}(l, Fo), \quad (5)$$

$$\text{где } f_{o,n}(l, Fo) = \exp(-\delta_l^2 Fo) \int_0^1 (X^n - 1) \cos(\delta_l X) dX.$$

В методе ДУКУ температура обогреваемой поверхности тела как функция времени аппроксимируется полиномом вида

$$T(1, Fo) = T_o + \sum_{n=1}^g A_n Fo^{\frac{n}{2}}, \quad (6)$$

а начальное температурное поле тела – многочленом вида

$$T(X, 0) = T(0, 0) + \sum_{n=1}^m a_n X^n, \quad (7)$$

где A_n – коэффициенты, определяемые дискретным удовлетворением граничных условий; a_n – коэффициенты, определяемые дискретным удовлетворением начальных условий.

Из решения (3) температура необогреваемой поверхности пластины определяется как

$$T(0, Fo) = T(1, Fo) - \sum_{n=1}^g A_n \Phi_{0,n}(Fo) + \sum_{n=1}^m a_n f_{0,n}(Fo). \quad (8)$$

Численные значения функций $\Phi_{X,n}(Fo)$, $\Phi_{1,n}(Fo)$, $\Phi_{0,n}(Fo)$, $\Phi_{0-1,n}(Fo)$, $f_{X,n}(Fo)$, $f_{1,n}(Fo)$, $f_{0,n}(Fo)$, $f_{0-1,n}(Fo)$ представлены в [6].

Коэффициенты a_n определяются дискретным удовлетворением заданного начального распределения температур $T(X, 0)$ в m координатах, равномерно расположенных по толщине пластины:

$$T(X_j, 0) = T(0, 0) + \sum_{n=1}^m a_n X_j; \quad j \in \{1, \bar{m}\}, \quad (9)$$

где $T(X_j, 0)$ – заданные значения начальной температуры.

Обработка экспериментальных данных основана на использовании уравнения (6) и сводится к решению систем (3) и (8). При этом значения $T(1, Fo)$ и $T(0, Fo)$ берутся непосредственно из экспериментальной кривой. Решением системы (3) получаем значения коэффициентов A_n как функции пока неизвестного значения коэффициента эффективной теплопроводности $a_{эф}$. Подставляя $A_n(a_{эф})$ в систему (8), получим g уравнений с неизвестным $a_{эф}$. Система решается с использованием одного из итерационных методов.

Алгоритм расчета эффективного коэффициента теплопроводности слоя ТБО реализован в программном пакете MATHCAD. Предлагаемый метод решения обратной задачи теплопроводности опробован для определения эффективного коэффициента теплопроводности слоя ТБО среднего морфологического состава и получения его зависимости от порозности слоя.

Опытные образцы слоя толщиной 50 мм твердых бытовых отходов среднего морфологического состава (бумага – 44,2 %, древесина – 1,8 %, текстиль – 4,7 %, пищевые отходы – 41,8 %, резина – 0,9 %, кости – 1,8 %, пластмасса – 5,3 %) с нулевой начальной влажностью и заданной порозностью нагревали в электрической печи. Порозность определялась отношением объема пор к общему объему пористого тела:

$$f = \frac{V_{пор}}{V_{тела}}. \quad (10)$$

По известному составу образца, массе каждого компонента и плотности компонентов находилась объем, занимаемый компонентами.

В процессе нагрева замерялись температуры обогреваемой и необогреваемой поверхностей с помощью термодатчиков, установленных на поверхности и в центре образца. Для преобразования полученных с термодатчиков аналоговых сигналов в цифровые использовался модуль ввода ОВЕН МВ8А, а также программа Конфигуратор МВА8 для сохранения полученных зна-

чений в памяти компьютера. Экспериментальные температурные зависимости обогреваемой $T(0, Fo)$ и необогреваемой $T(1, Fo)$ поверхностей слоя ТБО приведены на рис. 1.

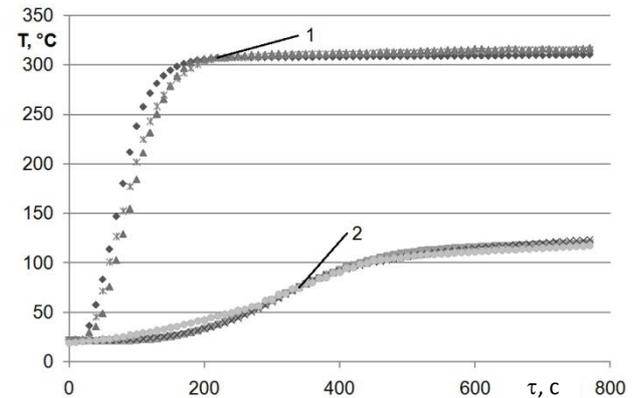


Рис. 1. Экспериментальные кривые изменения температуры поверхности и теплового центра при порозности 0,55: 1 – кривые для поверхности ТБО; 2 – кривые для теплового центра ТБО

Варьируя порозность слоя в интервале от 0,5 до 0,7 и повторяя эксперимент с последующим обращением к программной реализации алгоритма решения ОЗТ, находим соответствующие значения эффективного коэффициента теплопроводности исходя из условия обеспечения среднеквадратичного расхождения расчетных и экспериментальных данных 3 %. С помощью программного пакета TABLECURVE 2D восстановлена квадратичная зависимость эффективной теплопроводности от порозности (рис. 2).

Для слоя предварительно высушенных твердых бытовых отходов зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от порозности слоя можно рассчитывать по формуле

$$a_{эф} = (10,35 - 33,63f + 34,42f^2) \cdot 10^{-6}. \quad (11)$$

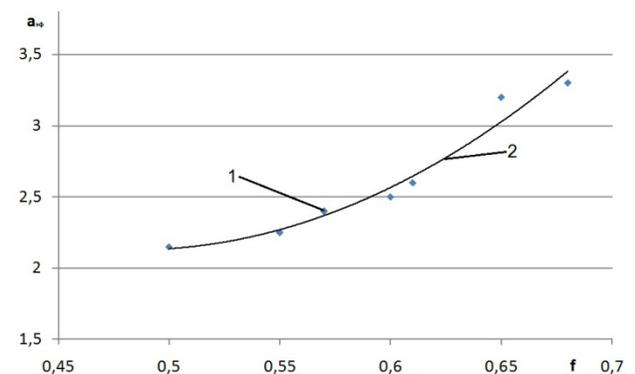


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплопроводности от порозности слоя органосодержащего сырья: 1 – экспериментальные данные; 2 – расчетные

Заключение

Предложенное решение обратных задач теплопроводности для нахождения эффектив-

ного коэффициента температуропроводности пористого слоя основано на использовании метода дискретного удовлетворения краевых условий (ДУКУ).

Полученная зависимость эффективной температуропроводности слоя предварительно высушенных твердых бытовых отходов от порозности в виде $a_{эф} = (10,35 - 33,63f + 34,42f^2) \cdot 10^{-6}$, в интервале температур от 20 до 120 °С может быть рекомендована для расчетов процессов теплообмена в термических реакторах по переработке ТБО.

Список литературы

1. Пат. №2433344. Установка для термического разложения несортированных ТБО.
2. Пат. №2254518. Способ обработки твердых бытовых отходов.
3. **Метод** определения эффективного коэффициента температуропроводности слоя твердых бытовых отходов в процессе термической переработки в реакторе / О.И. Горин, О.Б. Колибаба, Р.Н. Габитов, М.В. Лопатина // Состояние и перспективы развития электротехнологии: сб. ст. XVII Междунар. науч.-техн. конф. (Бенардосовские чтения). Т. 2. – Иваново, 2013. – С. 241–242.
4. **Крылова О.Б.** Совершенствование режимов работы термических печей для нагрева насыпных садов: дис. ... канд. техн. наук. – Ленинград, 1988. – 116 с.
5. **Крылова Л.С.** Проектирование и эксплуатация теплотехнологических установок кузнечно-термического производства машиностроительных заводов: учеб. пособие. – Иваново, 2001. – 96 с.

Колибаба Ольга Борисовна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Горин Олег Иванович,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: gorinov@tvp.ispu.ru

Габитов Рамиль Наилевич,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Самышина Ольга Васильевна,

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», инженер кафедры энергетика теплотехнологий и газоснабжения, e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

6. **Соколов А.К.** Методические указания к использованию таблиц вспомогательных функций для расчета нагрева неограниченной пластины. – Иваново, 1975. – 33 с.

References

1. *Ustanovka dlya termicheskogo razlozheniya nesortirovannykh TBO* [Thermal decomposition of unsorted solid household waste plant]. Patent RF, no. 2433344.
2. *Sposob obrabotki tverdykh bytovykh otkhodov* [Method of processing solid domestic waste]. Patent RF, no. 2254518.
3. Gorinov, O.I., Kolibaba, O.B., Gabitov, R.N., Lopatina, M.V. *Metod opredeleniya effektivnogo koeffitsienta temperaturoprovodnosti sloya tverdykh bytovykh otkhodov v protsesse termicheskoy pererabotki v reaktore* [Method of determining solid household waste layer effective temperature conductivity during thermal utilization in the reactor]. *Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Sostoyanie i perspektivy razvitiya elektrotekhnologii» (Benardosovskie chteniya)* [Proceedings of the XVIIth International Scientific and Technical Conference «Status and Prospects of Electrical Engineering» (Benardos Readings)]. Ivanovo, 2013, vol. 2, pp. 241–242.
4. Krylova, O.B. *Sovershenstvovanie rezhimov raboty termicheskikh pechey dlya nagreva nasypnykh sadok*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of working modes of heat treatment furnaces for bulk load heating. Cand. tech. sci. diss.]. Leningrad, 1988. 116 p.
5. Krylova, L.S. *Proektirovanie i ekspluatatsiya teplotekhnologicheskikh ustanovok kuznechno-termicheskogo proizvodstva mashinostroitel'nykh zavodov* [Design and operation of forging heat technology installations of machine building plants]. Ivanovo, 2001. 96 p.
6. Sokolov, A.K. *Metodicheskie ukazaniya k ispol'zovaniyu tablits vspomogatel'nykh funktsiy dlya rascheta nagreva neograni-chennoy plastiny* [Study guide for using the tables of auxiliary functions to calculate the unlimited plate warming]. Ivanovo, 1975. 33 p.