

Математическое моделирование тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки

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

Авторское резюме

Состояние вопроса: Расчет процессов тепломассообмена в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки связан с определением полей температур и влагосодержаний, расчет которых требует знания теплофизических и термодиффузионных коэффициентов. В настоящее время известны данные по теплофизическим свойствам отдельных компонентов твердых бытовых отходов, что не отражает реальную теплофизическую картину слоя твердых бытовых отходов как пористого тела с эффективными теплофизическими характеристиками. Экспериментальное определение термодиффузионных коэффициентов трудоемко, затратно по времени и требует специального лабораторного оборудования. В связи с этим является актуальной разработка математической модели, в которой поле влагосодержаний учитывается внутренним стоком теплоты, а эффективные теплофизические свойства определяются экспериментально.

Материалы и методы: В качестве метода экспериментального исследования применен зональный метод, позволяющий определять значения коэффициента теплопроводности слоя твердых бытовых отходов. При моделировании процесса сушки использована описательная математическая модель с распределенными параметрами, реализованная численно.

Результаты: Экспериментально определен эффективный коэффициент теплопроводности слоя твердых бытовых отходов. Предложена математическая модель тепломассопереноса в слое твердых бытовых отходов, которая позволяет исследовать процесс его сушки. Математическая модель реализована в программном комплексе ANSYS и верифицирована посредством сравнения с экспериментальными данными с погрешностью не более 5 %.

Выводы: Модель позволяет рассчитать температурные поля в слое твердых бытовых отходов в процессе его сушки с учетом распределенного внутреннего стока теплоты. Предложенная модель может быть применена в расчетах при проектировании термических реакторов для переработки многокомпонентных органических отходов.

Ключевые слова: твердые бытовые отходы, математическая модель слоя, сушка, эффективный коэффициент теплопроводности, зональный метод, влагосодержание, объемный сток теплоты, пористое тело.

Mathematical modeling of heat and mass transfer in solid waste under drying

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

Abstract

Background: Calculation of heat and mass transfer processes in the layer of municipal solid waste (MSW) under drying employs temperature and moisture content field values, the calculation of which requires knowledge of thermal and temperature gradient ratios. The currently available data on thermophysical properties of individual components of solid waste does not reflect the real thermophysical picture of MSW layer as a porous body with efficient thermal characteristics. Experimental determination of the thermogradient coefficients is labor- and time-consuming, and requires special laboratory equipment. Therefore, it is quite urgent to develop a mathematical model in which the moisture content field is considered in the internal heat sink, and the effective thermophysical properties are determined experimentally.

Materials and methods: As a method of experimental study the authors used a zonal method allowing them to determine the thermal conductivity coefficient of solid waste layer. When modeling the drying process they employed a descriptive numerically implemented mathematical model with distributed parameters.

Results: The authors have experimentally determined the effective thermal conductivity coefficient of the solid waste layer and developed a mathematical model of heat and mass transfer in a solid waste layer. The model allows investigating the process of drying, is implemented in the software package ANSYS and verified through its comparison with experimental data with an error of $\leq 5\%$.

Conclusions: The model can be used to calculate temperature fields in the solid waste layer under drying taking into account the distributed internal heat sink. The proposed model can be applied in calculations when designing thermal reactors for processing multicomponent organic waste.

Key words: municipal solid waste, mathematical model of a layer, drying, effective thermal conductivity coefficient, zonal method, moisture content, volumetric flow of heat, porous body.

DOI: 10.17588/2072-2672.2016.6.043-048

Состояние вопроса. 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, стеклотбой.

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 и рекультивацией земельных угодий.

Процесс термической переработки ТБО чаще всего осуществляется в печах шахтного типа (термических реакторах) [1]. 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, 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). Образующийся в результате газификации ТУО топливный газ в смеси с пиролизным газом является качественным горючим, пригодным для использования.

Если для решения вопроса сбора и транспорта ТБО достаточно информации об их влажности и плотности, то при выборе метода и технологии обезвреживания и последующей утилизации необходимо получить полную информацию о морфологическом и элементном составе и теплофизических свойствах ТБО в том числе. Морфологический состав ТБО приведен в табл. 1¹.

Для достижения требуемой полноты обезвреживания отходов необходимо расчетно-

экспериментальное определение 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 печах для термической переработки ТБО, где используется предварительная подготовка по выделению из ТБО негорючей части, первоначальная влажность сырья может достигать 40 % [2, 3].

Таблица 1. Морфологический состав ТБО для разных климатических зон, % по массе

Компонент	Климатическая зона		
	средняя	южная	северная
Пищевые отходы	35...45	40...49	32...39
Бумага, картон	32...35	22...30	26...35
Дерево	1...2	1...2	2...5
Черный металлолом	3...4	2...3	3...4
Цветной металлолом	0,5...1,5	0,5...1,5	0,5...1,5
Текстиль	3...5	3...5	4...6
Кости	1...2	1...2	1...2
Стекло	2...3	2...3	4...6
Кожа, резина	0,5...1	1	2...3
Камни, штукатурка	0,5...1	1	1...3
Пластмасса	3...4	3...6	3...4
Прочее	1...2	3...4	1...2
Отсев (менее 15 мм)	5...7	6...8	4...6

Таким образом, с точки зрения энергозатратности процесса повышенный интерес представляет собой зона сушки.

Материалы и методы. Для расчета температурного поля слоя органического сырья в зоне сушки реактора предложена математическая модель, согласно которой слой ТБО рассматривается как условное квазиоднородное изотропное пористое тело с эффективными теплофизическими свойствами. Расчет температурных полей слоя ТБО, представляющего собой многокомпонентное пористое тело, вызывает необходимость определения зависимости его эффективных тепло-физических характеристик от влагосодержания и температуры. В настоящее время существует большое количество различных методов и методик определения эффективных теплофизических характеристик пористых тел [4, 5, 6]. Что касается твердых бытовых отходов, то в литературе имеются лишь разрозненные данные, полученные на основе экспериментальных исследований теплофизических свойств некоторых отдельно взятых компонентов твердых бытовых отходов [7, 8, 9].

Модель позволяет перейти от реальной пористой структуры к ее приближению.

Допущения при моделировании:

1. Пористое тело представлено в виде сплошной среды с эффективными теплофизиче-

¹ Термическая утилизация твердых бытовых отходов. Концепция НИИСтромкомполит. – Красноярск, 2006. – 15 с.

скими характеристиками и усредненными величинами температур, концентраций, порозности и т.д.

2. В качестве модели твердого «скелета» (ТБО) принята трехкомпонентная смесь с вкраплениями [4].

3. Твердый «скелет» и газ, заполняющий поры, увлажнены.

4. Температура газа, заполняющего поры, принимается равной температуре материала.

Математическая формулировка задачи представлена дифференциальным уравнением теплопроводности в одномерной постановке с распределенным внутренним источником (стоком) теплоты q_v и эффективными теплофизическими свойствами: теплопроводностью λ_Σ и теплоемкостью c_Σ , зависящими от температуры T и влагосодержания U :

$$c_\Sigma(T, U) \rho_\Sigma \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_\Sigma(T, U) \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right) - q_v(x, \tau) \quad (1)$$

в совокупности с краевыми условиями:

$$T(x, 0) = T_0; \quad (2)$$

$$(\alpha(T_r - T(0, \tau)) = \lambda_\Sigma(U, T) \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x}; \quad (3)$$

$$\lambda_\Sigma(T, U) \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (4)$$

где ρ_Σ – средняя эффективная плотность, кг/м³.

В правой части уравнения (1): первое слагаемое характеризует перенос теплоты теплопроводностью в пористом теле; второе слагаемое – распределенный внутренний источник (сток), представляющий затраты теплоты на испарение влаги в слое в процессе его сушки.

Начальное условие (2) показывает, что в начальный момент времени $\tau_0 = 0$ тело имеет равномерное распределение температуры. На поверхности тела $x = 0$ принято граничное условие 3 рода (3), которое указывает на то, что теплота подводится к телу посредством конвекции. Коэффициент теплоотдачи α в (3) найден по формуле, предложенной нами в [10]. Граничное условие (4) – это условие термодинамического равновесия с окружающей средой.

Для выявления зависимостей коэффициентов переноса от температуры и влагосодержания материала поставлен и проведен ряд опытов. При этом нами использовался зональный метод, который обеспечивает точность определения значений теплофизических коэффициентов, применяемую в технических расчетах [11, 12].

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. Методика эксперимента заключалась в следующем. Исследуемый материал (образец слоя ТБО) помещался в два тонкостенных медных цилиндра диаметром 16 мм и длиной 110 мм. Один цилиндр подвешивался к весовому устройству, другой – служил для фиксации изменения температуры материала с помощью термопар, соединенных с преобразователем МВА8. Затем цилиндры помещались в

изолированную трубу, продуваемую горячим теплоносителем со скоростью 8 м/с, исключаящей внешнедиффузионное сопротивление переносу пара с открытых концов образцов в окружающую среду. Во времени фиксировались температура материала по длине образца и убыль массы. Таким образом, были получены кривые кинетики сушки и температурные кривые, из которых был рассчитан эффективный коэффициент теплопроводности.

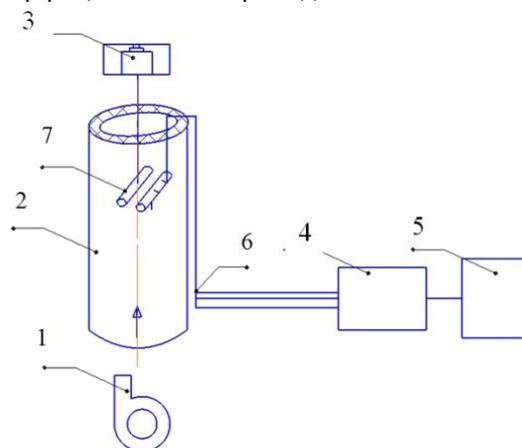


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – воздухоподогреватель; 2 – труба с изоляцией; 3 – весы электронные; 4 – модуль МВА-8; 5 – ПК; 6 – термопары ТХА(к); 7 – исследуемые образцы

В соответствии с зональным методом, интервал изменения концентрации влаги в твердой фазе $U_n \div U_k$ и температур $T_n \div T_k$ разбивался на n зон, в каждой из которых коэффициент теплопроводности принимался постоянным. Для каждой зоны определялось значение τ_i (время изменения концентрации от U_{ni} до U_{ki} и температуры материала от T_{ni} до T_{ki}).

Для определения эффективного коэффициента теплопроводности зональный метод нами был дополнен снятием температурной кривой. Каждая температурная кривая разбивалась на n зон, соответствующих зонам кривой кинетики. Для каждой из зон определяли T_{ni} и T_{ki} и составляли тепловой баланс:

$$q_i = \frac{m_c c_c \Delta T_i + m_b c_b \Delta T_i + m_c \Delta U_i r}{\Delta \tau_i}. \quad (5)$$

Затем, считая, что количество теплоты, необходимое для нагрева массы материала и содержащейся в нем влаги, а также для испарения части влаги, подводится путем теплопроводности через боковую поверхность образца, определяли эффективный коэффициент теплопроводности влажного материала в процессе сушки по формуле

$$\lambda_i = \frac{q_i \delta}{F (T_r - T_{Mi})}. \quad (6)$$

В уравнениях (5), (6) обозначено: m_c – масса сухого вещества в образце, кг; c_c – удельная

теплоемкость сухого вещества, Дж/(кг·К); $\Delta T_i = T_{ki} - T_{ni}$ – изменение температуры материала за время $\Delta \tau_i$, °С; m_b – масса влаги в образце к моменту времени τ_i , кг; c_b – теплоемкость воды, Дж/(кг·К); δ – радиус образца, м; F – боковая поверхность образца, м²; $T_r - T_{m_i}$ – разность температур между греющей средой и средней температурой материала в i -й промежуток времени, °С.

Результаты исследований. Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков на рис. 2, 3.

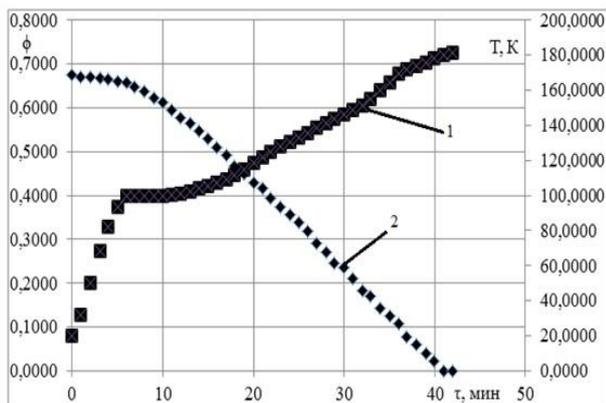


Рис. 2. Температура и влажность образца слоя ТБО в процессе сушки при температуре 192 °С и порозности 0,43: 1 – температура ТБО; 2 – влажность ТБО в долях

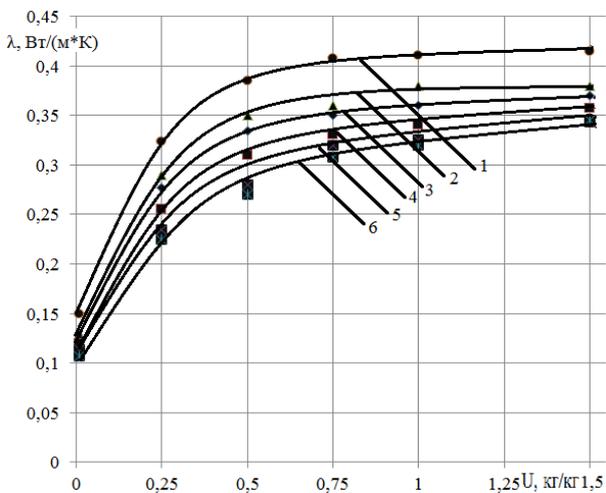


Рис. 3. Изменение эффективного коэффициента теплопроводности ТБО в процессе сушки при шести температурных режимах и порозности 0,75: 1 – 222 °С; 2 – 192 °С; 3 – 175 °С; 4 – 157 °С; 5 – 146 °С; 6 – 132 °С

Полученная зависимость $\lambda_{\text{Э}}(T_r, U)$ аппроксимирована в пакете TableCurve3D в диапазоне $U = 0-2$ кг/кг и $T_r = 120-250$ °С полиномом с погрешностью не более 3 % ($R^2 = 0.98$):

$$\lambda_{\text{Э}} U, t_r = 0,1004 + 0,0006 \cdot T_r + (-0,0538 + 0,0038 \cdot T_r) \cdot U + (0,4583 - 0,0067 \cdot T_r) \cdot U^2 + (-0,3221 + 0,0041 \cdot T_r) \cdot U^3 + (0,107 - 0,001 \cdot T_r) \cdot U^4. \quad (7)$$

Эффективные теплоемкость и плотность найдены по принципу аддитивности по известным свойствам влажных материала и газа, заполняющего поры:

$$c_{\text{Э}} = c_m(1-f) + c_r f; \quad (8)$$

$$\rho_{\text{Э}} = \rho_m(1-f) + \rho_e f. \quad (9)$$

Закон изменения внутреннего стока теплоты

$$dq_v(x, \tau) = r \rho_{\text{Э}} \frac{dU(x, \tau)}{d\tau},$$

получен на основе экспериментальных кривых кинетики сушки образца слоя ТБО.

Начальное значение величины теплового потока, затраченного на испарение влаги в слое, рассчитывалось по формуле

$$q_{v0} = r \rho_{\text{Э}} \frac{U_0}{\tau}, \quad (10)$$

где r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; U_0 – начальное влагосодержание материала, кг/кг; τ – время, с.

Полученная зависимость $q_v(x, \tau)$ аппроксимирована в диапазоне $x = 0-0,12$ м и $\tau = 0-140$ мин в пакете TableCurve3D с погрешностью не более 5 % ($R^2 = 0.9523$) уравнением, имеющим вид

$$q_v(x, \tau) = a + bx + c \ln(\tau) + dx^2 + e (\ln(\tau))^2 + fx \ln(\tau) + gx^3 + h (\ln(\tau))^3 + ix (\ln(\tau))^2 + jx^2 \ln(\tau), \quad (11)$$

где $a, b, c, d, e, f, g, h, i, j$ – эмпирические коэффициенты (табл. 2).

Таблица 2. Значения эмпирических коэффициентов в зависимости от температуры теплоносителя

$T_r, ^\circ\text{C}$	200	220	240
a	-169249,18	-180227,04	-443785,13
b	111005,64	116594,83	261212,97
c	71999,961	132778,1655	193556,37
d	24765,852	-8406,0628	-62086,673
e	-3357,0393	-36494,581	-109245,69
f	-88192,441	-49839,97	10544,12
g	-1169,9057	-68,461905	2839,5552
h	-841,73473	52,787857	40142,009
i	12770,324	-3412,1801	-41709,87
j	-3014,9413	5022,6507	18518,182

Графическая интерпретация стока теплоты $q_v(x, \tau)$ при $T_r = 200$ °С показана на рис. 4.

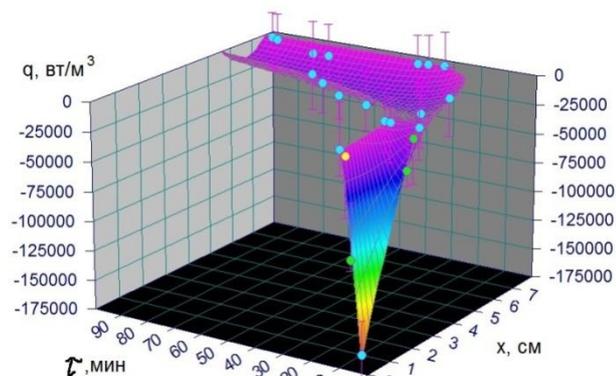


Рис. 4. Зависимость внутреннего объемного стока теплоты $q_v(x,t)$ при $T_r = 200\text{ }^\circ\text{C}$

Математическая модель процесса сушки слоя ТБО реализована в конечно-элементном пакете ANSYS [13, 14]. Построение геометрии модели производилось в среде SolidWorks с последующим импортированием в ПК ANSYS-Fluent.

Адекватность модели проверена сопоставлением результатов расчета с данными лабораторного эксперимента, в ходе которого фиксировались нестационарные температурные поля в нескольких сечениях по толщине образца. На рис. 5 представлена схема экспериментальной установки. Методика эксперимента заключалась в следующем. Исследуемый материал (образец слоя ТБО) помещался на сетку и подвешивался к весовому устройству, фиксировались изменения температуры материала с помощью термопар, соединенных с преобразователем МВА8. Затем образец помещался в изолированную трубу, продуваемую горячим теплоносителем с температурой в диапазоне 200–250 °С. Во времени замерялись температура материала по длине образца и убыль массы. При проведении эксперимента учитывалась величина усадки слоя ТБО по величине смещения каждой термопары в процессе нагрева.

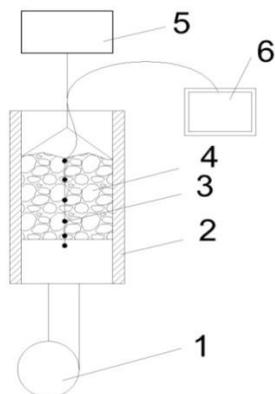


Рис. 5. Схема экспериментальной установки: 1 – воздухоподогреватель; 2 – труба с изоляцией; 3 – термопары ТХА(к); 4 – исследуемый образец ТБО; 5 – весы электронные; 6 – ПК

Результаты сравнения приведены на рис. 6.

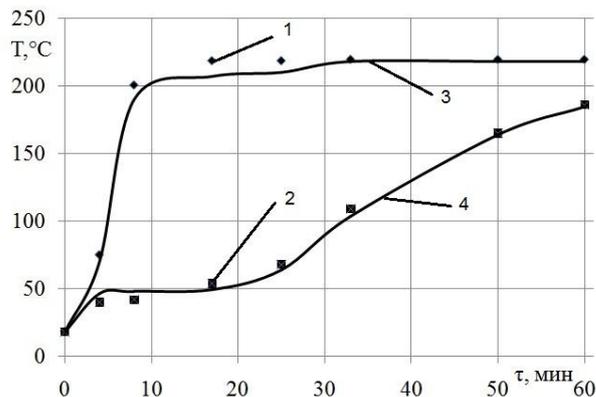


Рис. 6. Экспериментальные и расчетные температуры в слое ТБО в процессе сушки: 1 – экспериментально измеренная температура ТБО на поверхности; 2 – экспериментально измеренная температура ТБО в центре; 3 – расчетная температура ТБО на поверхности; 4 – расчетная температура ТБО в центре

Расхождение результатов моделирования с экспериментальными данными не превышает 5 %.

Выводы. На основе зонального метода экспериментально определен эффективный коэффициент теплопроводности слоя твердых бытовых отходов как многокомпонентного пористого материала в процессе его сушки.

Разработанная математическая модель для расчета процессов теплообмена позволяет определять температурные поля слоя твердых бытовых отходов в процессе сушки.

Использование результатов моделирования позволит рассчитать затраты энергии на процесс сушки в термическом реакторе.

Список литературы

- Шубов Л.Я., Ставровский М.Е., Шехиров Д.В. Технологии отходов / ГОУВПО «Московский государственный университет сервиса». – М., 2006. – 410 с.
- Горин О.И., Колибаба О.Б., Самышина О.В., Горбунов В.А. О влиянии влажности твердых бытовых отходов, содержащих древесину, на температурный режим термической переработки // Известия вузов. Лесной журнал. – 2012. – № 3. – С. 35–36.
- Prabir Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory // Academic Press, 30 Corporate drive. – Burlington, USA, 2010. – P. 365.
- Васильев Л.Л., Танаева С.А. Теплофизические свойства пористых материалов. – Минск: Наука и техника, 1971. – 268 с.
- Дульнев Г.Н., Заричняк Ю.П. Теплопроводность смесей и композиционных материалов. – Л.: Энергия, 1974. – 264 с.
- Лыков М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 430 с.
- Ильина С.А., Фокин В.М. Экспериментальное определение коэффициента температуропроводности овощей // Вестник АГТУ. – 2006. – № 2. – С. 187–190.
- Кошелева М.К., Бильман Г.В., Горнушкина Н.И. Расчет процесса сушки плоских текстильных материалов // Успехи в химии и химической технологии. – 2010. – Т. 24, № 11(116). – С. 86–89.
- Сокольский А.И., Козлов А.В., Федосов С.В. Исследование теплофизических свойств золокерамических смесей // Ученые записки инженерно-технологического факультета ИГАСА. – 1999. – Вып. 2. – С. 121–123.
- Колибаба О.Б., Габитов Р.Н., Сокольский А.И. Исследование сушки слоя твердых бытовых отходов в про-

цессе термической переработки // Вестник ЧГУ. – 2015. – № 3. – С. 21–25.

11. Рудобашта С.П., Очнев Э.Н., Плановский А.Н. Зональный метод расчета кинетики процесса сушки // Теоретические основы химической технологии. – 1975. – Т. 9. – № 2. – С. 185.

12. Рудобашта С.П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83. – № 4. – С. 705–714.

13. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: учеб. пособие. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2013. – 149 с.

14. Басов К.А. Графический интерфейс комплекса ANSYS. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 248 с.

References

1. Shubov, L.Ya., Stavrovskiy, M.E., Shekhirev, D.V. *Tekhnologii otkhodov* [Waste technologies]. Moscow, 2006. 410 p.

2. Gorinov, O.I., Kolibaba, O.B., Samyshina, O.V., Gorbunov, V.A. O vliyaniy vlazhnosti tverdykh bytovykh otkhodov, sodержashchikh drevesinu, na temperaturnyy rezhim termicheskoy pererabotki [On the influence of moisture content of municipal wood-containing solid waste on the temperature regime of thermal processing]. *Izvestiya vuzov. Lesnoy zhurnal*, 2012, vol. 3, pp. 35–36.

3. Prabir, Basu. Biomass Gasification and Pyrolysis: practical design and theory. Academic Press, 30 Corporate drive. Burlington, USA, 2010. 365 p.

4. Vasilyev, L.L., Tanaeva, S.A. *Teplofizicheskie svoystva poristykh materialov* [Thermophysical properties of porous materials]. Minsk, Nayka i tekhnika, 1971. 268 p.

5. Dul'nev, G.N., Zarichnyak, Yu.P. *Teplotoprovodnost' smesey i kompozitsionnykh materialov* [Thermal conductivity of composite materials and mixtures]. Leningrad, Energiya, 1974. 264 p.

6. Lykov, M.V. *Sushka v khimicheskoy promyshlennosti* [Drying in chemical industry]. Moscow, Khimiya, 1970. 430 p.

7. Il'ina, S.A., Fokin, V.M. Eksperimental'noe opredelenie koeffitsienta temperaturoprovodnosti ovoshchey [Experimental determination of thermal diffusivity of vegetables]. *Vestnik AGTY*, 2006, no. 2, pp. 187–190.

8. Kosheleva, M.K., Bil'man, G.V., Gornushkina, N.I. Raschet protsessa sushki ploskikh tekstil'nykh materialov [Calculation of the drying process of flat textile materials]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2010, vol. 24, no. 11(116), pp. 86–89.

9. Sokol'skiy, A.I., Kozlov, A.V., Fedosov, S.V. Issledovanie teplfizicheskikh svoystv zolokeramicheskikh smesey [Research into thermophysical properties of ash-ceramic mixtures]. *Uchenye zapiski inzhenerno-tekhnologicheskogo fakul'teta IGASA*, 1999, issue 2, pp. 121–123.

10. Kolibaba, O.B., Gabitov, R.N., Sokol'skiy, A.I. Issledovanie sushki sloya tverdykh bytovykh otkhodov v protsesse termicheskoy pererabotki [Research into heating and drying of municipal solid waste layer in thermal processing]. *Vestnik ChGU*, 2015, no. 3, pp. 21–25.

11. Rudobashta, S.P., Ochnev, E.N., Planovskiy, A.N. Zonal'nyy metod rascheta kinetiki protsessa sushki [Zonal method for calculating drying kinetics]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1975, vol. 9, no. 2, p. 185.

12. Rudobashta, S.P. Raschet kinetiki sushki dispersnykh materialov na osnove analiticheskikh metodov [Calculation of drying kinetics of dispersed materials based on analytical methods]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 705–714.

13. Bruyaka, V.A., Fokin, V.G., Kuraeva, Ya.V. *Inzhenernyy analiz v ANSYS Workbench* [Engineering analysis in ANSYS Workbench]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy tekhnicheskii universitet, 2013. 149 p.

14. Basov, K.A. *Graficheskiy interfeys kompleksa ANSYS* [Graphical interface of the ANSYS complex]. Moscow, DMK Press, 2006. 248 p.

Колибаба Ольга Борисовна,

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

Kolibaba Olga Borisovna,

Ivanovo State Power Engineering University,
Candidate of Engineering, Associate Professor of Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Габитов Рамиль Наилевич,

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

Gabitov Ramil Nailevich,

Ivanovo State Power Engineering University,
Engineer of Thermal Technologies and Gas Supply Department,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Муратова Татьяна Викторовна,

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
магистрант 1-го курса,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru

Muratova Tatyana Viktorovna,

Ivanovo State Power Engineering University,
1st year Master Course Student,
e-mail: tevp@tvp.ispu.ru