

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ПРОЦЕССА В ОДИНОЧНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЧАСТИЦЕ

А.В. Митрофанов, Л.Н. Овчинников, Н.Л. Овчинников, А.В. Огурцов, О.И. Лапшина

Андрей Васильевич Митрофанов (ORCID 0000-0002-4651-7473)*, Антон Валерьевич Огурцов (ORCID 0000-0002-6177-4419)

Кафедра прикладной математики, Ивановский государственный энергетический университет, ул. Рабфак-
ковская, 34, Иваново, Российская Федерация, 153003

E-mail: and2mit@mail.ru*, ogurtsovav@mail.ru

Лев Николаевич Овчинников

Кафедра процессов и аппаратов химической технологии, Ивановский государственный химико-техноло-
гический университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: ovchinnikov_140@mail.ru

Николай Львович Овчинников

Кафедра технологии керамики и наноматериалов, Ивановский государственный химико-технологиче-
ский университет, Шереметевский пр., 7, Иваново, Российская Федерация, 153000

E-mail: ovchinnikovnl_1972@mail.ru

Лапшина Ольга Ивановна (ORCID 0000-0002-8502-9536)

Управление аспирантуры и докторантуры, Ивановский государственный энергетический университет
им. В.И. Ленина, ул. Рабфаковская, 34, Иваново, Российская Федерация, 153003

E-mail: oilapshina@mail.ru

В работе на основе разностной формулировки закона теплопроводности Фурье предложена одномерная математическая модель теплопроводности в цилиндре при наличии конвективного теплообмена с внешней газовой средой. Для предложенной модели выполнена параметрическая идентификация на основе использования известных данных и эмпирических закономерностей для материальных констант процесса. Используемые данные позволили адаптировать математическую модель для описания процесса тепловой обработки частиц гранулированного топлива. Проверка работоспособности предложенной таким образом физико-математической модели была выполнена путем сопоставления получаемых расчетных прогнозов с данными натурного эксперимента. Для натурного эксперимента частицы топлива были приготовлены таким образом, что в двух точках внутри каждой из них были размещены спай термомпар. Наличие спаев термомпар непосредственно внутри частиц позволило фиксировать локальные значения температур материала в процессе его тепловой обработки. Частицы с термомпарами были размещены в аппарате с активным гидродинамическим режимом газового теплоносителя. Таким образом, в ходе расчетно-экспериментального исследования были получены кинетические характеристики нагрева термически массивных тел цилиндрической формы при трех различных гидродинамических режимах. Расчетные прогнозы и экспериментальные данные находятся в хорошем для инженерных расчетов соответствии, что свидетельствует о достаточной прогностической эффективности предложенной физико-математической модели и дает возможность рассматривать ее в качестве достоверной основы для построения компьютерных методов расчета процессов теплопереноса. Предложенная математическая модель может служить также элементом для сборки более сложных дискретных моделей процессов теплообмена в одиночной частице и/или моделей функционирования технологической аппаратуры для тепловой обработки сыпучих сред.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоотдача, кинетика, численное моделирование, явная разностная схема

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE THERMAL PROCESS IN AN INDIVIDUAL CYLINDRICAL PARTICLE

A.V. Mitrofanov, L.N. Ovchinnikov, N.L. Ovchinnikov, A.V. Ogurtsov, O.I. Lapshina

Andrey V. Mitrofanov (ORCID 0000-0002-4651-7473)*, Anton V. Ogurtsov (ORCID 0000-0002-6177-4419)
Department of Applied Mathematics, Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya st., 34,
Ivanovo, 153003, Russia
E-mail: and2mit@mail.ru*, ogurtsovav@mail.ru

Lev N. Ovchinnikov

Department of Processes and Apparatuses of Chemical Technology, Ivanovo State University of Chemistry and
Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: ovchinnikov_140@mail.ru

Nikolay L. Ovchinnikov

Department of Technology of Ceramics and Nanomaterials, Ivanovo State University of Chemistry and
Technology, Sheremetevskiy ave., 7, Ivanovo, 153000, Russia
E-mail: ovchinnikovnl_1972@mail.ru

Olga I. Lapshina (ORCID 0000-0002-8502-9536)

Department of Postgraduate and Doctoral Studies, Ivanovo State Power Engineering University, Rabfakovskaya
st., 34, Ivanovo, 153003, Russia
E-mail: oilapshina@mail.ru

The paper proposes a one-dimensional mathematical model of thermal conductivity in a cylinder under conditions of convective heat exchange with an external gas medium based on the difference formulation of Fourier's law of thermal conductivity. Parametric identification was performed for the proposed model based on the use of known data and empirical regularities for the material constants of the process. The mentioned data made it possible to adapt a mathematical model to describe the process of heat treatment of granular fuel particles. The verification of the operability of the physical and mathematical model proposed in this way was performed by comparing the calculated forecasts obtained with the data of a full-scale experiment. For a full-scale experiment fuel particles were prepared in such a way that thermocouple junctions were placed at two points inside each of them. The presence of thermocouple junctions directly inside the particles made it possible to fix local temperature values of the material during its heat treatment. Particles with thermocouples were placed in the apparatus with the active hydrodynamic regime of a heating gas medium. Thus, during the computational and experimental study, kinetic characteristics of heating thermally massive cylindrical bodies were obtained under three different hydrodynamic regimes. The calculated forecasts and experimental data are in good agreement for engineering calculations, which indicates sufficient predictive effectiveness of the proposed physical and mathematical model and makes it possible to consider it as a reliable basis for constructing computer methods for calculating heat transfer processes. The proposed mathematical model can also serve as an element for assembling more complex discrete models of heat and mass transfer processes in a single particle and/or models of the functioning of technological equipment for heat treatment of bulk media.

Key words: thermal conductivity, heat transfer, kinetics, numerical modeling, explicit difference scheme

Для цитирования:

Митрофанов А.В., Овчинников Л.Н., Овчинников Н.Л., Огурцов А.В., Лапшина О.И. Расчетно-экспериментальное исследование теплового процесса в одиночной цилиндрической частице. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2022. Т. 65. Вып. 9. С. 97–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6679.

For citation:

Mitrofanov A.V., Ovchinnikov L.N., Ovchinnikov N.L., Ogurtsov A.V., Lapshina O.I. Computational and experimental study of the thermal process in an individual cylindrical particle. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2022. V. 65. N 9. P. 97–104. DOI: 10.6060/ivkkt.20226509.6679.

ВВЕДЕНИЕ

Теплообмен между газовым потоком и слоем частиц является ответственным и энергоемким этапом многих технологий промышленного производства (сушки, физико-химических превращений и др.) [1-7]. При этом могут быть выбраны различные формы организации контакта между слоем и потоком газа. Достаточно часто газовый поток фильтруется сквозь пустоты между неподвижными частицами [3-4]. Широко распространен как технологический прием перевод сыпучей среды в легкоподвижное псевдооживленное состояние с активным перемешиванием частиц за счет энергии, сообщаемой им восходящим потоком жидкости или газа [5-6]. В ряде случаев подвижность частиц и их перемешивание обеспечивается за счет механического побуждения (виброоживленный слой) на фоне фильтрации газового агента между частицами [7-8].

В настоящей работе авторы не ставят перед собой задачи всестороннего анализа возможных способов организации межфазного контакта газ-частицы. Отмеченные организационные формы контактирования, на наш взгляд, позволяют очертить принципиальные варианты, которые, как видно, характеризуются подвижностью или неподвижностью частиц, а также способом приведения частиц в движение (за счет газа или механически). Вместе с тем, например, при оживлении слоя частиц газом в зависимости от конструктивного оформления процесса могут наблюдаться достаточно специфические режимы как в отношении характера движения частиц, так и в отношении параметров теплообмена (фонтанирование [9], циркуляция [10] и др.).

Для рациональной организации технологических процессов, в основе которых лежит межфазный теплообмен, требуются надежные методы кинетического расчета. Важными задачами, решение которых при этом необходимо для описания кинетики и динамики процесса переноса теплоты в целом, являются задачи моделирования и расчета внутреннего и внешнего теплообмена [1-6]. Иногда исследователи ограничиваются решением только внешней задачи, полагая, что частицы материала можно рассмотреть в качестве термически тонких тел [10-11]. Однако в ряде случаев эволюция полей температуры в одиночной частице является критически важной характеристикой с точки зрения построения прогностически эффективной модели функционирования технологического оборудования [12-13].

Необходимость решения задач внешнего теплообмена для промышленных технологий

достаточно очевидна, а расчет внутреннего теплообмена необходим не всегда (часто процесс может быть описан с достаточной для инженерных расчетов точностью и без решения этой задачи [11]). Тем не менее, принятие допущения о возможности исключения из расчета факторов внутреннего теплообмена требует обоснования с учетом термических, теплообменных, структурно-механических и других характеристик. При рассмотрении задач теплопроводности (без теплообмена) необходимо принять во внимание разность значений температур на межфазной границе между теплоносителем и частицей и в глубине нагреваемого тела (отношение внутреннего и внешнего термических сопротивлений), для этого используется тепловой критерий Био (Bi) [14].

В задачах сопряженного теплообмена также широко используют классификации дисперсных материалов как объектов сушки, предложенные различными авторами и обобщенные на уровне известных монографий [1, 14-17]. В контексте данной работы представляется необходимым отметить, что наиболее информативной является классификация дисперсных материалов с учетом величины диффузионного критерия Био (Bi_d), значение которого определяет тип технологической задачи (до $Bi_d \leq 0,1$ – внешняя задача, до $Bi_d = 20$ – смешанная задача, $Bi_d > 20$ – внутренняя задача теплообмена) [18]. Однако, несмотря на наличие приведенных рекомендаций, их использование на практике не приводит к однозначным результатам, так как при оценке значений чисел Bi_d и Bi приходится исходить из того, что достоверно известны материальные константы процессов. Вместе с тем, например, коэффициенты теплоотдачи от поверхности тела к окружающей среде, теплопроводности, диффузии и другие параметры редко точно известны заранее, а кроме того часто являются нестационарными в химико-технологических процессах. В этой связи актуальными представляются задачи построения простых, но информативных моделей поведения ансамблей термически тонких частиц в технологической аппаратуре [10-11], а также построение доступных в инженерной практике моделей теплообменных процессов в одиночных частицах различной геометрии [13, 19], в основу которых положена единая методология описания.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретические основы физико-математического моделирования

Для расчета величины числа Био можно использовать соотношение вида [14]:

$$Bi = \alpha \cdot \frac{d}{\lambda}, \quad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); d – характерный размер частицы, м; λ – коэффициент теплопроводности материала частицы, Вт/(м·К).

Для построения математической модели переноса теплоты внутри цилиндрической частицы предложена явная разностная схема, проиллюстрированная рис. 1. Частица представлена как цилиндр, состоящий из счетного числа n цилиндрических слоев толщиной Δr каждый. Любой отдельный слой рассматривается как объект с идеальным равномерным распределением свойств. Соседние цилиндрические слои могут обмениваться порциями теплоты, при этом обмен происходит через соответствующие цилиндрические поверхности (нумерация которых на рис. 1 не показана, но номер внешней цилиндрической поверхности совпадает с номером ячейки).

Изменение распределения температуры по радиусу частицы определяется на основе разностной аппроксимации процессов нестационарной теплопроводности. Количества теплоты, содержащиеся в отдельных слоях, организованы в вектор-столбец теплового состояния материала $Q = \{Q_i\}$, который имеет размерность $n \times 1$.

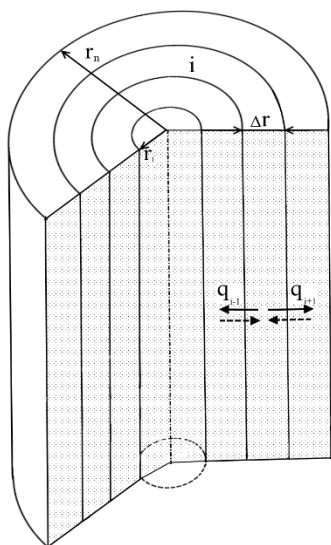


Рис. 1. Расчетная схема моделирования радиального переноса теплоты в цилиндрической частице
 Fig. 1. The calculation scheme of the model of radial heat transfer in a cylindrical particle

Эволюция вектора состояний наблюдается в дискретные моменты времени $t_k = (k - 1)\Delta t$, где Δt – продолжительность временного перехода, k – номер временного перехода (целочисленный аналог времени). Эволюция состояния рассчитывается на основе рекуррентных матричных процедур. При рассмотрении теплового баланса в i -й ячейке учитывается, что она граничит с соседними ячейками

с номерами $(i + 1)$ и $(i - 1)$, которые могут обмениваться с ней порциями теплоты q_{i-1} и q_{i+1}

$$q_{i-1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i-1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi \cdot r_{i-1} \cdot L) \cdot \Delta t \text{ для } i = \overline{2, n}; \quad (2)$$

$$q_{i+1}^k = \left[-\lambda_i^k \frac{(T_i^k - T_{i+1}^k)}{\Delta r} \right] (2\pi \cdot r_i \cdot L) \cdot \Delta t \text{ для } i = \overline{1, n-1}, \quad (3)$$

где T_i – элемент вектора температур $T = \{T_i\}$ материала в ячейках, который имеет размерность $n \times 1$; L – высота цилиндрического слоя.

Множители в квадратных скобках в правой части уравнений (2)-(3) представляют собой линейные плотности теплового потока. Таким образом, внутренняя задача переноса теплоты в частице описывается обычным образом [14-17] исходя из разностных формулировок законов теплопроводности Фурье (в одномерной постановке задачи). При этом слагаемые в круглых скобках позволяют учесть зависящую от радиуса поверхность переноса (форму домена).

Значение теплопроводности материала гранулы (0,051 Вт/м·К) было получено, исходя из состава гранулы (10% дисперсной древесины и 90% торфа) и допущения, что вклад в общее значение теплопроводности пропорционален доле компонента (правило аддитивности):

$$\lambda = \lambda_1 \cdot x_1 + \lambda_2 \cdot x_2, \quad (4)$$

где λ_1 и x_1 – теплопроводность и массовая доля древесины (теплопроводность принята равной 0,07 Вт/(м·К) [20]); λ_2 и x_2 – теплопроводность и массовая доля торфа (теплопроводность принята равной 0,049 Вт/(м·К) [20]).

Эволюция распределений теплоты (описываемая вектором Q) рассчитывается по следующим рекуррентным соотношениям:

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_{i+1}^k \text{ для } i = \overline{2, (n-1)}; \quad (5)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i+1}^k \text{ для } i = 1; \quad (6)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k + q_{i-1}^k + q_s^k \text{ для } i = n, \quad (7)$$

где q_s^k – количества теплоты, получаемые или отдаваемые частицей в результате межфазного теплообмена через наружную поверхность на k -м рекуррентном шаге.

Интенсивность внешнего теплообмена частицы с потоком сушильного агента в общем случае зависит от характера распределений полей температур этого потока в пространстве аппарата, для описания которых необходимы специальные модели [10-11]. Однако в данной работе рассматривается упрощенная ситуация, когда в аппарате находится одиночная частица, а свойства сушильного агента могут считаться постоянными. Для оценки

определяющих критериев (постоянных при использовании данного допущения) используются следующие соотношения [21]:

$$Nu = C \cdot Re^y \cdot Pr^{0,38} \cdot \left(\frac{Pr}{Pr_w} \right)^{0,25}, \quad (8)$$

где Nu – числа Нуссельта; Re – число Рейнольдса; Pr – число Прандтля, Pr_w – критерий Прандтля, в котором кинематическая вязкость и температуропроводность берутся при температуре стенки трубы или цилиндра, а не при температуре потока. Эмпирические параметры C и y принимаются в зависимости из режима течения: $C = 0,50$ и $y = 0,50$ при $5 < Re < 1000$; $C = 0,25$ и $y = 0,60$ при $1000 < Re < 200000$; $C = 0,023$ и $y = 0,80$ при $30000 < Re < 2000000$ [21].

Искомый коэффициент теплообмена α рассчитывается как [14]:

$$\alpha = Nu \cdot \lambda / (2 \cdot r_n). \quad (9)$$

Таким образом,

$$q_s^k = -\alpha \cdot (T_n^k - T_s) (2\pi r_n L) \frac{\Delta t}{dr}. \quad (10)$$

Соотношения (8)-(10) позволяют выполнить замыкание системы уравнений (5)-(7), описывающей тепловой баланс в частице с учетом внутреннего теплопереноса и межфазного обмена теплотой с внешней средой, свойства которой полагаются постоянными.

Следует обратить внимание на ряд допущений, сделанных при построении дискретной математической модели теплопроводности в цилиндре. Аналитические решения задач теплопроводности при различных граничных условиях удается получить для некоторых геометрических форм и их комбинаций. В частности, аналитическое решение для цилиндра конечных размеров, помещенного в среду с постоянной температурой, получают из анализа полей температур для неограниченных пластин и цилиндра, находящихся в аналогичных условиях [22]. Несмотря на строгость полученного таким образом решения, его применимость в инженерной практике остается в значительной мере ограниченной. Дело в том, что взаимодействие тела с набегающим потоком явно характеризуется наличием сложной гидродинамической ситуации, связанной с турбулентностью и отрывом пограничного слоя [21]. В таких условиях задача не является осесимметричной, а это одно из базовых допущений при построении аналитического решения [22]. Таким образом, аналитическое решение (которое достаточно громоздко), может быть использовано в качестве первоосновы построения моделей пере-

носа теплоты в химико-технологической аппаратуре, однако, не является гарантией точности при описании процессов теплопроводности и поэтому, на наш взгляд, может быть заменено более простыми математическими моделями. В данном случае, поскольку условия теплообмена считаются одинаковыми для всей поверхности тела (используется некоторый эффективный коэффициент теплообмена), то исходя из компромисса между вычислительной сложностью и приемлемой точностью, выбор был сделан в пользу одномерной постановки задачи.

Процедуры и методы экспериментального исследования

Для проверки адекватности модели были выполнены натурные эксперименты в аппарате с диаметром 100 мм. Исследуемый материал – цилиндрические частицы гранулированного топлива с высотой $h = 14$ мм и диаметром $d = 14$ мм. Схема лабораторной установки для проведения эксперимента показана на рис. 2а (сушка гранул после их формования, необходимая для обеспечения достаточной прочности, также производилась в этой установке), фотография сформованных и высушенных гранул композитного топлива представлена на рис. 2б.

Частицы топлива формируются при помощи экструдера, на выходе из которого представляют собой пластичную массу, в которую можно вставить спай термопары. После предварительной сушки процесс формирования гранул считается завершенным, а термопары надежно размещены внутри частиц (прочность частиц составляла порядка 3-3,5 МПа). Полученные таким образом частицы с закрепленными в них термопарами охлаждали до комнатной температуры и служили исходным тестовым материалом для опытов. Опыт включал в себя следующие действия. Внутри аппарата был смонтирован вертикальный штатив с фиксируемой горизонтальной штангой, на которой могли быть закреплены частицы исследуемого материала (в каждом опыте 2 частицы с термопарами размещались внутри аппарата). Температура газового агента измерялась под газораспределительным устройством аппарата и в непосредственной близости от закрепленных частиц (измерения проводились многоканальным цифровым устройством измерения температуры). Аппарат выводился на стационарный режим работы, о достижении которого свидетельствовало расхождение между температурой воздуха на входе и выходе порядка 1 °С. Температура теплового агента на входе в аппарат составляла 80 °С.

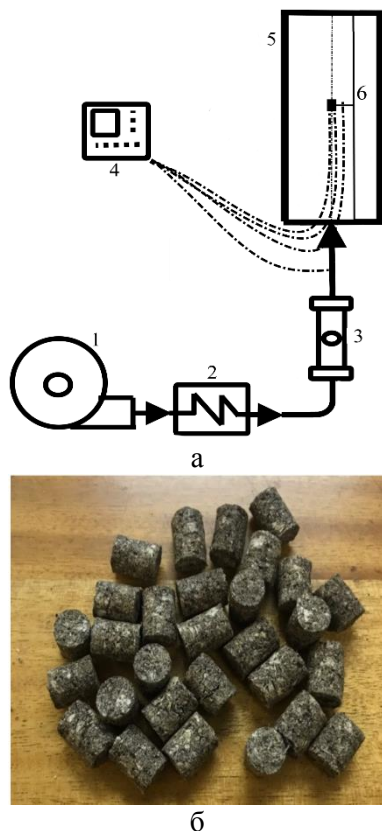


Рис. 2. а – схема лабораторной установки для нагрева частиц: 1 – воздуходувка РГН-427; 2 – электро-калорифер; 3 – ротаметр; 4 – устройство измерения температуры восьмиканальное УКТ38-Щ4; 5 – корпус аппарата; 6 – штанга для фиксации положения термопар и частиц; б – фотография гранул композитного топлива

Fig. 2. а – diagram of a laboratory setup for heating particles: 1 – blower RGN-427; 2 – electric heater; 3 – rotameter; 4 – eight-channel temperature measuring device UKT38-Sch4; 5 – apparatus vessel; 6 – rod for fixing the position of thermocouples and particles; б – photo of composite fuel granules

После выхода оборудования на стационарный режим работы в аппарате размещался штатив с укрепленными на нем частицами с термопарами. В ходе эксперимента фиксировалась эволюция поля температур внутри частицы. В рамках эксперимента все частицы считались эквивалентными – имели одинаковые размеры и содержали внутри по две термопары (спай первой термопары был расположен в геометрическом центре частицы, спай второй термопары был смещен от центра в радиальном направлении примерно на $2/3$ радиуса). В ходе численных экспериментов были приняты следующие параметры дискретизации процесса: $\Delta r = r_n/10$ м и $\Delta t = 0,05$ с.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3а показана схема расположения термопар в процессе тепловой обработки тестовых частиц.

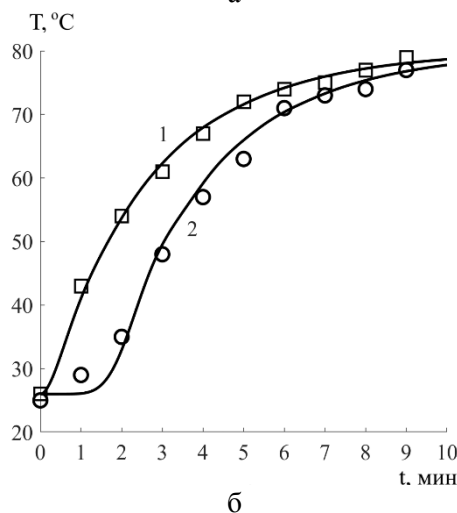
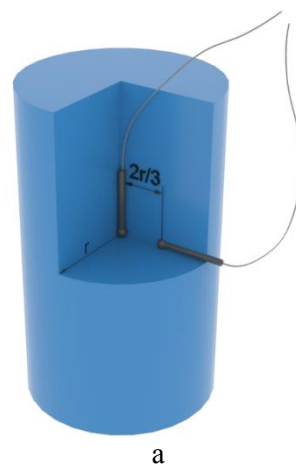


Рис.3. а – схема расположения термопар в частицах; б – расчетные (линии) и экспериментальные (маркеры) значения температур материала: линия 1 и \square – на расстоянии, равном $2/3$ радиуса от центра частицы; линия 2 и \circ – в центральной части частицы при расходной скорости газа 1,3 м/с

На рис. 3б и рис. 4 представлены результаты сравнения экспериментальных и расчетных данных, характеризующих изменение во времени локальных значений температур в частицах.

Скорость нагрева регулировалась изменением расхода теплоносителя (варьированием режима движения газа). Для исследованных гидродинамических режимов расходная скорость воздуха составляла $w_1 = 1,3$; $w_2 = 1,7$ и $w_3 = 2,1$ м/с. Значения чисел Био составили для указанных условий $Bi_1 = 5,6$; $Bi_2 = 7,2$ и $Bi_3 = 8,3$ соответственно. Полученные результаты показывают, что прогрев частиц происходит в значительной мере неравномерным образом, хотя расстояние между термопарами составляет 4-5 мм.

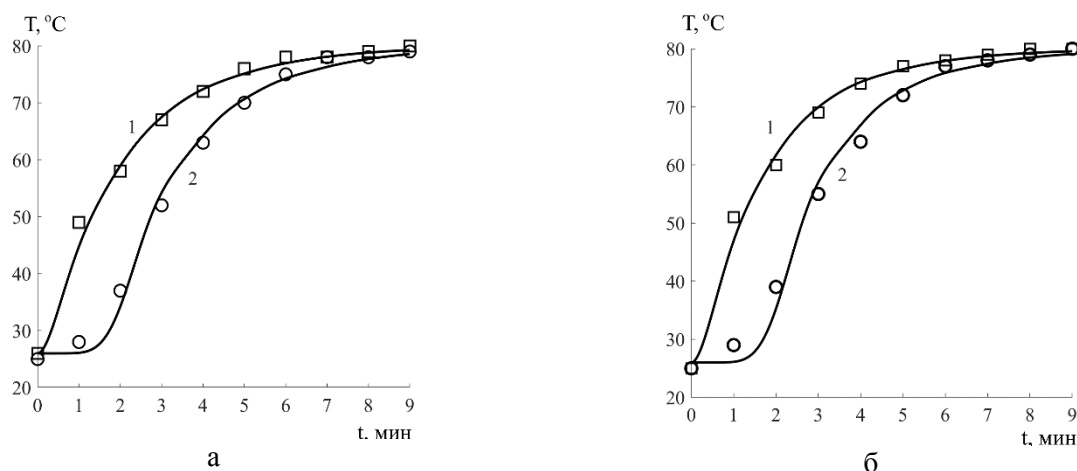


Fig. 4. Расчетные (линии) и экспериментальные (маркеры) значения температур материала: линия 1 и \square – на расстоянии, равном 2/3 радиуса от центра частицы; линия 2 и \circ – в центральной части частицы: а – при расходной скорости газа 1,7 м/с; б – при расходной скорости газа 2,1 м/с

Рис.4. Calculated (lines) and experimental (markers) values of material temperatures: line 1 and \square – at a distance equal to 2/3 of the radius from the center of the particle; line 2 and \circ – in the central part of the particle: а - at a gas flow velocity of 1.7 m/s; б – at a gas flow velocity of 2.1 m/s

ВЫВОДЫ

В ходе расчетно-экспериментального исследования были получены кинетические характеристики нагрева тел цилиндрической формы при трех различных гидродинамических режимах. Необходимо отметить, что значения чисел Био для указанных тестовых частиц и режимов их тепловой обработки вполне однозначно позволяли отнести частицы к термически массивным телам. Полученные в ходе исследования расчетные и экспериментальные данные отчетливо указали на неоднородный характер прогрева материала, что необходимо учитывать при расчете технологических параметров обработки подобных материалов в аппаратах

различного назначения. Расчетные прогнозы и экспериментальные данные находятся в хорошем для инженерных расчетов соответствии, что свидетельствует о достаточной прогностической эффективности предложенной физико-математической модели и дает возможность рассматривать ее в качестве достоверной основы для построения компьютерных методов расчета процессов теплопереноса.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

The authors declare the absence a conflict of interest warranting disclosure in this article.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Mujumdar A.S.** Handbook of Industrial Drying. CRC Press; Taylor & Francis Group.2006. 1312 p. DOI: 10.1201/9781420017618.
2. **Halder A., Dhall A., Datta A.** Modeling Transport in Porous Media With Phase Change: Applications to Food Processing. *J. Heat Transfer*. 2011. V. 133 (3). Art. 031010. DOI: 10.1115/1.4002463.
3. **Ding Y., He Y., Cong N., Yang W., Chen H.** Hydrodynamics and heat transfer of gas-solid two-phase mixtures flowing through packed beds – A review. *Progr. Natur. Sci.* 2008. V. 18. P. 1185 –1196. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.03.023.
4. **Овчинников Л.Н., Медведев С.И.** Исследование тепло-массообмена при конвективной сушке гранул органоминерального удобрения в плотном слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2019. Т. 62. Вып. 6. С. 91-97. DOI: 10.6060/ivkkt.20196206.5874.
5. **Smith P.G.** Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwellscience. 2007. 243 p. DOI: 10.1002/9780470995426.

REFERENCES

1. **Mujumdar A.S.** Handbook of Industrial Drying. CRC Press; Taylor & Francis Group.2006. 1312 p. DOI: 10.1201/9781420017618.
2. **Halder A., Dhall A., Datta A.** Modeling Transport in Porous Media With Phase Change: Applications to Food Processing. *J. Heat Transfer*. 2011. V. 133 (3). Art. 031010. DOI: 10.1115/1.4002463.
3. **Ding Y., He Y., Cong N., Yang W., Chen H.** Hydrodynamics and heat transfer of gas-solid two-phase mixtures flowing through packed beds – A review. *Progr. Natur. Sci.* 2008. V. 18. P. 1185 –1196. DOI: 10.1016/j.pnsc.2008.03.023.
4. **Ovchinnikov L.N., Medvedev S.I.** Study of heat- and mass transfer during drying of granules of organo-mineral fertilizer in dense layer. *ChemChemTech [Изв. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2019. V. 62. N 6. P. 91-97 (in Russian). DOI: 10.6060/ivkkt.20196206.5874.
5. **Smith P.G.** Applications of fluidization to food processing. UK: Blackwellscience. 2007. 243 p. DOI: 10.1002/9780470995426.

6. **Gibilaro L.G.** Fluidization dynamics. L.: Butterworth-Heinemann. 2001. 232 p. DOI: 10.1016/B978-075065003-8/50013-6.
7. **Сапожников Б.Г., Горбунова А.М., Зеленкова Ю.О., Ширяева Н.П.** Влияние температуры поверхности нагрева на внешний теплообмен во влажном виброкипящем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2016. Т. 59. Вып. 5. С. 77-80. DOI: 10.6060/tcct.20165905.5317.
8. **Сажин Б.С., Кочетов О.С., Буртник А.С., Сажина М.Б.** Эффективность процесса сушки на опытно-промышленном образце аппарата с виброкипящим слоем. *Усп. в химии и хим. технологии*. 2004. Т. 181. № 7 (47). С. 95-98.
9. **Zhang J., Tang F.** Prediction of flow regimes in spout-fluidized beds. *China Particology*. 2006. V. 4. P. 189-193. DOI: 10.1016/S1672-2515(07)60260-7.
10. **Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L.** Theoretical study of particulate flows formation in circulating fluidized bed. *Rec. Innov. Chem. Eng.* 2018. V. 11. N 1. P. 20-28. DOI: 10.2174/2405520410666170620105102.
11. **Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Tannous K.** Математическая модель эволюции состояния псевдо-ожиженного слоя при влагопереносе. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. Вып. 4. С. 75-78.
12. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процесса конвективной сушки дисперсных материалов. *Изв. РАН. Энергетика*. 2000. № 4. С. 98-108.
13. **Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А., Tannous K.** Теоретическое исследование теплопроводности в многослойном сферическом теле с фазовыми переходами в слоях. *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2020. Т. 63. Вып. 7. С. 54-60 DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6206.
14. **Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А.** Процессы и аппараты пищевых производств. М.: КолосС. 2007. 760 с.
15. **Байков В.И., Павлукевич Н.В., Федотов А.К., Шнип А.И.** Теплофизика. Т. 2. Минск: ИТМО им. А.В. Лыкова НАН РБ. 2014. 370 с.
16. **Лыков М.В.** Сушка в химической промышленности. М.: Химия. 1970. 432 с.
17. **Дытнерский Ю.И.** Процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия. 2002. 400 с.
18. **Сажин В.Б., Сажин Б.С., Сажина М.Б., Отрубянников Е.В.** Оптимизация аппаратурного оформления сушильных процессов в технике взвешенного слоя. *Усп. в химии и хим. технологии*. 2007. Т. XXI. № 1(69). С. 49 – 65.
19. **Mizonov V., Mitrofanov A., Barochkin E., Basova E.** A simple model to describe the non-linear heat conduction in multi-layer body with phase transformation. *JP J. Heat Mass Transfer*. 2020. V. 21. N 2. P. 291-300. DOI: 10.17654/HM021020291.
20. **Миснар А.** Теплопроводность твердых тел, жидкостей, газов и их композиций. М.: Мир. 1968. 404 с.
21. **Новый справочник химика и технолога.** Процессы и аппараты химических технологий. Ч. I. Под ред. Г.М. Островского. СПб.: АНО НПО «Профессионал». 2004. 848 с.
22. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк. 1967. 600 с.
6. **Gibilaro L.G.** Fluidization dynamics. L.: Butterworth-Heinemann. 2001. 232 p. DOI: 10.1016/B978-075065003-8/50013-6.
7. **Sapozhnikov B.G., Gorbunova A.M., Zelenkova Yu.O., Shiryaeva N.P.** Influence of surface heating temperature on external heat-exchange in wet vibro-fluidized bed. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2016. V. 59. N 5. P. 77-80 (in Russian). DOI: 10.6060/tcct.20165905.5317.
8. **Sazhin B. S., Kochetov O.S., Burtnik A.S., Sazhina M.B.** Efficiency of the drying process on a pilot industrial sample of a device with a vibrating boiling layer. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2004. V. 181. N 7 (47). P. 95-98 (in Russian).
9. **Zhang J., Tang F.** Prediction of flow regimes in spout-fluidized beds. *China Particology*. 2006. V. 4. P. 189-193. DOI: 10.1016/S1672-2515(07)60260-7.
10. **Mizonov V., Mitrofanov A., Camelo A., Ovchinnikov L.** Theoretical study of particulate flows formation in circulating fluidized bed. *Rec. Innov. Chem. Eng.* 2018. V. 11. N 1. P. 20-28. DOI: 10.2174/2405520410666170620105102.
11. **Mitrofanov A.V. Mizonov V.E., Tannous K.** A mathematical model of fluidized bed state evolution at moisture transfer. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2015. V. 58. N 4. P. 75-78 (in Russian).
12. **Rudobashta S.P.** Mathematical modeling of the process of convective drying of dispersed materials. *Izv. RAN. Energetika*. 2000. N 4. P. 98-108 (in Russian).
13. **Mizonov V.E., Mitrofanov A.V., Basova E.V.** Theoretical study of heat conduction in multi-layer spherical body with phase transformation in layers. *ChemChemTech [Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.]*. 2020. V. 63. N 7. P. 54-60. DOI: 10.6060/ivkkt.20206307.6206.
14. **Plaksin Yu.M., Malakhov N.N., Larin V.A.** Processes and devices of food production. М.: KolosS. 2007. 760 p. (in Russian).
15. **Baykov V.I., Pavlyukevich N.V., Fedotov A.K., Shnip A.I.** Thermophysics. V. 2. Minsk: ITMO named after A.V. Lykov NAS RB, 2014. 370 p. (in Russian).
16. **Lykov M.V.** Drying in the chemical industry. М.: Khimiya. 1970. 432 p. (in Russian).
17. **Dytnersky Yu.I.** Processes and apparatuses of chemical technology. М.: Khimiya. 2002. 400 p. (in Russian).
18. **Sazhin V.B., Sazhin B.S., Sazhina M.B., Otrubyannikov E.V.** Optimization of hardware design of drying processes in the technique of a suspended layer. *Usp. Khim. Khim. Tekhnol.* 2007. V. XXI. N 1(69). P. 49-65 (in Russian).
19. **Mizonov V., Mitrofanov A., Barochkin E., Basova E.** A simple model to describe the non-linear heat conduction in multi-layer body with phase transformation. *JP J. Heat Mass Transfer*. 2020. V. 21. N 2. P. 291-300. DOI: 10.17654/HM021020291.
20. **Misnar A.** Thermal conductivity of solids, liquids, gases and their compositions. М.: Mir. 1968. 404 p. (in Russian).
21. **The new handbook of chemist and technologist.** Processes and apparatuses of chemical technologies. Ch. I. Ed. by G.M. Ostrovsky. SPb.: ANO NPO "Professional". 2004. 848 p. (in Russian).
22. **Lykov A.V.** Theory of thermal conductivity. М.: Vyssh. shk 1967. 600 p. (in Russian).

Поступила в редакцию (Received) 18.05.2022
 Принята к опубликованию (Accepted) 30.05.2022