

УДК 536.2

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ МАССООБМЕНА ПРИ ТЕРМООБРАБОТКЕ ДИСПЕРСНОГО МАТЕРИАЛА КОМБИНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ

Кутовой К.В., Осипов Ю.Р.

ФГБОУ ВПО «Вологодский государственный технический университет»,
Вологда, e-mail: rector_s@mh.vstu.edu.ru

В данной статье предложен комбинированный способ термообработки сыпучего материала с применением псевдооживленного слоя и СВЧ нагрева. Осуществлено графическое описание процесса сушки дисперсного материала в псевдооживленном слое с применением СВЧ-нагрева. Определено уравнение теплового баланса при комбинированной сушке. Так как размеры древесных опилок сравнительно малы и с учетом того, что при использовании СВЧ-полей в качестве источника энергии, действует внутренний источник тепла по всему объему высушиваемого материала, можно пренебречь неравномерностью температурного поля внутри одной частицы и ввести в расчет некоторую температуру твердой частицы, постоянную по всему ее объему. С учетом всего перечисленного разработана методика определения общего коэффициента теплоотдачи от материала к оживляющему агенту. Определена зависимость массы выпаренной влаги от времени при термообработке дисперсного материала комбинированным способом.

Ключевые слова: дисперсный, СВЧ, псевдооживление, сушка, тепломассообмен

SOLUTION OF MASS TRANSFER IN HEAT TREATMENT DISPERSED MATERIAL COMBINED METHOD

Kutovoj K.V., Osipov J.R.

The Vologda state technical university, Vologda, e-mail: rector_s@mh.vstu.edu.ru

In this paper a combined method of heat treatment of bulk material using a fluidized bed and microwave heating. Implemented a graphical description of the process of drying dispersed material in a fluidized bed using microwave heating. Defined by the heat balance equation combined with drying. Since the size of wood chips is relatively small, and given the fact that when using a microwave field as an energy source, operates an internal source of heat throughout the volume of dried material, we can neglect the non-uniformity of the temperature field inside a particle and enter into the calculation of the temperature of some solid particles constant throughout its volume. Given all the above developed a method of determining the total heat transfer coefficient of the material to the fluidizing agent. The dependence of the mass of evaporated water from time to time during the heat treatment of disperse materials combined method.

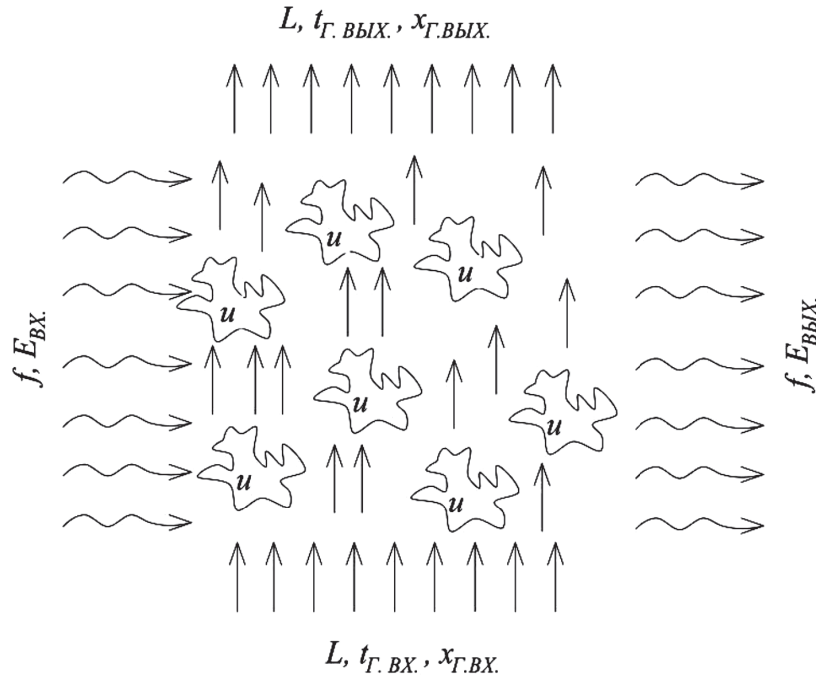
Keywords: disperse, UHF, fluidization, drying, heat- and masstransfer

В ряде производств химической, целлюлозно-бумажной, текстильной и других отраслей промышленности, использующих различного рода сыпучие материалы, значительное место отводится сушке. Именно этот процесс в большинстве технологических схем является заключительной стадией, определяющей качество готового продукта. Однако используемое на отечественных предприятиях оборудование для термообработки зачастую не отвечает предъявляемым к нему требованиям. Основными недостатками используемых в производстве установок для термообработки являются высокие материалоемкость и энергоемкость, длительность процесса, большое количество брака и ручного труда. В связи с этим возникает необходимость в создании нового высокоинтенсивного оборудования, позволяющего выпускать продукцию высокого качества в требуемом количестве. Разработка такого оборудования предполагает системный экспериментально-теоретический подход к изучению явлений тепломассопереноса при термообработке сыпучих материалов и разработку на его основе научно обоснованных методов расчета.

Применение метода псевдооживления позволяет вести процессы сушки материалов с высокими температурами теплоносителя. Исследования [2, 5] показали, что при резком сокращении времени термообработки материала значительно повышается качество готовой продукции. Однако отсутствие единой теории процесса переноса тепла в псевдооживленном слое, надежных уравнений для расчетов основных характеристик процесса тепломассообмена создают определенные трудности при проектировании аппаратов, применяемых при термообработке сыпучего диэлектрического материала.

Графически процесс сушки дисперсного материала в псевдооживленном слое с применением СВЧ-нагрева можно представить следующим образом (рисунок).

Частицы материала, влажностью u , поддерживаются в состоянии псевдооживления потоком теплого воздуха с расходом L и начальной температурой $t_{ГВХ}$ и влажностью $x_{ГВХ}$. При этом через частицы проходит поле электромагнитных волн с частотой f и начальной напряженностью $E_{ВХ}$.



Формулировка задачи тепломассообмена
при сушке дисперсного материала комбинированным методом

Процесс теплообмена при сушке древесных опилок, осуществляемый в псевдоожи-

женном слое, согласно закону сохранения энергии будет характеризоваться уравнением:

$$\begin{aligned} Q_{\text{И}} + LI_{\text{ИСХ}} + c_{\text{T}}m_{\text{T}}t_{\text{М0}} + c_{\text{Ж}}C_0m_{\text{T}}t_{\text{М0}} = \\ = Q_{\text{С}} + Q_{\text{ПТ}} + LI_{\text{К}} + c_{\text{T}}m_{\text{T}}t_{\text{МК}} + c_{\text{Ж}}C_0m_{\text{T}}t_{\text{МК}}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $Q_{\text{И}}$ – тепло, подведенное к высушиваемому материалу; $I_{\text{ИСХ}}$, $I_{\text{К}}$ – энтальпия соответственно исходного и отработанного оживающего агента; L – расход оживающего агента; c_{T} , $c_{\text{Ж}}$ – теплоемкость соответственно твердой и жидкой фазы; m_{T} – масса твердой фазы, C_0 – начальная

влажность материала; $t_{\text{М0}}$, $t_{\text{МК}}$ – температура соответственно исходного и высушенного материала; $Q_{\text{С}}$ – тепло, затрачиваемое на удаление связанной влаги; $Q_{\text{ПТ}}$ – потери тепла.

Из уравнения (1) выразим тепло, затрачиваемое на удаление связанной влаги:

$$Q_{\text{С}} = Q_{\text{И}} - L(I_{\text{К}} - I_{\text{ИСХ}}) - m_{\text{T}}(t_{\text{МК}} - t_{\text{М0}})(c_{\text{T}} + c_{\text{Ж}}C_0) + Q_{\text{ПТ}}. \quad (2)$$

В работе [3] был предложен метод сушки древесных опилок и другого сыпучего диэлектрического материала с использованием СВЧ-полей. При этом тепло, подведенное к высушиваемому материалу, $Q_{\text{И}}$ определится по формуле:

$$Q_{\text{И}} = P \cdot V_{\text{М}} \cdot \tau_{\text{Н}},$$

где $\tau_{\text{Н}}$ – время нагрева материала; $V_{\text{М}}$ – общий объем нагреваемого материала; P – удельные диэлектрические потери, – мощность, выделяемая в 1 м³ диэлектрического материала под воздействием электрического поля, – определяемые формулой [1]:

$$P = 5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot e \cdot \text{tg}\alpha \cdot E^2 \text{ (Вт/м}^3\text{)},$$

где E – напряженность электрического поля; f – частота электрического поля; e – коэффициент диэлектрической проницаемости среды; $\text{tg}\alpha$ – тангенс угла потерь в диэлектрике.

Выражение $L(I_{\text{К}} - I_{\text{ИСХ}})$ в уравнении (2) характеризует теплообмен между оживающим агентом и древесными частицами и может быть представлено в следующем виде:

$$L(I_{\text{К}} - I_{\text{ИСХ}}) = \alpha_{\text{ч}} \cdot F_{\text{ч}} \cdot \Delta t_{\text{ч}},$$

где $\alpha_{\text{ч}}$ – коэффициент теплоотдачи от твердой частицы к оживающему агенту; $F_{\text{ч}}$ – поверхность теплообмена (принимается равной поверхности частиц в слое); $\Delta t_{\text{ч}}$ – разность температур оживающего агента и твердых частиц.

При сушке материала с применением СВЧ-полей проблема уменьшения отвода тепла от частиц (уменьшение потерь энергии) является решающей для успешного осуществления технологического процесса сушки.

Так как размеры древесных опилок сравнительно малы (0,5–2,5 мм) и с учетом того, что при использовании СВЧ-полей

в качестве источника энергии действует внутренний источник тепла по всему объему высушиваемого материала (безградиентный нагрев), можно пренебречь неравномерностью температурного поля внутри одной частицы и ввести в расчет некоторую температуру твердой частицы, постоянную по всему ее объему.

Предельное значение критерия Био, отражающего отношение термических сопротивлений внутри и снаружи частицы, при котором можно пренебречь градиентом температур, оценивается в пределах от 0,1 до 3 [2, С. 220].

Таким образом, параметрами, определяющими величину потерь энергии при термообработке в псевдооживленном слое, являются коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ч}}$ и разность температур $\Delta t_{\text{ч}}$. Уменьшение этих параметров приведет к снижению количества тепла, переданного в единицу времени от твердых частиц к оживающему агенту.

Уменьшения величины разности температур $\Delta t_{\text{ч}}$ можно достичь путем использования в качестве агента оживления предварительно нагретый газ. Для этого предлагается комбинировать СВЧ-сушку с конвективной сушкой в псевдооживленном слое.

Рассматриваемый коэффициент теплоотдачи $\alpha_{\text{ч}}$ может быть выражен следующим образом [2, С. 231 – 234]:

$$\alpha_{\text{ч}} = f(\alpha_{\text{т}}, \alpha_{\text{к}}),$$

где $\alpha_{\text{т}}$ – приведенный коэффициент теплоотдачи за счет теплопроводности (кондуктивная составляющая); $\alpha_{\text{к}}$ – коэффициент теплоотдачи конвекцией (конвективная составляющая).

Эффективность теплоотдачи теплопроводностью может быть оценена из анализа переноса тепла через пограничную пленку, окружающую частицу высушиваемого материала. Принимаем с допущениями, что форма древесной опилки шарообразная.

Пусть через такую пленку диаметром d_0 от шарообразной частицы размером d передается количество тепла Q . Тогда

$$Q = \frac{2\pi \cdot \lambda \cdot \Delta t_{\text{т}}}{\frac{1}{d} - \frac{1}{d_0}} = \alpha_{\text{т}} \cdot \Delta t_{\text{т}} \cdot \pi d^2,$$

откуда

$$\alpha_{\text{т}} = \frac{2\lambda}{d \left(1 - \frac{d}{d_0}\right)}, \quad (3)$$

где λ – коэффициент теплопроводности оживающего агента.

При $d_0 \rightarrow \infty$ величина $\alpha_{\text{т}}$ принимает минимальное значение для шарообразной частицы:

$$(\alpha_{\text{т}})_{\text{min}} = \frac{2\lambda}{d},$$

тогда минимальное значение критерия Нуссельта будет

$$(Nu_{\text{т}})_{\text{min}} = \frac{(\alpha_{\text{тmin}}) \cdot d}{\lambda} = 2. \quad (4)$$

Определим формальную зависимость критерия Нуссельта $Nu_{\text{т}}$ от порозности псевдооживленного слоя древесных опилок ε .

$$\frac{\pi d^3}{66} / \frac{\pi d_0^3}{66} = 1 - \varepsilon,$$

откуда

$$d/d_0 = \sqrt[3]{1 - \varepsilon}.$$

Подставим это значение в выражение (3):

$$\alpha_{\text{т}} = 2\lambda \cdot \left[d \left(1 - \sqrt[3]{1 - \varepsilon}\right) \right]^{-1} \quad (5)$$

и тогда

$$Nu_{\text{т}} = 2 \cdot \left(1 - \sqrt[3]{1 - \varepsilon}\right)^{-1}. \quad (6)$$

Для определения минимального значения приведенного коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{т}}$ за счет теплопроводности при $d_0 = \text{const}$ продифференцируем знаменатель выражения (3) по d и приравняем производную нулю:

$$\frac{\partial}{\partial d} \left[d \left(1 - \frac{d}{d_0}\right) \right] = 1 - \frac{2d}{d_0} = 0,$$

откуда $d_0 = 2 \cdot d$.

Тогда минимальное значение приведенного коэффициента теплоотдачи за счет теплопроводности при $d_0 = \text{const}$ определится следующим образом:

$$[(\alpha_{\text{т}})_{\text{min}}]_{d_0} = \left[\frac{2\lambda}{d \left(1 - \frac{d}{d_0}\right)} \right]_{\frac{d}{d_0} = \frac{1}{2}} = \frac{4\lambda}{d}.$$

Этому минимальному значению $\alpha_{\text{т}}$ соответствует значение критерия Нуссельта $Nu_{\text{т}} = 4$.

Условие минимума $\alpha_{\text{т}}$ соответствует, как следует из (5), величине порозности

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{d}{d_0}\right)^3 = 1 - \left(\frac{1}{2}\right)^3 = 0,875. \quad (7)$$

Полученные минимальные значения критерия Нуссельта характерны для шарообразных частиц. Если же частицы материала

ла имеют неправильную форму, в этом случае значения $(Nu_T)_{\min}$ получаются меньше 2 [2, С. 235].

Однако суммирование величин α_T и α_K для определения суммарного теплового потока $\alpha_{\text{ч}}$ равносильно предположению, что кондуктивный и конвективный тепловые потоки являются параллельными, что вряд ли отвечает физической сущности процесса. Более последовательным является предположение [2], что увеличение общего коэффициента теплоотдачи $\alpha_{\text{ч}}$ сверх минимального происходит вследствие увеличения α_T за счет уменьшения толщины пограничной пленки и может рассматриваться как конвективное слагаемое в суммарном тепловом потоке:

$$\alpha_{\text{ч}} = (\alpha_T)_{\min} + \alpha_K,$$

Конвективная составляющая α_K рассчитывается из предположения стационарности теплообмена между поверхностью и пограничной пленкой газа [4]

$$\alpha_K = \left(\frac{\lambda}{\delta} \right)_{\text{ср}}. \quad (8)$$

Толщину пограничной пленки δ определяем, используя уравнение Д. Вессена [5]:

$$\delta = 0,0597 \cdot d \cdot \frac{A}{B}, \quad (9)$$

где

$$A = \left(1 + B^{5/4} \right)^{9/5} - B^{9/4};$$

$$B = 0,3447 \cdot (1 - \varepsilon)^{4/5} \cdot Re^{1/5},$$

где $Re = \frac{\omega d}{\nu}$ – критерий Рейнольдса. Подставив значения δ из (9) в (8), можно найти

$$[(\alpha_{\text{ч}})_{\min}]_{\varepsilon=0,875} = \frac{\lambda}{d} \left\{ 4 + \frac{3,3162 \cdot Re^{0,2}}{(1 + 0,1321 Re^{0,25})^{1,8} - 0,0261 Re^{0,45}} \right\},$$

$$\text{где } Re = \sqrt[3]{\left[(g \cdot \nu^{-2})^{2n+1} \right]} \cdot c^2 \cdot d_3^{2n} \cdot \left(\frac{\rho_T - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{1,2}.$$

В итоге получим следующую формулу для нахождения тепла, затрачиваемого на удаление связанной влаги, Q_C

$$Q_C = (5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot e \cdot \operatorname{tg} \alpha \cdot E^2 \cdot V_{\text{MH}} \cdot \tau) - Q - \frac{\lambda}{d} \left\{ 4 + \frac{3,3162 \cdot Re^{0,2}}{(1 + 0,1321 Re^{0,25})^{1,8} - 0,0261 Re^{0,45}} \right\} \cdot F_{\text{ч}} \cdot \Delta t_{\text{ч}} - m_T (t_{\text{MK}} - t_{\text{M0}}) (c_T + c_{\text{Ж}} C_0) - Q_{\text{ПТ}}.$$

конвективную составляющую коэффициента теплоотдачи

$$\alpha_K = \frac{\lambda \cdot B}{0,0597 d A}.$$

Тогда общее значение коэффициента теплоотдачи α можно записать как

$$\alpha_{\text{ч}} = 2\lambda \cdot \left[d \left(1 - \sqrt[3]{1 - \varepsilon} \right) \right]^{-1} + \frac{\lambda \cdot B}{0,0597 d A}. \quad (10)$$

Расчёт значения общего коэффициента теплоотдачи α по выражению (10) с учетом (4, 6, 7) показал, что минимальные значения коэффициента теплоотдачи должны наступать при скоростях псевдоожижения, соответствующих порозности $\varepsilon = 1$ или $\varepsilon = 0,875$. На базе уравнения (10) получим упрощённую зависимость α_{\min} при $\varepsilon = 0,875$, при этом принимаем, что

$$Re = \frac{W \cdot \omega_{\text{кр}}}{\nu}.$$

Критическую скорость псевдоожижения $\omega_{\text{кр}}$ предлагается рассчитывать по уравнениям М.Х. Сосна и Н.Б. Кондукова с применением безразмерного критерия скорости W и безразмерного критерия диаметра D_m

$$W = c D_m^n \left(\frac{\rho_T - \rho_{\Gamma}}{\rho_{\Gamma}} \right)^{0,6},$$

где ρ_T и ρ_{Γ} – плотность, соответственно высушиваемого материала и оживающего агента; c и n – эмпирические коэффициенты.

$$D_m = d_3 \sqrt[3]{g \nu^{-2}},$$

где ν – вязкость оживающего агента; d_3 – эквивалентный диаметр древесной частицы.

При $D_m \leq 3$, $c = 0,025$, $n = 1,3$, а при $D_m \geq 3$, $c = 0,045$, $n = 0,765$ [5].

Тогда

Зная, что

$$Q_C = r \cdot m_{\text{ВВ}},$$

где r – удельная теплота парообразования жидкой фазы; $m_{\text{ВВ}}$ – масса выпаренной влаги, получаем:

$$m_{\text{ВВ}} = \left\{ (5,55 \cdot 10^{-11} \cdot f \cdot e \cdot \text{tg} \alpha \cdot E^2 \cdot V_{\text{МН}} \cdot \tau) - Q - \frac{\lambda}{d} \left[4 + \frac{3,3162 \cdot \text{Re}^{0,2}}{(1 + 0,1321 \text{Re}^{0,25})^{1,8} - 0,0261 \text{Re}^{0,45}} \right] \cdot F_{\text{ч}} \cdot \Delta t_{\text{ч}} - m_{\text{T}} (t_{\text{МК}} - t_{\text{М0}}) (c_{\text{T}} + c_{\text{Ж}} C_0) - Q_{\text{ПТГ}} \right\} / r.$$

Таким образом, зная основные характеристики оживающего агента и частиц высушиваемого материала, можно определить теоретическую зависимость массы выпаренной влаги от времени сушки.

Список литературы

1. Гареев Ф.Х. Разработка технологического процесса СВЧ сушки березовых короткомерных заготовок: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.05 АО ЦНИИМЭ. – Химки, 1995. – 175 с.
2. Гельперин Н.И. Основы техники псевдооживления / Н.И. Гельперин, В.Г. Айнштейн, В.Б. Кваша. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
3. Кутовой К.В. Решение проблемы энергосбережения при сушке сыпучего диэлектрического материала с использованием СВЧ-полей / К.В. Кутовой, Ю.Р. Осипов, С.М. Щекин // Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производств, технология и надежность машин, приборов и оборудования: Материалы четвертой международной научно-технической конференции. Т. 1. – Вологда: ВоГТУ, 2008. – С. 244–246.
4. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
5. Романков П.Г. Сушка во взвешенном состоянии / П.Г. Романков, М.Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1968. – 358 с.

References

1. Gareev F.H. Development process of the microwave drying of birch korotkomernyh blanks: Thesis. Candidate. Technical. Sciences: 05.21.05 / F.H. Gareev. AO TSNIIME. Khimki, 1995. 175 p.
2. Gelperin N.I. Fundamentals of fluidization engineering / N.I. Gelperin, V.G. Aynshteyn, V.B. Kvasha. Moscow: Khimiya, 1967. 664 p.
3. Kutovoi K.V. Addressing energy during drying of bulk dielectric materials using microwave fields / K.V. Kutovoi, J. R. Osipov, S.M. Shchekin // Automation and energy conservation engineering and metallurgical industries, technology and reliability machinery, appliances and equipment: Proceedings of the fourth international Scientific-technical Conference. Vol. 1. Volodga: VoGTU, 2008. pp. 244–246.
4. Mushtaev, V.I. Drying of dispersed materials / V.I. Mushtaev, V.M. Ulyanov. M.: Chemistry, 1988. 352 p.
5. Romanko P.G. Drying in a suspended state. / P.G. Romanko, M.B. Rashkovsky. L.: Chemistry, 1968. 358 p.

Рецензенты:

Синицин Н.И., д.т.н., профессор, Череповецкий государственный университет, г. Череповец;

Аншелес В.Р., д.т.н., профессор, Череповецкий государственный университет, г. Череповец.

Работа поступила в редакцию 06.09.2012.