

**Р.В. КОЛОМИЕЦ**

(Україна, Днепропетровск, Інститут технічної механіки НАН України і ГКА України)

## **КОНВЕКТИВНИЙ ТЕПЛОБМЕН В АЭРОФОНТАННОЙ СУШИЛКЕ**

*Постановка проблеми.* Конвективна сушка продуктів оснований на передачі тепла висушуваному продукту за рахунок енергії нагрітого сушильного агента – повітря або парогазової суміші. Сушка продуктів при цьому способі відбувається при обмиванні продукту нагрітим газом, повітрям, топочними газами, перегрітим паром і іншими теплоносіями, які мають температуру, відмінну від температури піддаваного сушці матеріалу. При цьому способі сушки за рахунок передаваної продукту теплової енергії відбувається випаровування вологості, що знаходиться в продукті, а винос парів вологості здійснюється сушильним агентом.

Під конвективним теплообміном розуміють процес поширення тепла в газі (повітря) від поверхні твердого тіла або до поверхні його одночасно конвекцією і теплопровідністю. Таким чином поширення тепла називають також теплоотдачею при зіткненні або просто теплоотдачею. При теплоотдачі тепло поширюється від поверхні твердого тіла до повітря через граничний шар за рахунок теплопровідності і від граничного шару до маси (ядро) повітря переважно конвекцією. Очевидно, що на теплоотдачу суттєвий вплив має характер руху повітря.

Свободний рух повітря, або природна конвекція, виникає внаслідок різниці густот нагрітих і холодних частинок повітря і визначається фізичними властивостями повітря, його об'ємом і різницями температур нагрітих і холодних частинок.

Вимушений, або примусовий, рух повітря виникає під впливом будь-якого джерела (насоса, вентилятора) і визначається фізичними властивостями повітря, його швидкістю, формою і розмірами каналу, в якому здійснюється рух. При турбулентному русі повітря теплообмін відбувається значно інтенсивніше, ніж при ламінарному.

*Ціль роботи* – розглянути особливості визначення характеристик теплообмінного процесу в аерофонтанній сушілці.

Основним законом теплоотдачі є закон Ньютона, згідно з яким кількість тепла  $dQ$ , передане від теплообмінної поверхні до оточуючого середовища або, навпаки, від оточуючого середовища до теплообмінної поверхні, прямо пропорційно площі поверхні теплообміну  $dF$ , різниці температур поверхні  $t_w$  і оточуючого середовища  $t_f$  і часу  $d\tau$ , впродовж якого здійснюється теплообмін, т.е.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

$$dQ = \alpha(t_w - t_f)dFd\tau, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности, который называют коэффициентом теплоотдачи:

$$[\alpha] = \frac{dQ}{(t_w - t_f)dFd\tau} = \left[ \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч} \cdot \text{град}} \right].$$

При установившемся процессе температуры и коэффициенты теплоотдачи сохраняют постоянное значение с течением времени; в этом случае в уравнении (1) исключают время  $d\tau$ , и тогда  $dQ$  выражает количество тепла, переданное от теплообменной поверхности в окружающую среду в единицу времени, т.е.

$$dQ = \alpha(t_w - t_f)dF. \quad (2)$$

При расчете конкретных установившихся процессов обычно принимают, что коэффициент теплоотдачи имеет постоянное значение вдоль теплообменной поверхности [1]; для этих условий уравнение (1) записывается в следующем виде:

$$Q = \alpha(t_w - t_f)F. \quad (3)$$

Применение в расчетной практике уравнения (3) возможно, если известно для рассматриваемого случая значение коэффициента теплоотдачи, определение которого сопряжено с большими трудностями, так как на теплообмен влияет много факторов: режим и скорость движения воздуха, физические параметры воздуха, форма и размеры теплообменной поверхности и др. Очевидно, что для проведения расчетов по теплообмену необходимо уравнение, которое связало бы значение коэффициента теплоотдачи с переменными, выражающими условия конвективного теплообмена. Таким уравнением является дифференциальное уравнение, характеризующим условия на границе раздела жидкости и твердого тела.

При конвективном теплообмене тепло распространяется в воздухе одновременно теплопроводностью и конвекцией. Процесс распространения тепла за счет теплопроводности математически описывается дифференциальным уравнением теплопроводности [2], вида:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (4)$$

Левая часть этого уравнения представляет собой локальное изменение

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

температуры неподвижного элемента, выделенного в среде.

При конвективном теплообмене элемент перемещается из одной точки пространства в другую. В этом случае изменение температуры элемента может быть выражено при помощи субстанциальной производной, которая учитывает изменение величины во времени и изменения, связанные с перемещением элемента из одной точки в другую. Если обозначить скорости перемещения элемента в пространстве в направлении осей  $x$ ,  $y$  и  $z$  соответственно через  $w_x$ ,  $w_y$  и  $w_z$ , то субстанциальная производная, характеризующая полное изменение температуры этого элемента, может быть записана в следующем виде:

$$\frac{Dt}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z. \quad (5)$$

В равенстве (5)  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  представляет собой локальное изменение температуры, а  $\frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z$  – конвективное изменение температуры.

Если в уравнении теплопроводности (4) заменить локальное изменение температуры полным [согласно (5)], то в результате получим дифференциальное уравнение конвективного переноса тепла Фурье-Кирхгофа

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \frac{\partial t}{\partial y} w_y + \frac{\partial t}{\partial z} w_z = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right). \quad (6)$$

Это уравнение является математическим описанием процесса распространения тепла в движущейся среде одновременно теплопроводностью и конвекцией. Для полного математического описания процесса конвективного теплообмена это уравнение должно быть дополнено уравнением, характеризующим условия на границе раздела движущейся среды и твердого тела.

У поверхности твердого тела, находящегося в движущейся среде, всегда имеется пограничный слой толщиной  $\delta$  (рис. 1), через который тепло распространяется теплопроводностью. На рис. 1 показан характер изменения температуры в движущейся среде при конвективном теплообмене

Количество переданного через этот слой тепла при его распространении от теплообменной поверхности к ядру воздушного потока можно определить по закону Фурье

$$dQ = -\lambda \frac{dt}{dn} dF d\tau.$$

Это же количество тепла можно найти по закону Ньютона

$$dQ = \alpha(t_w - t_f) dF d\tau.$$

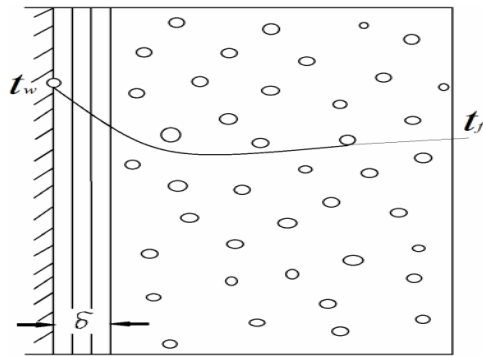


Рис. 1. Характер изменения температуры в движущейся среде при конвективном теплообмене

Приравнивая одну к другой правые части последних равенств, получаем уравнение, характеризующее условия на границе:

$$-\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = \alpha(t_w - t_f). \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) полностью описывают процесс конвективного теплообмена. На рис.1 показан характер изменения температур в движущейся среде при конвективном теплообмене. Наибольшие градиенты температур наблюдаются в пограничном слое, термическое сопротивление которого в основном определяет интенсивность теплоотдачи.

Для подавляющего большинства встречающихся на практике случаев уравнения (6) и (7) не разрешимы, поэтому не могут быть применены для непосредственного определения численных значений коэффициентов теплоотдачи.

В расчетной практике пользуются критериальными уравнениями, полученными из уравнений (7) делением обеих его частей на левую часть получают безразмерный комплекс

$$\frac{\alpha(t_w - t_f) \partial n}{\lambda \partial t} = \frac{\alpha \Delta t \partial n}{\lambda \partial t}. \quad (8)$$

Вычеркнув в полученном комплексе символы дифференцирования, разности и направления (замена  $n$  на неориентированный в определенном направлении линейный размер  $l$ ) и проведя сокращения, получаем критерий Нуссельта

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}. \quad (9)$$

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Из дифференциального уравнения конвективного переноса тепла

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\partial t}{\partial x} w_x + \dots = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \dots \right).$$

делением всех членов уравнения на  $a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$  получаем безразмерные комплексы

$$\frac{\partial t \partial x^2}{\partial \tau a \partial^2 t} \text{ и } \frac{\partial t w_x \partial x^2}{\partial x a \partial^2 t}.$$

После сокращений получаем критерий Фурье

$$\frac{1}{Fo} = \frac{l^2}{a\tau} \text{ или } Fo = \frac{a\tau}{l^2}, \quad (10)$$

и критерий Пекле

$$Pe = \frac{wl}{a}. \quad (11)$$

Полученный критерий Nu, Fo и Pe являются критериями теплового подобия. Критерий Нуссельта характеризует интенсивность теплообмена на границе раздела фаз. Критерий Фурье характеризует связь между скоростью измерения температурного поля, размерами и физическими характеристиками среды в нестационарных тепловых процессах. Критерий Пекле характеризует отношение количеств тепла, распространяемых в воздушном потоке конвекцией и теплопроводностью.

Критерий Пекле обычно представляют в виде произведения двух критериев

$$Pe = \frac{wl}{a} = \frac{wl}{v} \cdot \frac{v}{a} = Re Pr.$$

Критерий Re является критерием аэродинамического подобия, а Pr – критерий Прандтля – характеризует поле теплофизических величин воздушного потока, его находят только по теплофизическим параметрам воздуха:

$$Pr = \frac{v}{a} = \frac{\mu}{a\rho} = \frac{\mu g}{a\gamma}. \quad (12)$$

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

В случаях, когда теплообмен происходит в результате естественной конвекции, обусловленной разностью плотностей воздуха в различных точках системы, процесс характеризуется значением критерия Архимеда

$$Ar = \frac{g l^3}{\nu^2} \cdot \frac{\rho - \rho_0}{\rho}, \quad (13)$$

где  $\rho$  и  $\rho_0$  – плотности холодного и нагретого воздуха.

Поскольку в тепловых процессах разность плотностей в различных точках системы обуславливается разностью температур  $\Delta t$  нагретого и холодного воздуха, комплекс  $\frac{\rho - \rho_0}{\rho}$  в критерии Архимеда заменяют произведением  $\beta \Delta t$  и получают критерий Грасгофа

$$Gr = \beta \frac{g l^3}{\nu^2} \Delta t, \quad (14)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент объемного расширения воздуха.

Критерий Грасгофа характеризует аэродинамический режим воздушного потока в условиях естественной конвекции, происходящей под влиянием разности плотностей нагретого и холодного воздуха.

Полученные критерии подобия дают возможность найти критериальное уравнение конвективного переноса тепла [3]

$$f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Nu}, \text{Pr}, \text{Fo}) = 0. \quad (15)$$

Из критериев этого уравнения только критерий Нуссельта не составлен целиком из условий однозначности, поэтому он является определяемым критерием. На этом основании уравнение (15) записывается в следующем виде:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}, \text{Fo}). \quad (16)$$

При рассмотрении конкретных задач теплообмена уравнение (16) может быть упрощено.

При стационарном процессе теплообмена из критериального уравнения выпадает критерий  $\text{Fo}$  и оно имеет вид:

$$\text{Nu} = f(\text{Re}, \text{Gr}, \text{Pr}). \quad (17)$$

При вынужденном движении воздушного потока, когда естественной конвекцией воздуха можно пренебречь, из критериального уравнения исключают

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

критерий Грасгофа:

$$Nu = f(Re, Pr), \quad (18)$$

или

$$Nu = A Re^n Pr^m. \quad (19)$$

При свободном движении воздуха (в условиях естественной конвекции) из критериального уравнения исключают критерий Рейнольдса:

$$Nu = f(Gr, Pr), \quad (20)$$

или

$$Nu = A Gr^n Pr^m. \quad (21)$$

В соответствии с полученными критериальными уравнениями обработано большинство многочисленных опытных данных по конвективному теплообмену.

При решении конкретных задач по найденному из соответствующего критериального уравнения значению критерия Нуссельта легко определяется коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{l}. \quad (22)$$

На рис. 2 показана общая схема сушильной камеры с аэрофонтанным способом сушки, где ЗМ и ВМ – места загрузки исходного и выгрузки готового материала, соответственно.

Приняв во внимание геометрические характеристики камеры сушки [4] и рабочие параметры элементов сушильного стенда "Аэрофонтан-СТР" (рис. 2), а также учитывая температуру воздуха и высушиваемого сырья, можем определить коэффициент теплоотдачи воздуха к сырью.

Геометрические характеристики камеры сушки:

Длина подовой решетки ( $L$ )	$L = 1950$ мм.
Ширина п.р. ( $D$ )	$D = 162$ мм.
Ширина канала п.р. ( $D_k$ )	$D_k = 15$ мм.
Суммарная площадь вдува ( $S$ )	$S = 282$ мм <sup>2</sup> .
Угол наклона лопаток от вертикали ( $\alpha$ )	$\alpha = \pm 15^\circ = \pm 15^\circ$ .
Высота сушильной камеры ( $H$ )	$H = 1230$ мм.

## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

Рабочие параметры элементов сушильного стенда:

Температура нагретого воздуха

Температура материала

Скорость воздушного потока

$$t_w = 20 \text{ }^\circ\text{C}.$$

$$v = 47,5 \text{ м/с}.$$

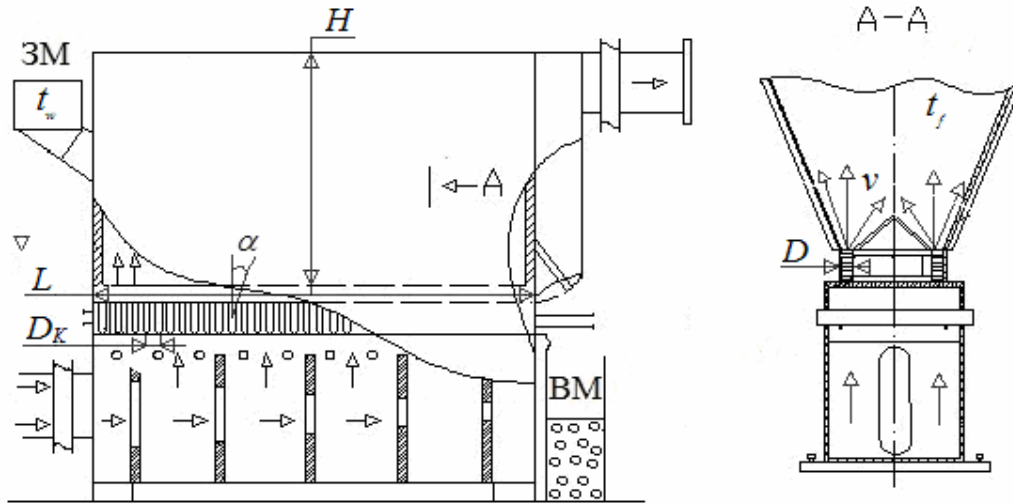


Рис. 2. Общая схема сушильной камеры "Аэрофонтан-СТР"

Алгоритм расчета характеристик сушилки представлен ниже.

1. Определяются физические характеристики воздуха при температуре  $t_f = 60 \text{ }^\circ\text{C}$  или  $t_f = 333 \text{ K}$ .

Коэффициент теплопроводности  $\lambda_f = 0,0259 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Кинематическая вязкость  $\nu_f = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ .

Критерий Прандтля  $Pr_f = 0,703$ .

Коэффициент температурного расширения воздуха

$$\beta = \frac{1}{t_f} = \frac{1}{333} = 0,003 \text{ K}^{-1}.$$

Критерий Прандтля, при температуре равной температуре сырья

$$Pr_f = 0,716.$$

2. Определяется критерий Грасгофа при вынужденном обтекании высушиваемого сырья воздухом

$$\begin{aligned} Gr_{f.h.} &= (9,81 \cdot h^3 \cdot \beta \cdot (t_f - t_w)) / \nu_f^2 = \\ &= (9,81 \cdot 1,23 \cdot 0,003 \cdot (60 - 20)) / (15,06 \cdot 10^{-6}) = 397,065 \cdot 10^8 \end{aligned}$$



## **Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство**

3. Определяется критерий Релея

$$Ra = Pr_f \cdot Gr_{f.h.} = 0,703 \cdot 397,065 \cdot 10^8.$$

4. Определяется критерий Нуссельта при  $Ra > 10^9$  по эмпирической формуле

$$Nu_f = 0,15 \cdot Ra^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_f}{Pr_{f.h.}} \right)^{0,25} = 0,15 \cdot (279,136 \cdot 10^8)^{0,33} \cdot \left( \frac{0,703}{0,716} \right)^{0,25} = 419,7.$$

5. Определяется коэффициент теплоотдачи от нагретого воздуха к высушиваемому материалу

$$\alpha = \frac{Nu_f \cdot \lambda_f}{h} = \frac{419,7 \cdot 0,259}{1,23} = 88,38 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}.$$

### *Выводы*

При изменении рабочих параметров элементов сушильного стенда (температуры, скорости воздушного потока, угла наклона лопаток), а также времени сушки, влажности материала и т.д. получаем различные режимы работы. Каждому из режимов соответствует собственное значение коэффициента теплоотдачи, которое в свою очередь характеризует интенсивность сушки. Умея вычислять коэффициент теплоотдачи, принимая во внимание множество факторов, таких как: режим и скорость движения воздуха, физические параметры воздуха, форма и размеры теплообменной поверхности и др., становится возможным определить оптимальный режим сушки для различных материалов.

### **Список литературы**

1. Циборовский Я. Основы процессов химической технологии. – Л.: Изд-во "Химия", 1967. – С. 316-330.
2. Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии. – М.: Изд-во "Химия", 1972. – С.118-152.
3. Бухримов В.В. Расчет коэффициента конвективной теплоотдачи (основные критериальные уравнения): Методические указания к выполнению практических и лабораторный занятий. – Иваново, 2007. – 39 с.
4. Прядко Н.С. Сжигание низкосортных углей с газодинамической транспортировкой материала: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – Днепр-ск: ДМетаУ, 2005. – 23 с.

© Коломиец Р.В., 2014

*Надійшла до редколегії 28.09.2014 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Л.Ж. Горобець*