

Сушка карбонизированного метасиликата кальция в кипящем слое

I. Вывод критериального уравнения

М. А. Сафарян, С. Н. Енгибарян и Р. С. Габриелян

На основании теории размерностей выведено критериальное уравнение, характеризующее процесс теплообмена в кипящем слое во время сушки, которое имеет вид:

$$Nu = K \cdot Re^a \cdot Pe^b \cdot \left(\frac{D}{H_0}\right)^c \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^d$$

За последние двадцать лет в химической технологии все шире применяется и совершенствуется сушка в так называемом „кипящем слое“.

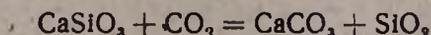
При прохождении через слой частиц соответствующего размера восходящего потока оживающего агента со скоростью достаточно высокой, чтобы перевести частицы во взвешенное состояние, создается интенсивное турбулентное движение частиц, напоминающее кипение жидкости. Такой метод контактирования фаз резко увеличивает поверхность контакта, что ведет к резкому ускорению процессов тепло- и массообмена между фазами.

Теплопроводность кипящего слоя значительно превышает теплопроводность газа, идущего через слой. Тепло переносится из одной части слоя в другую благодаря движению частиц, что способствует выравниванию температуры даже в тех случаях, когда тепловыделение в отдельных участках слоя намного превышает среднюю его величину. Высокая теплопроводность кипящего слоя облегчает регулирование температуры сушки. Коэффициент теплоотдачи от газов к твердым частицам при одинаковых скоростях потока сушильного агента примерно одинаков как для кипящего, так и неподвижного слоя. Однако, в первом случае равномерное распределение потока и большая величина активной поверхности теплообмена способствуют тому, что скорость теплопередачи в кипящем слое выше, чем в других сушилках [1].

Явление сепарирования двух или многокомпонентных смесей во время сушки их методом кипящего слоя создает значительные затруднения при использовании последнего в химической технологии.

Данная работа преследовала цель — определить оптимальный режим сушки карбонизированного метасиликата кальция (КМК) в кипящем слое и одновременно выяснить его поведение в процессе сушки.

КМК получается карбонизацией метасиликата кальция в водной среде:



и представляет собой тонкодисперсную однородную двухкомпонентную смесь осажденного углекислого кальция и кремнезема.

Факторы, влияющие на интенсивность теплообмена или на коэффициент теплоотдачи (α) в кипящем слое и вывод критериального уравнения теплоотдачи. Перечислим факторы, влияющие на скорость сушки [2]: природа высушиваемого материала, форма высушиваемого материала, начальное, конечное и критическое содержание влаги в материале, влажность, температура и скорость сушильного агента, условия обтекания материала воздухом, разность температур сушильного агента, конструкция сушилок.

Основным расчетным уравнением теплообмена в кипящем слое является известное уравнение [3]:

$$Q = \alpha F (T_1 - T_2), \quad (1)$$

где Q — количество тепла, передаваемого от потока нагретого воздуха к твердым частицам в кипящем слое, $\text{вт}/\text{м}^2 \text{град.}$, α — коэффициент теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2 \text{град.}$; T_1 — температура тепловоспринимающей или теплопередающей среды, $^\circ\text{К}$, T_2 — температура частиц или поверхности теплообмена, $^\circ\text{К}$.

Коэффициент теплоотдачи α , характеризующий интенсивность теплообмена, зависит от поверхности контактирования фаз, разности температур и ряда других перечисленных выше факторов, определяющих процесс в целом. Решающее влияние на коэффициент теплоотдачи в кипящем слое оказывают скорость газа, размер частичек, температурный перепад сушильного агента, материал и т. д.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от перечисленных факторов (в общем случае) выражается функцией:

$$\alpha = f(W, \rho_r, \mu_r, \lambda_r, C_{p_r}, d_s, \rho_m, C_{p_m}, \lambda_m, g, D, H_0, H, T_{cp}, T_m), \quad (2)$$

где W — скорость газа в полном сечении аппарата, $\text{м}/\text{сек.}$, μ_r — динамический коэффициент вязкости газа, $\text{кг}/\text{м}\cdot\text{сек.}$, ρ_r — плотность газа, $\text{кг}/\text{см}^3$, λ_r — коэффициент теплопроводности газа, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град.}$, C_{p_r} — теплоемкость газа, $\text{дж}/\text{кг}\cdot\text{град.}$, d_s — эквивалентный диаметр частиц, м , ρ_m — плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$, λ_m — коэффициент теплопроводности материала, $\text{вт}/\text{м}\cdot\text{град.}$, g — ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{сек}^2$, D — диаметр аппарата, м , H_0 — высота плотного слоя, м , T_{cp} — температура среды, $^\circ\text{К}$, T_m — температура материала, $^\circ\text{К}$, H — высота псевдооживленного слоя, м , α — коэффициент теплоотдачи, $\text{вт}/\text{м}^2 \cdot \text{град.}$

Как видно, коэффициент теплоотдачи зависит от многих факторов, влияние которых трудно учесть.

Так как дифференциальное уравнение теплоотдачи не решается без нескольких условий однозначности переменных, входящих в общую функциональную зависимость, единственным методом выражения зависимости коэффициента теплоотдачи от перечисленных факторов, применяемым в практических расчетах, является критериальная связь,

которая выводится из дифференциальных уравнений или методом теории размерности переменных, входящих в эту функциональную зависимость [4]. Для раскрытия вида этой функциональной зависимости примем метод теории размерностей [5]. На основании п-теоремы [6]:

$$\alpha = f(W^a \cdot \mu_r^b \cdot \rho_r^c \cdot \lambda_r^d \cdot C_{p_r}^e \cdot d_3^h \cdot \rho_m^i \cdot C_{p_m}^j \cdot \lambda_m^k \cdot g^g \cdot D^u \cdot H_0^u \cdot H^0 \cdot T_{cp} \cdot T_m)$$

$$\frac{\alpha \cdot d_3}{\lambda} = f \left[\left(\frac{C_{p_r} \cdot \rho_r \cdot d_3 \cdot W}{\lambda_r} \right)^c \cdot \left(\frac{C_{p_r} \cdot \rho_m \cdot d_3 \cdot W}{\lambda_r} \right)^n \cdot \left(\frac{g \cdot d_3}{W^2} \right)^g \cdot \left(\frac{\mu_r \cdot C_{p_r}}{\lambda_r} \right)^b \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_r} \right)^f \cdot \left(\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{cp}}{T_m} \right)^q \cdot \left(\frac{D}{d_3} \right)^u \cdot \left(\frac{H_0}{d_3} \right)^u \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^0 \right]. \quad (3)$$

После некоторой корректировки и перегруппировки получаем:

$$\frac{\alpha \cdot d_3}{\lambda} = f \left[\left(\frac{W \cdot d_3}{\nu_r} \right)^{c_1} \cdot \left(\frac{C_{p_r} \cdot d_3 \cdot W \cdot \rho_r}{\lambda} \right)^{n_1} \cdot \left(\frac{g d_3}{W^2} \right)^{g_1} \cdot \left(\frac{\mu_r \cdot C_{p_r}}{\lambda_r} \right)^{f_1} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{T_{cp}}{T_m} \right)^{q_1} \cdot \left(\frac{D}{H_0} \right)^{r_1} \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^0 \right]. \quad (4)$$

$$Nu = f \left[(Re_r^{c_1}) \cdot (Fr^{q_1}) \cdot (Pr^{b_1}) \cdot (Pe^{n_1}) \cdot \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_r} \right)^{m_1} \cdot \left(\frac{T_{cp}}{T_m} \right)^{q_1} \times \right. \\ \left. \times \left(\frac{D}{H_0} \right)^r \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^0 \right], \quad (5)$$

где Nu — критерий Нусельта (тепловой), Re_r — критерий Рейнольда, учитывающий влияние отношения силы инерции к внутреннему трению между газом и частицами, т. е. влияние гидродинамических условий, Pe — критерий Пекле, представляет собой меру отношения переноса тепла конвекцией к интенсивности переноса тепла теплопроводностью, Fr — критерий Фруда, учитывающий влияние отношения силы инерции к силе тяжести, Pr — критерий Прандтля, учитывающий влияние физических свойств газа на теплопроводность,

$\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}}$ — симплекс теплоемкости; $\frac{\lambda_m}{\lambda_r}$ — симплекс теплопроводности;

$\frac{T_{cp}}{T_m}$ — симплекс температуры; $\frac{D}{H_0}$ — геометрический симплекс; $\frac{H}{H_0}$ —

симплекс, характеризующий псевдооживление слоя.

$$Nu = K \cdot Re_r^{c_1} \cdot Fr^g \cdot Pr^b \cdot Pe^n \cdot \left(\frac{\lambda_m}{\lambda_r} \right)^f \cdot \left(\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}} \right)^m \cdot \left(\frac{T_{cp}}{T_m} \right)^q \cdot \left(\frac{D}{H_0} \right)^r \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right)^0. \quad (6)$$

В критериальном уравнении симплексы $\frac{\lambda_m}{\lambda_r}$, $\frac{T_{cp}}{T_m}$, $\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}}$ нужно исключить, имея ввиду, что теплопроводность входит в критерии Nu , Pe и Pr , а при данном опыте симплекс $\frac{T_{cp}}{T_m} = \text{const}$ и $\frac{C_{p_m}}{C_{p_r}} = \text{const}$ и его можно включить в постоянную коэффициента K .

Критерий Фруда (Fr) исключается, так как входящие в него переменные величины включаются в состав другого критерия (Re).

Однако следует отметить, что Fr имеет более важное значение при первоначальном псевдооживлении частицы, когда плотный слой поднимается потоком газа на различную высоту. Но при установившемся режиме высота псевдооживленного слоя достаточно постоянна по диаметру решетки. Таким образом, поступательное движение частиц в псевдооживленном слое происходит только в вертикальном направлении, а турбулентная пульсация частицы взаимно уравновешивается.

Учитывая, что физические величины, находящиеся в критерии Pr , входят и в другие критерии (Pe и Re), мы их исключаем из уравнения и получаем критериальное уравнение для теплоотдачи в кипящем слое во время процесса сушки

$$Nu = K \cdot Re^a \cdot Pe^b \cdot \left(\frac{D}{H_0}\right)^c \cdot \left(\frac{H}{H_0}\right)^d. \quad (7)$$

Исследователи рекомендуют разные критериальные уравнения для теплообмена в кипящем слое [7]. Федоров [7] рекомендует следующее критериальное уравнение:

$$Nu = K \cdot Ar^a \cdot Re^b \cdot \left(\frac{H_0}{d_s}\right)^c \quad (8)$$

при пределах $2,02 \cdot 10^4 < Ar < 7,5 \cdot 10^5$, где Ar — критерий Архимеда Рукенштейн [8] предлагает уравнение:

$$Nu = K \cdot Re^a \cdot Pr^b \cdot Ar^c, \quad (9)$$

при

$$Re \cdot Ar^{-0,4} = 2,15.$$

Хиртиес [7] обработал экспериментальные данные в критериальном виде:

$$Nu = K \cdot \varepsilon^3 \cdot Fr^a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot \left(\frac{d_s}{D_{ан}}\right), \quad (10)$$

где ε — порозность слоя, $D_{ан}$ — диаметр аппарата, м при $9 < Re < 74$; $19 < Fr < 225$; $0,66 < E < 0,95$

Анализ критериальных уравнений, предлагаемых Рукенштейном и Хиртиес, показывает, что коэффициент теплоотдачи должен возра-

стать с увеличением вязкости газа и уменьшаться с увеличением его теплопроводности.

Рассмотрим некоторые критерии, входящие в вышеуказанные уравнения (9) и (10). Критерии можно преобразовать так, что каждый будет представлять собой две одинаковые физические величины. Критерий Pr легко получить путем комбинирования критериев Pe и Re в виде отношения:

$$Pr = \frac{Pe}{Re} = \frac{\gamma}{a}, \quad (11)$$

где $a = \frac{\lambda}{c\gamma}$.

Умножив числитель и знаменатель критерия Рейнольдса на $\frac{W}{d_s}$, получим:

$$Re = \frac{W \cdot d_s \cdot \frac{W}{d_s}}{\mu \frac{W}{d_s}} = \frac{\rho W^2}{\mu \frac{W}{d_s}} = \frac{D_{ин}}{D_{тр}}. \quad (12)$$

Из полученного равенства видно, что критерий Рейнольдса представляет собой отношение силы инерции к силе трения, отнесенное к единице площади. Разделив числитель и знаменатель критерия Pe на d_s , получим:

$$Pe = \frac{W \cdot d_s \cdot C_{p_r} \cdot \frac{\gamma}{d_s}}{\frac{\lambda}{d_s}} = \frac{W \cdot C_{p_r} \cdot \gamma}{\frac{\lambda}{d_s}} = \frac{Q_{me}}{Q_{mn}}. \quad (13)$$

Из равенства видно, что критерий Пекле представляет собой отношение количества тепла, уносимого потоком среды, к количеству тепла, передаваемого теплопроводностью.

Учитывая уравнение (12) и (13), критерий Pr преобразовывается в вид:

$$Pr = \frac{Q_{me}}{Q_{mn}} \cdot \frac{D_{тр}}{D_{ин}}. \quad (14)$$

Полученное равенство противоречит основному представлению процесса теплоотдачи в кипящем слое. Из равенства следует, что количество тепла, передаваемого конвекцией, возрастает с увеличением силы трения и уменьшается с увеличением силы инерции или, как было указано выше, с повышением вязкости газа коэффициент теплоотдачи возрастает и уменьшается с увеличением теплопроводности, что видно из равенства (11).

Из данных анализа полученного нами критериального уравнения следует, что коэффициент теплоотдачи почти не зависит от вязкости

газа и увеличивается с возрастанием его теплопроводности. Кроме того, в критериальных уравнениях (9) и (10), принимая все величины кроме Re и Pr постоянными, получим:

$$Nu = K \cdot Re^a \cdot Pr^b. \quad (15)$$

После преобразования получаем:

$$Nu = K \left(\frac{D_{инер}}{D_{мп}} \right)^a \cdot \left(\frac{Q_{ме}}{Q_{мн}} \cdot \frac{D_{мп}}{D_{инер}} \right)^b. \quad (15a)$$

Ввиду того, что в критериальном уравнении имеются одинаковые силы, противодействующие друг другу в критериях, как сила инерции к силе трения в критерии Re и сила трения к силе инерции в критерии Pr , критериальные уравнения (9) и (10) для расчета теплоотдачи будут иметь пределы по Ar , Re , Fr , E и т. д.

Полученное нами критериальное уравнение после преобразования имеет вид:

$$\frac{\alpha}{\lambda} = K \left(\frac{D_{ин}}{D_{мп}} \right) \cdot \left(\frac{Q_{ме}}{Q_{мн}} \right). \quad (16)$$

Из уравнения видно, что левая его часть выражает отношение количества тепла, передаваемого конвекцией, к количеству тепла, передаваемого теплопроводностью.

Таким образом, в полученном критериальном уравнении, критерии числителя и знаменателя (Re) и (Pe) являются по существу аналогичными величинами с одинаковыми размерностями, которые характеризуют процесс сушки в кипящем слое следующим образом: чем больше теплоемкость псевдооживленного агента потока $Q_{ме}$, тем больше тепла передается частицам конвекцией. Чем больше теплопроводность слоя (частицы) $Q_{мн}$, тем больше тепла передается теплопроводностью, и чем выше сила инерции, тем выше турбулентность потока и больше количество тепла, передаваемого конвекцией. А чем больше сила трения, тем меньше турбулентность потока и относительно больше тепла подается в слой за счет теплопроводности.

Кроме того, для надежного обобщения экспериментальных данных и, следовательно, для моделирования аппарата в псевдооживленном слое необходимо также установить факторы, действительно учитывающие гидродинамическую обстановку в слое $\left(\frac{H}{H_0} \right), \left(\frac{D}{H_0} \right)$,

которые одновременно отражают и качество псевдооживленного слоя.

Полученное критериальное уравнение характеризует процесс теплообмена во время сушки КМК в кипящем слое, дает возможность ограничить количество опытов и без затруднений обработать экспериментальные данные.

Определение значений показателей степеней критериев и симплексов, входящих в уравнение, является задачей экспериментального исследования [9].

Ереванский научно-исследовательский
институт химии Министерства
химической промышленности СССР

Поступило 4 III 1965

ԿԱՐԲՈՆԱՏԱՅՎԱԾ ԿԱԼՑԻՈՒՄԻ ՄԵՏԱՍԻԼԻԿԱՏԻ ՋՈՐԱՑՈՒՄԸ

1. Ձափանիշային հավասարման արտածում

Մ. Ա. Սաֆարյան, Ս. Ն. Շեգիրբարյան և Ռ. Ս. Գաբրիելյան

Ա մ փ ո փ ո լ մ

Ձափողականության տեսության հիման վրա դուրս է բերված չափանիշային հավասարում, որը բնութագրում է շերմափոխանցման պրոցեսը եռացող շերտում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Л. Лева, Псевдооживление, Гостоптехиздат, М., 1961 г.
2. А. Г. Касаткин, Основные процессы и аппараты химической технологии, Госхимиздат, М., 1961 г.
3. Н. И. Сыромятников и В. Ф. Волков, Процессы в кипящем слое, Metallurgиздат, Свердловск, 1959 г.
4. М. В. Қирпичев, Теория подобия, М., 1953 г.
5. П. В. Бриджмен, Анализ размерностей, Л.—М., 1934 г.
6. Л. С. Эйгенсон, Моделирование, М., 1952 г.
7. П. Г. Романков, Н. Б. Рашковская, Процессы сушки в кипящем слое, Изд. "Химия", М.—Л., 1964 г.
8. С. С. Забродский, Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое, Госэнергоиздат, М.—Л., 1963 г.
9. Л. М. Батунер, М. Е. Позин, Математические методы в химической технике, Госхимиздат, Л., 1960 г.