

## Лекция 14 « Свойства влажного воздуха. Материальный баланс сушки. Статика сушки. Кинетика сушки. Вакуумная сушка. Осушка газов»

**Цель:** Сформулируйте свойства влажного воздуха. Охарактеризуйте статику сушки, вакуумную сушку и сушку газов. Приведите вывод расчетной формулы кинетики сушки. Объясните вывод материального баланса сушки. Опишите строение сушильной камеры.

**Краткий конспект лекции:** Сушкой называют процесс удаления влаги из влажных материалов путём её испарения. Влагу можно удалять из материалов механическими способами (отжимом, отстаиванием, фильтрованием, центрифугированием). Однако, более полное обезвоживание достигается путём испарения влаги и отвода образующихся паров, т.е. с помощью тепловой сушки.

По способу подвода тепла к высушиваемому материалу различают следующие виды сушки:

- 1) конвективная сушка – путём непосредственного соприкосновения высушиваемого материала с сушильным агентом, в качестве которого обычно используют нагретый воздух или топочные газы;
- 2) контактная сушка – путём передачи тепла от теплоносителя к материалу через разделяющую их стенку;
- 3) радиационная сушка – путём передачи тепла инфракрасными лучами;
- 4) диэлектрическая сушка – путём нагревания в поле токов высокой частоты;
- 5) сублимационная сушка – сушка в замороженном состоянии при глубоком вакууме.

Последние три вида сушки применяются относительно редко и называются специальными видами сушки.

Высушиваемый материал при любом методе сушки находится в контакте с влажным газом (воздухом), т.е. в процессе сушки основная роль принадлежит сушильным агентам. В промышленных условиях при конвективной сушке в качестве теплоносителя больше всего пользуются воздухом [1-3].

### *Основные параметры влажного воздуха*

Воздух всегда содержит некоторое количество влаги. Смесь сухого воздуха и водяного пара представляет собой влажный воздух. Влажный воздух характеризуется следующими основными параметрами: абсолютной и относительной влажностью, влагосодержанием и энтальпией (теплосодержанием).

Под *абсолютной влажностью воздуха* понимают количество водяных паров, содержащихся в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха ( $\text{г}/\text{м}^3$ ,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ). Воздух с максимальным содержанием водяного пара при данной температуре называется насыщенным. Количество водяного пара при этом определяется температурой воздуха.

*Относительная влажность или степень насыщения воздуха  $\varphi$*  представляет собой отношение массы водяного пара  $M_n$ , находящегося в  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха, к максимальной массе пара  $M_n$ , которая может содержаться в  $1 \text{ м}^3$  влажного насыщенного воздуха при данной температуре и давлении:

$$\varphi = \frac{M_n}{M_n} \cdot 100 = \frac{\rho_n}{\rho_n} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где  $\rho_n$  – плотность пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_n$  – плотность насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>.

Плотность пара пропорциональна его парциальному давлению, следовательно, относительную влажность можно выразить отношением давлений

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n}, \quad (2)$$

где  $p_n$  – парциальное давление водяного пара, соответствующее его плотности;  $p_n$  – давление насыщенного пара при той же температуре.

Если воздух охлаждать, то относительная влажность его увеличивается. Температура, соответствующая насыщенному состоянию пара в воздухе ( $\varphi = 100\%$ ) при данном парциальном давлении, называется точкой росы ( $t_p$ ). При охлаждении воздуха ниже точки росы происходит конденсация водяных паров.

Количество водяного пара, находящегося во влажном воздухе, отнесённое к 1 кг сухого воздуха, называется *влажностью* (кг/кг):

$$x = \frac{G_{H_2O}}{G_{возд}} = \frac{M_{H_2O}}{M_{возд}} \cdot \frac{p}{P-p} \quad (3)$$

Подставляя в последнее уравнение  $p_n = \varphi p_n$  (из уравнения (2)),  $M_{H_2O} = 18$ ,  $M_{возд} = 29$ , получим зависимость влагосодержания воздуха от его относительной влажности

$$x = \frac{18}{29} \cdot \frac{\varphi p_n}{P - \varphi p_n} \quad (4)$$

*Энтальпия влажного воздуха (I)* относится к 1 кг абсолютно сухого воздуха и определяется при данной температуре воздуха  $t$  (°C) как сумма энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара:

$$I = c_{с.в.}t + xi_n, \quad (5)$$

где  $c_{с.в.}$  – удельная теплоёмкость сухого воздуха, Дж/кг·К;  $t$  – температура воздуха, К;  $i_n$  – энтальпия перегретого пара, Дж/кг.

Энтальпия пара определяется по эмпирической формуле:

$$i_n = r_0 + c_n t = (2493 + 1,97) \cdot 10^3 \quad (6)$$

где  $r_0 = 2493 \cdot 10^3$  – постоянный коэффициент, примерно равный энтальпии пара при 0° С;  $c_n = 1,97 \cdot 10^3$  – удельная теплоёмкость пара, Дж/кг·К.

Представив значение  $i_n$  в выражение (6) и приняв  $c_{с.в.} = 1000$  Дж/кг·К как постоянную величину, найдем энтальпию влажного воздуха

$$I = (1000 + 1,97 \cdot 10^3 x)t + 2493 \cdot 10^3 x, \quad (7)$$

где  $x$  – влагосодержание, кг/кг сухого воздуха [2,3].

## Статика сушки

Статика процесса – рассмотрение данных о равновесии, на основе которых определяют направление и возможные пределы осуществления процесса.

Влажный материал отдаёт влагу путём её испарения в окружающую среду. Окружающая среда – влажный воздух. Поэтому процесс сушки будет протекать лишь в том случае, если давление паров влаги у поверхности высушиваемого материала  $p_m$  будет больше парциального давления паров воды в воздухе  $p_n$ . То есть условием проведения сушки является неравенство  $p_m > p_n$ . Когда  $p_m = p_n$  – сушка прекращается. Каждый материал можно высушить только до равновесной влажности (в условиях атмосферной сушки).

Равновесная влажность определяется свойством высушиваемого материала, характером связи с ним влаги и параметрами окружающей среды.

По теории академика П.А.Ребиндера существуют три формы связи влаги с материалом: 1) химическая; 2) физико-химическая; 3) физико-механическая.

Для химической связи характерно строго определённое молекулярное соотношение (гидратная или кристаллизационная вода).

Физико-химическая связь влаги с материалом не предполагает строго определённого соотношения (адсорбционная влага, осмотическая влага и др.). С помощью физико-механической связи вода удерживается материалом в неопределённых соотношениях. К физико-механическому виду относится структурная связь, капиллярная связь и связь смачивания.

При сушке сначала удаляется свободная влага, затем связанная. Границу между свободной и связанной влагой называют критической влажностью материала. Равновесная влажность зависит от давления водяного пара, она тем выше, чем больше относительная влажность воздуха [3].

## Материальный баланс сушки

Если в сушку поступает влажный материал в количестве  $G_1$  кг/с с влажностью  $u_1$  весовых долей, после сушки получается  $G_2$  кг/с высушенного материала с влажностью  $u_2$  весовых долей и при этом испарилось влаги  $W$  кг/с, материальный баланс выразится равенством:

по всему количеству вещества

$$G_1 = G_2 + W \quad (8)$$

по абсолютно сухому веществу:

$$G_1(1 - u_1) = G_2(1 - u_2) \quad (9)$$

Из этих уравнений определяется количество высушенного материала  $G_2$  и испарившейся влаги  $W$ .

Для теплового баланса необходимо знать расход воздуха на сушку, который можно определить из баланса влаги.

Баланс влаги можно выразить равенством

$$Lx_2 = Lx_0 + W, \quad (10)$$

откуда расход воздуха составляет

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0}, \quad (11)$$

где  $L$  – количество сухого воздуха, кг;  $x_0$  – влагосодержание влажного воздуха на входе в сушилку, кг/кг;  $x_2$  – влагосодержание влажного воздуха на выходе из сушилки, кг/кг;  $W$  – количество испаряемой влаги, кг.

Удельный расход воздуха составит:

$$l = \frac{L}{W} = \frac{1}{x_2 - x_0} \quad (12)$$

Из выражения (12) следует, что расход воздуха будет тем больше, чем выше начальное влагосодержание  $x_0$ , которое определяется температурой и относительной влажностью воздуха. При прочих равных условиях расход воздуха будет возрастать с увеличением начальной температуры и начальной относительной влажности воздуха. Следовательно, расход воздуха на сушку летом будет больше, чем зимой [1-3].

### *Кинетика сушки*

Сушка является сложным диффузионным процессом, скорость которого определяется скоростью диффузии влаги из глубины высушиваемого материала в окружающую среду. Процесс сушки является сочетанием связанных друг с другом процессов тепло- и массообмена (влагообмена).

Измеряя убыль массы высушиваемой пробы с течением времени, можно определить изменение влагосодержания  $u_a$  в зависимости от времени  $\tau$ . Зависимость абсолютной влажности от времени называется кривой сушки.

Из рис. 1 следует, что в начальной стадии (участок  $AB$ ) влагосодержание материала убывает медленно и теплота расходуется на нагревание материала от начальной температуры  $v_1$  до температуры мокрого термометра  $v = t_m$ . Это является стадией подогрева материала.

На участке  $BK$  влагосодержание материала падает линейно, сушка характеризуется постоянной скоростью при неизменной температуре поверхности материала  $v = t_m$ .

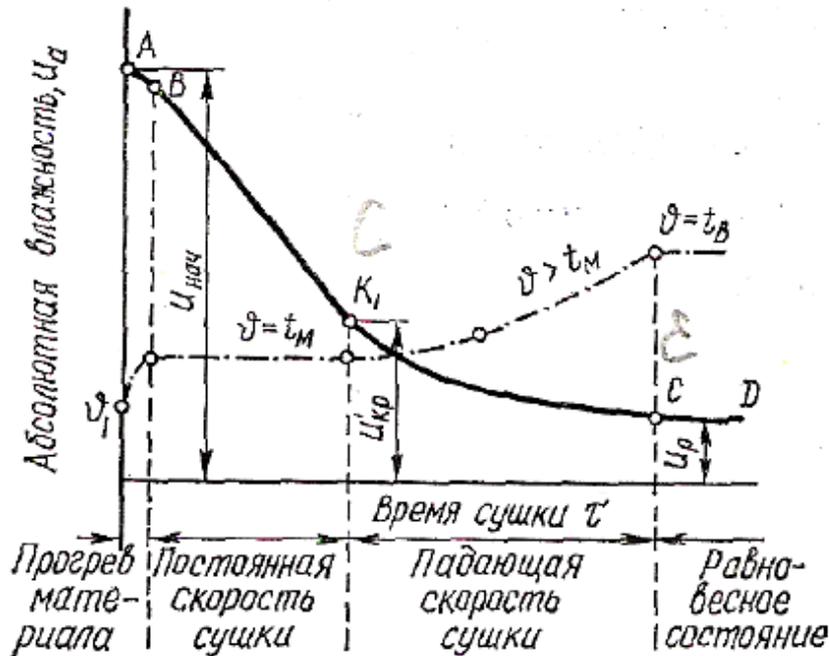
Начиная с точки  $K$  сушка протекает по кривой  $KC$ . Температура поверхности материала при этом непрерывно повышается и по достижении равновесной влажности становится равной температуре греющего воздуха  $v = t_B$ . Таким образом, процесс сушки складывается из периода постоянной скорости сушки и периода падающей скорости сушки. Влагосодержание материала в точке  $K$  называется критическим влагосодержанием  $u_{кр}$ .

Скорость сушки определяется внешней диффузией (диффузией паров влаги с поверхности материала в окружающую среду), т.е. температурой, влажностью и

скоростью движения сушильного агента, но не зависит от влагосодержания материала. Основное уравнение для скорости испарения представляется в следующем виде:

$$\frac{du'}{d\tau} = \beta \Delta C F, \tag{13}$$

где  $\Delta C$  – разность концентрации пара у поверхности испарения и в окружающем воздухе;  $F$  – поверхность испарения;  $\beta$  – коэффициент испарения, учитывающий аэродинамические условия испарения и физические свойства жидкости.



**Рис. 1.** Кривая сушки материала и изменения его температуры в процессе сушки:  $v$  – температура поверхности материала;  $v_1$  – начальная температура материала;  $t_m$  – температура мокрого термометра;  $t_B$  – температура воздуха;  $u_n$  – начальная влажность материала;  $u_{кр}$  – критическая влажность материала;  $u_{рав}$  – равновесная влажность материала

Коэффициент  $\beta$  можно определить, зная величину диффузионного критерия Нуссельта

$$Nu' = \frac{\beta l}{D}, \tag{14}$$

где  $l$  – длина образца в направлении движения воздуха, м.

При вынужденном движении воздуха для определения диффузионного критерия Нуссельта пользуются зависимостью

$$Nu' = C \cdot Re^n (Pr')^m \tag{15}$$

Продолжительность периода постоянной скорости сушки может быть определена по уравнению:

$$\tau = \frac{1}{K} \cdot \frac{u'_n - u'_{кр}}{u'_{кр} - u'_p}, \quad (16)$$

где  $K$  – константа скорости процесса сушки (может быть определена опытным путем или через коэффициент массоотдачи в газовую фазу);  $u'_n, u'_{кр}, u'_p$  – начальное, критическое, равновесное влагосодержание материала.

Скорость второго периода сушки определяется внутренней диффузией, зависит от влагосодержания и температуры материала и практически не зависит от скорости и влажности воздуха. Установить длительность сушки материала точно можно только опытным путём [3].

### ***Вакуумная сушка***

Удаление влаги из материалов, плохо выдерживающих действие повышенных температур, осуществляется при низких температурах. Поэтому в целях интенсификации процесс сушки ведётся под вакуумом.

Преимущества вакуумной сушки:

- 1) увеличивается движущая сила процесса, так как с уменьшением давления в сушилке увеличивается разность давления паров влаги над материалом и в окружающей среде;
- 2) достигается полное удаление влаги;
- 3) улавливаются ценные летучие растворители;
- 4) исключается выделение вредных газов и паров из сушилки в окружающее пространство;
- 5) благодаря герметичности системы исключается загрязнение материала.

Техника вакуумной сушки: высушиваемый материал помещается в герметически закрытую камеру, из которой воздушным насосом откачивается воздух вместе с парами влаги. Пары влаги определяются в конденсаторах. Применяются конденсаторы барометрические или поверхностные. Внутри камеры помещаются змеевики, либо плиты, через которые горячей водой или паром поддерживается постоянная температура во время сушки. Под влиянием температурного градиента возникает диффузия влаги в направлении к поверхности испарения и её парообразования. Вакуумная сушка является термодиффузионным процессом.

Процесс вакуум-сушки представляет собой ряд одновременно протекающих сложных процессов – кипения, испарения, конденсации, происходящих в порах и капиллярах влажного тела, а также неустановившийся процесс теплопередачи, то математическое описание этого процесса очень затруднительно [3].

### ***Сушка газов***

Удаление паров воды из газов необходимо при глубоком охлаждении многокомпонентных газов в целях их разделения на фракции при транспортировке горючих газов по трубопроводам.

При транспортировке газ даже при нормальной температуре может давать с водой комплексные соединения, при этом парафинистые углеводороды в виде комплексных соединений с водой выпадают в осадок. Поэтому природные газы перед их транспортировкой необходимо осушить до температуры  $-10^{\circ}\text{C}$ .

Осушка газов производится физико-химическими (абсорбционными, адсорбционными) и физическими методами.

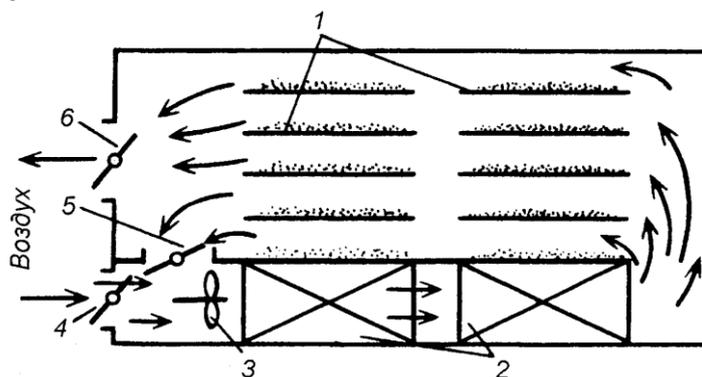
Абсорбционные способы основаны на поглощении влаги из газов жидкими веществами, водные растворы которых имеют низкое давление паров воды (глицерин, диэтиленгликоль 85%).

Адсорбционные способы основаны на поглощении влаги из газов твёрдыми веществами – адсорбентами. В качестве адсорбентов применяют твёрдые  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{KOH}$ , бокситы, алюмогель, силикагель, молекулярные сита.

Физические способы основаны на охлаждении осушаемого газа в поверхностных холодильниках водой или хладагентом, охлаждении после сжатия газа и в результате внезапного расширения сжатого газа. Выпадающий при этом из газа конденсат отводится через сепаратор [3].

### *Камерная сушилка*

Камерные сушилки (рис. 2) представляют собой герметичные камеры, внутри которых высушиваемый материал в зависимости от его вида располагается на сетках, противнях, шестах, зажимах и других приспособлениях. Их применяют для сушки сравнительно небольших количеств материала и при достаточно большой продолжительности процесса.



**Рис. 2.** Схема камерной сушилки:

- 1* – полки для загрузки высушиваемого материала; *2* – калорифер;
- 3* – вентилятор; *4* – заслонка для регулирования расхода свежего воздуха;
- 5, 6* – заслонки (шиберы) для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха

Камеры изготовляют из дерева, кирпича, бетона, металла и иных материалов, выбор которых обусловлен их размерами, температурным режимом процесса, а в ряде случаев также свойствами высушиваемого материала. Объём и размеры камеры определяются продолжительностью сушки и производительностью аппарата. Для ускорения загрузки и выгрузки материала противни или сетки для его укладки размещают часто на вагонетках.

Свежий воздух с помощью вентилятора *3* через калорифер *2* подают в пространство камеры, внутри которой находятся полки *1* с высушиваемым материалом. Заслонки *5, 6* служат для регулирования расходов рециркулирующего и отработанного воздуха.

### **Вопросы для самоконтроля:**

1. Какие методы термической сушки используются в промышленности?
2. Каковы основные параметры паровоздушной смеси? Как они определяются по диаграмме  $H - x$  состояния влажного воздуха?
3. Перечислите и опишите виды связи влаги с материалом.
4. В каком виде записываются уравнения материального баланса с точки зрения влажности материала и сушильного агента?
5. В чем физический смысл удельного расхода сушильного агента?
6. Какой вид имеют типичные кривые сушки и скорость сушки влажных материалов?
7. По какому уравнению рассчитывается продолжительность периода постоянной скорости сушки?
8. Что считается движущей силой процесса сушки и как определяется их среднее значение?
9. Перечислите преимущества вакуумной сушки.
10. Какие существуют особые способы сушки? Какова сфера их использования?

### **Литература**

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с. – 40 экз.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.