

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра технологии пищевых производств

Е.В. Волошин

ЭНТАЛЬПИЙНАЯ ДИАГРАММА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА

Методические указания

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» для обучающихся по образовательной программе высшего образования по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья

Оренбург
2020

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73
В68

Рецензент – кандидат технических наук, доцент С.В. Антимонов

Волошин, Е.В.
В68 Энтальпийная диаграмма влажного воздуха: методические указания /
Е.В. Волошин; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2020. –
39 с.

Методические указания предназначены для самостоятельной работы студентов по дисциплине «Элеваторы и склады» очной и заочной форм обучения по направлению подготовки 19.03.02 Продукты питания из растительного сырья по общему профилю подготовки.

УДК 664.72 (075.8)
ББК 36.821 я 73

Содержание

Введение.....	4
1 Основные параметры влажного воздуха.....	5
2 I-x диаграмма влажного воздуха	11
3 Расчет параметров влажного воздуха	16
4 Примеры расчетов.....	20
Список использованных источников	39

Введение

В процессе сушки происходит удаление влаги из материала путем испарения и отвода образующегося пара, что приводит к уменьшению влажности этого материала.

На предприятиях пищевой промышленности сушка является одним из основных процессов производства. Она применяется для сушки сырья и полуфабрикатов (зерно, солод и др.) и часто является завершающим этапом производства, определяющим качество готового продукта (сахар-песок, сахар-рафинад, сухари, мармелад, пастила, макаронные изделия и др.). Сушка обеспечивает длительное хранение и консервирование продуктов (молоко, яичный порошок, овощи, фрукты, соки и т.д.).

Сушка осуществляется различными методами, выбор которых определяется в основном свойствами высушиваемого материала.

1 Основные параметры влажного воздуха

Влажным воздухом называется смесь сухого воздуха с водяным паром.

Согласно закону Дальтона давление смеси газов занимающих определенный объем, равно сумме парциальных давлений всех ее компонентов. Для влажного воздуха общее давление B равно

$$B = p_{c.v.} + p_{п}, \quad (1)$$

где $p_{c.v.}$ - парциальное давление сухого воздуха, Па;

$p_{п}$ - парциальное давление водяного пара, содержащегося в воздухе, Па.

Следовательно, давление пара, находящегося во влажном воздухе меньше общего (барометрического) давления смеси.

Абсолютной влажностью воздуха ρ , г/м³, называется масса водяного пара, находящегося в 1 м³ влажного воздуха. Абсолютная влажность воздуха есть плотность пара в смеси.

Относительной влажностью воздуха называется отношение абсолютной влажности к максимально возможной массе водяного пара, которая может содержаться в 1 м³ влажного воздуха при тех же условиях (температура и барометрическое давление):

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{max}} \cdot 100\% . \quad (2)$$

Относительная влажность характеризует способность воздуха насыщаться влагой, чем меньше относительная влажность, тем больше сушильная способность воздуха.

Характер зависимости относительной влажности от температуры различен:

1) если температура влажного воздуха ниже температуры кипения при данном барометрическом давлении, то максимальная плотность пара будет являться плотностью насыщенного пара при данной температуре и уравнение (2) примет следующий вид

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (3)$$

Если приближенно применить характеристическое уравнение состояния идеального газа (Менделеева-Клапейрона) к водяному пару, то можно написать

$$p_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} \frac{RT}{\mu_{\text{п}}} , \quad (4)$$

$$p_{\text{н}} = \rho_{\text{н}} \frac{RT}{\mu_{\text{п}}} , \quad (5)$$

где $\mu_{\text{п}}$ - молярная масса пара , $\mu_{\text{п}} = 18$ кг/моль;

$p_{\text{п}}$ и $p_{\text{н}}$ - давление насыщенного пара при данной температуре, Па;

R - универсальная газовая постоянная, $R = 8314,3$ Дж/кмольК;

T - температура воздуха, °К.

Подставив влажность из уравнений (4) и (5) в уравнение (3) получим

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} \cdot 100\% . \quad (6)$$

Давление насыщенного пара зависит от температуры, с повышением температуры оно увеличивается, следовательно, при постоянном влагосодержании уменьшается относительная влажность, и сушильная способность воздуха увеличивается. При уменьшении температуры давление насыщенного пара уменьшается, оно становится равным парциальному давлению, относительная влажность достигает ста процентов, воздух становится насыщенным и начинается конденсация пара. Температура, при которой начинается конденсация, называется температурой точки росы.

Давление насыщенного пара в интервале температур от 0 °С до 100 °С можно рассчитать по эмпирической формуле Г.К. Филоненко

$$\lg(p_H) = 0,622 + \frac{7,5t}{238 + t}, \quad (7)$$

где t - температура воздуха, °С.

2) если температура влажного воздуха выше температуры кипения при данном барометрическом давлении, то полное насыщение возможно только при полном отсутствии сухого воздуха, так как давление насыщенного пара становится равным барометрическому давлению

$$\varphi = \frac{p_H}{B} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Влагосодержанием x называется количество водяного пара содержащегося во влажном воздухе и приходящегося на 1 кг абсолютно сухого воздуха.

$$x = \frac{m_H}{m_{с.в.}} = \frac{p_H}{p_{с.в.}}. \quad (9)$$

Если влагосодержание выражено в г/кг то его обозначают буквой d .

Установим связь между влагосодержанием и относительной влажностью. Для этого из уравнения Менделеева-Клайперона выразим плотность пара и сухого воздуха и подставим в уравнение (7)

$$x = \frac{p_{\text{п}} \mu_{\text{п}}}{RT} \cdot \frac{RT}{p_{\text{с.в.}} \mu_{\text{с.в.}}} = \frac{\mu_{\text{п}}}{\mu_{\text{с.в.}}} \cdot \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{с.в.}}}, \quad (10)$$

где $\mu_{\text{с.в.}}$ - молекулярная масса сухого воздуха, $\mu_{\text{с.в.}} = 29$ кг / моль.

Выразим из уравнений (1) и (6) давление пара и сухого воздуха

$$p_{\text{с.в.}} = B - p_{\text{п}},$$

$$p_{\text{п}} = \varphi \cdot p_{\text{н.}}$$

Подставляя полученные уравнения в уравнение (10) получим

$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{\text{п}}}{B - \varphi \cdot p_{\text{н.}}} \quad (11)$$

Плотность влажного воздуха равна сумме плотностей сухого воздуха и водяного пара

$$\rho_{\text{вл.в.}} = \rho_{\text{с.в.}} + \rho_{\text{п.}} \quad (12)$$

Согласно уравнению (9)

$$\rho_{\text{вл.в.}} = \rho_{\text{с.в.}} + x \cdot \rho_{\text{с.в.}} = \rho_{\text{с.в.}} (1+x). \quad (13)$$

Плотность абсолютно сухого воздуха из уравнения состояния идеального газа

$$\rho_{\text{с.в.}} = \frac{\mu_{\text{с.в.}} p_{\text{с.в.}}}{RT} = \frac{29 p_{\text{с.в.}}}{8314T} = \frac{B - p_{\text{п}}}{287T}. \quad (14)$$

Подставляя уравнение (14) и (11) в уравнение (13) получим

$$\rho_{\text{вл.в.}} = \frac{B - p_{\text{п}}}{287T} \left(1 + 0,622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} \right) = \frac{B - 0,378 p_{\text{п}}}{287T}. \quad (15)$$

Из уравнения (15) видно, что при постоянном барометрическом давлении плотность влажного воздуха является функцией парциального давления водяного пара и температуры. В процессе сушки воздух увлажняется (давление пара возрастает) и охлаждается (уменьшается температура). Снижение температуры оказывает большое влияние на плотность сухого воздуха и плотность воздуха увеличивается. При увлажнении воздуха содержание водяного пара увеличивается, а так как молекулярная масса пара меньше молекулярной массы сухого воздуха, то поэтому с увеличением влажности воздух становится легче.

Средняя удельная теплоемкость влажного газа при постоянном давлении относится к 1 кг влажного газа, то есть к 1 кг смеси, и рассчитывается как средневзвешенная величина между теплоемкостью сухого газа и пара в кДж/(кг вл.в·К)

$$c_{\text{см}} = \frac{m_{\text{с.в.}} c_{\text{с.в.}} + m_{\text{п}} c_{\text{п}}}{m_{\text{с.в.}} + m_{\text{п}}} = \frac{c_{\text{с.в.}} + x c_{\text{п}}}{1 + x}, \quad (16)$$

где $c_{\text{с.в.}}$ - средняя удельная теплоемкость сухого воздуха, $c_{\text{с.в.}} = 1,004$ кДж/кг·К;

$c_{с.в.}$ - средняя удельная теплоемкость пара, $c_{с.в.} = 1,842$ кДж/кг·К.

Приведенная теплоемкость относится к 1 кг сухого воздуха, кДж/(кг с.в.·К)

$$c'_{сМ} = \frac{m_{с.в.}c_{с.в.} + m_{п}c_{п}}{m_{с.в.}} = c_{с.в.} + xc_{п}. \quad (17)$$

В качестве теплофизической характеристики состояния влажного газа в сушильной технике используется энтальпия (теплосодержание).

Энтальпия I влажного воздуха относится к 1 кг абсолютно сухого воздуха и определяется при данной температуре воздуха как сумма энтальпий абсолютно сухого воздуха и водяного пара (Дж/кг сухого воздуха)

$$I = c_{с.в.}t + xi_{п}, \quad (18)$$

где $I_{п}$ - энтальпия водяного пара.

Водяной пар находится в процессе сушки в перегретом состоянии в смеси с воздухом. Обозначив энтальпию водяного пара при нуле градусов через r_0 ($r_0 = 2493 \cdot 10^3$ Дж/кг) и примем среднюю удельную теплоемкость перегретого водяного пара $c_{п} = 1,97 \cdot 10$ Дж/(кг·К), получим энтальпию перегретого пара

$$I_{п} = r_0 + c_{п}t = 2493 \cdot 10^3 + 1,97 \cdot 10^3 t. \quad (19)$$

Подставляя выражение энтальпии пара и значение теплоемкости сухого воздуха в уравнение (18) получим

$$I = (1004 + 1,97 \cdot 10^3 x)t + 1493 \cdot 10^3 x. \quad (20)$$

2 I-x диаграмма влажного воздуха

Основные свойства влажного воздуха можно с достаточной для технических расчетов точностью определять при помощи I-d диаграммы. Энтальпийная диаграмма была впервые построена Л.К. Рамзиным в 1918 г. Диаграмма построена для среднегодового давления для центральных районов России ($p = 745 \text{ мм.рт.ст.} = 99,3 \text{ кПа}$)

На этой диаграмме угол между основными осями составляет 135 градусов. На оси ординат удельная энтальпия I , на оси абсцисс влагосодержание x или d , вертикальные линии - постоянные влагосодержания, наклонные прямые линии постоянные энтальпии.

На диаграмму нанесены линии и постоянных температур, или изотермы, выражающие зависимость энтальпии от влагосодержания при постоянной температуре, построенные по уравнению (20). Задаваясь при данной температуре двумя произвольными значениями влагосодержания, вычисляют значения энтальпий и строят прямую - изотерму. Наклон изотерм несколько увеличивается с возрастанием температуры, так как теплоемкость водяного пара при этом возрастает. Изотермы построены в области относительной влажности меньше 100 %.

Линии постоянной относительной влажности построены по уравнению 9, задаваясь постоянными значениями относительной влажности для нескольких температур, определяют ряд влагосодержаний и находят точки пересечения соответствующих линий, соединяют плавной кривой, строят линию постоянной относительной влажности. Пучок этих кривых сходится на оси ординат в одну точку (влагосодержание равно нулю, температура - 273 °С). При температуре 99,4 °С линии относительной влажности имеют резкий перелом и при дальнейшем повышении температуры идут вверх почти вертикально постоянной влагосодержания. Это объясняется тем, что при этой температуре давление насыще-

ния равно общепараметрическому давлению, для которого построена диаграмма, следовательно

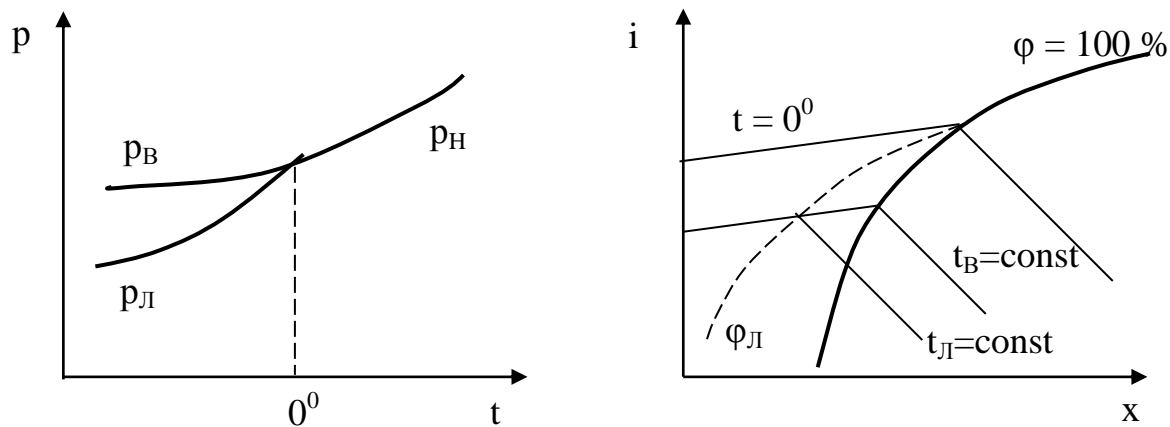
$$x = 0,622 \frac{\varphi \cdot B}{B - \varphi \cdot B} = 0,622 \frac{\varphi}{1 - \varphi}, \quad \varphi = \frac{x}{0,622 + x}.$$

т.е. относительная влажность перестает зависеть от температуры и определяется только влагосодержанием.

Линия относительной влажности равной 100 % (рисунок 1) соответствует максимальному влагосодержанию и делит диаграмму на две области. Выше этой линии находится область ненасыщенного воздуха, содержащего влагу в парообразном состоянии. Ниже этой линии расположена область перенасыщенного воздуха, в котором влага расплылена в виде мельчайших капель - тумана, а при температуре ниже 0 °С - в виде ледяного тумана (иней). Изотермы в области тумана меняют свое направление, приближаясь к линии постоянной энтальпии.

При температурах ниже 0 °С изотермы соответствующие системе воздух - вода, не совпадают с изотермами для воздуха со льдом, не совпадают и линии относительной влажности.

Это объясняется различием между давлениями насыщенного пара над льдом и над переохлажденной водой, имеющей температуру льда.



p_n – давление насыщенного воздуха; p_v – давление влаги; p_l - давление ледяного тумана.

Рисунок 1 – I-x диаграмма влажного воздуха

Вспомогательная линия парциального давления водяного пара строится по уравнению

$$p_{\Pi} = \frac{B \cdot x}{0,622 + x} \quad (21)$$

На некоторые диаграммы наносят еще линии постоянной температуры мокрого термометра и другие линии.

Разность между температурой воздуха и температурой мокрого термометра характеризует способность воздуха поглощать влагу из материала и носит название потенциала сушки

Изобразим на диаграмме основные простейшие процессы изменения состояния воздуха (рисунок 2).

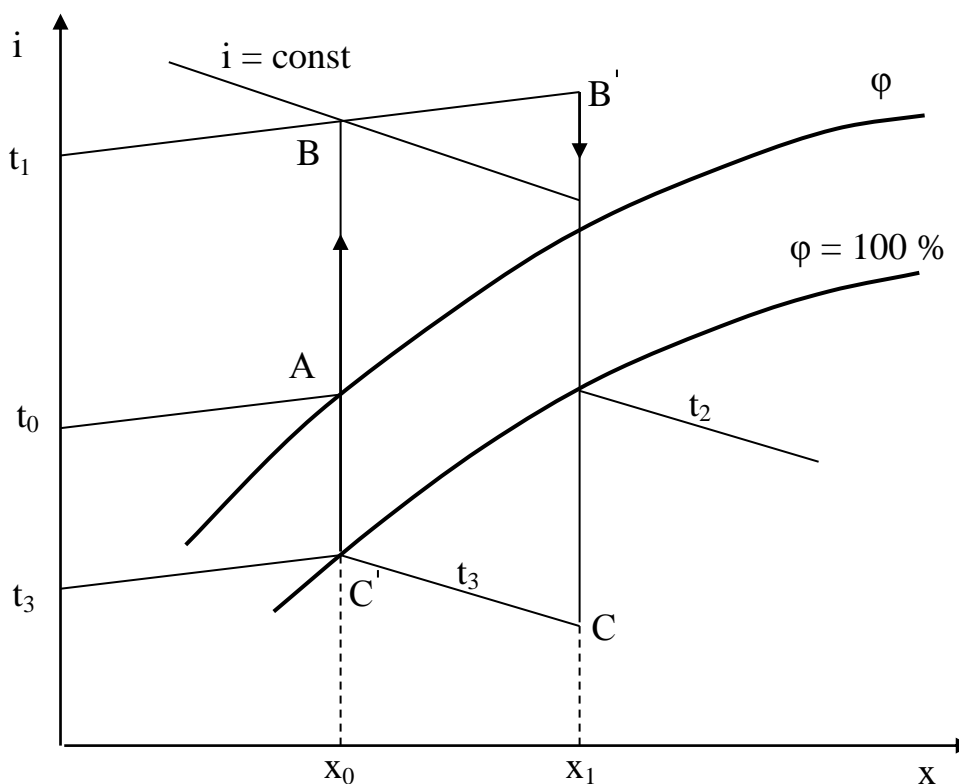


Рисунок 2 – I-x диаграмма процессов изменения состояния воздуха

Линия А-В показывает процесс нагревания воздуха от t_0 до t_1 , линия отвечает постоянной влагосодержания.

Линия В-В' показывает увлажнение воздуха от x_0 до x_1 при постоянной температуре.

При охлаждении от t_1 до t_2 воздух становится насыщенным и дальнейшее охлаждение до t_3 вызовет выпадение капелек воды (рисунок 3).

При смещении двух порций воздуха, с различными состояниями, образуется смесь, состояние которой можно на диаграмме найти по правилу рычага. На рисунке 3 состояние смеси представлено точкой К на линии MN. Положение точки определяется соотношением масс компонентов $MN/NK = L_N/L_M$, где L - массы порций воздуха.

нии лежит на кривой $f = 100 \%$ в точке K' , на изотерме точки K_0 . Таким образом при смешении двух ненасыщенных количеств воздуха M_0 и K_0 , можно получить пересыщенное состояние смеси.

Для характеристики потенциальных возможностей нагретого газа, как сушильного агента введем критерий Гухмана, Gu .

При сушке сублимацией температура газа может быть ниже нуля; поэтому, чтобы получить положительные значения критерия в соответствии с его физическим смыслом при любой температуре среды, ее значение берется по абсолютной шкале.

$$T_c = 273 + t_c,$$

$$Gu = \frac{t_c - t_m}{T_c}. \quad (23)$$

Критерий Гухмана отражает влияние массообмена на теплообмен.

3 Расчет параметров влажного воздуха

Состояние, влажного воздуха характеризуется параметрами, которые определяют его свойства как сушильного агента и используются в расчетах сушильных установок.

Относительную влажность воздуха определяют по формуле

$$\varphi = \frac{\rho_{II}}{\rho_H} \cdot 100\%, \quad (24)$$

где ρ_{II} - парциальное давление пара в воздухе, Па;

ρ_H - давление насыщенного пара, Па.

При определении относительной влажности воздуха по показанию психрометра парциальное давление пара, рассчитывают по формуле

$$\rho_{II} = \rho_M - A\rho_{\delta}(t_C - t_M'), \quad (25)$$

где ρ_M - давление насыщенного пара при температуре смоченного термометра, Па;

A - коэффициент, зависящий в основном от скорости воздуха; при $v > 0,5$ м/с.

$$A = 0,00001(65 + 6,75/v). \quad (26)$$

$$\rho_{\delta} = \rho_{c.s} + \rho_{II},$$

где ρ_{δ} и $\rho_{c.s}$ - соответственно парциальное давление абсолютно сухого воздуха и пара, Па;

t_C - температура воздуха по сухому термометру, °С;

t_M' - показание смоченного термометра, °С.

Тогда

$$\varphi = \frac{p_M}{p_H} - \frac{A\rho_{\delta}}{p_H}(t_C - t_M'). \quad (27)$$

Удельное влагосодержание влажного воздуха (в кг/кг сухого воздуха)

$$x = 0,622 \frac{\varphi p_H}{p_{\delta} - \varphi p_H}. \quad (28)$$

Истинная температура мокрого термометра

$$t_M = t_M' - \frac{\Delta(t_C - t_M')}{100}, \quad (29)$$

где Δ - поправка на показание смоченного термометра, % определяется по диаграмме на рисунке 4 в зависимости от показания смоченного термометра t_M' и скорости воздуха ν .

Потенциал сушки рассчитывают по формуле

$$\varepsilon = t_C - t_M'. \quad (30)$$

Удельная энтальпия влажного воздуха, (в кДж/кг сухого воздуха)

$$i = c_{c.в}t + x(r_0 + c_{П}t), \quad (31)$$

где $c_{c.в}$ - удельная теплоемкость абсолютно сухого воздуха;

$$c_{c.в} = 1,0046 \text{ кДж}/(\text{кг К});$$

$c_{П}$ - удельная теплоемкость пара, кДж/(кг К);

$$c_{П} = 1,8418 \text{ кДж}/(\text{кг К});$$

r_0 - удельная теплота парообразования при температуре

$$0 \text{ }^\circ\text{C}, \text{ кДж}/\text{кг}, r_0 = 2500 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Плотность влажного воздуха, (в кг/м³)

$$\rho_{ВВ} = \rho_{СВ} + \rho_{П}, \quad (32)$$

ИЛИ

$$\rho_{BB} = \frac{1,293 \cdot 273}{273 + t} \left(1 - 0,378 \frac{\varphi \rho_H}{\rho_6}\right). \quad (33)$$

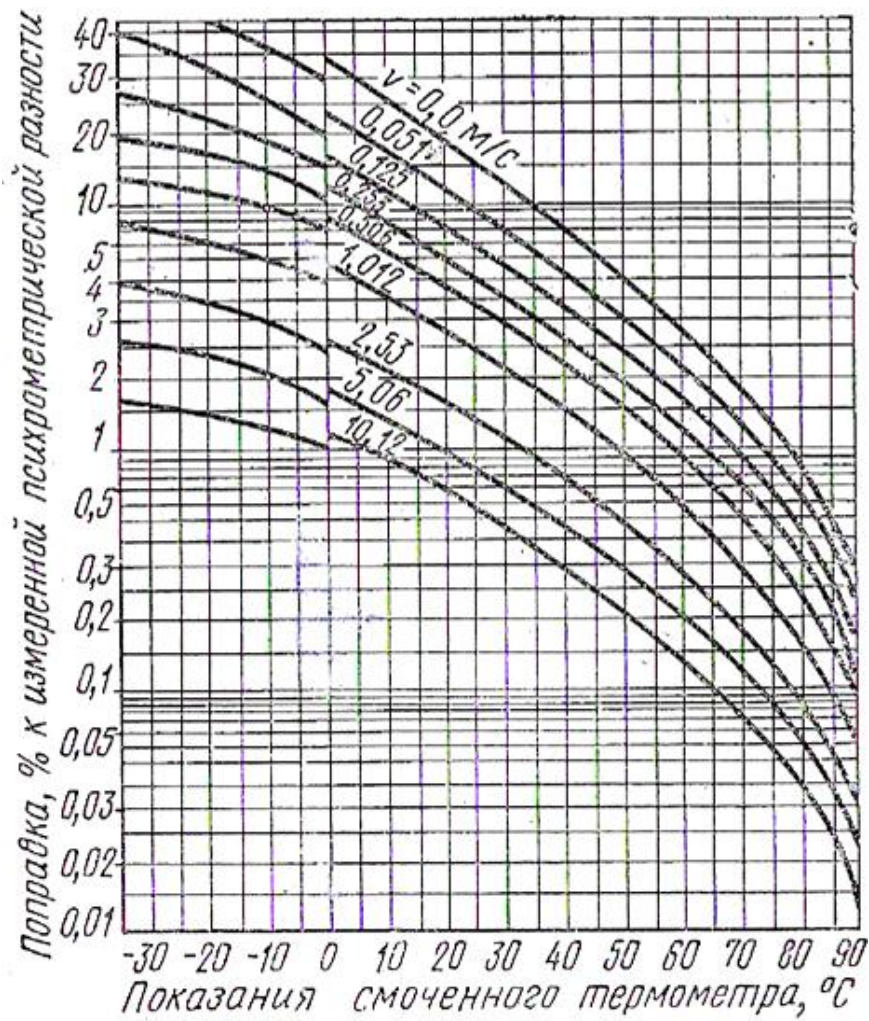


Рисунок 4 - Диаграмма для определения поправки термометра

При сушке с возвратом части отработавшего воздуха (с рециркуляцией) удельное влагосодержание смеси

$$x_{CM} = \frac{x_0 + nx_2}{1 + n}, \quad (34)$$

где x_0 и x_2 - соответственно удельное влагосодержание свежего и отработавшего воздуха, кг/кгс.в;

n - кратность смешения.

Удельная энтальпия смеси

$$i_{CM} = \frac{i_0 + ni_2}{1 + n}, \quad (35)$$

где i_0 и i_2 - соответственно удельная энтальпия свежего и отработавшего воздуха, кДж/кг с. в.

4 Примеры расчетов

Состояние влажного воздуха, поступающего в сушильную камеру, характеризуется температурой 74 °С и относительной влажностью 10 %. Рассчитать удельное влагосодержание и удельную энтальпию этого воздуха. Сравнить полученные значения со значениями, найденными по i - x -диаграмме.

Расчет ведут в такой последовательности

1) удельное влагосодержание влажного воздуха рассчитывают по формуле (28).

а) принимают значение барометрического давления $\rho_\sigma = 0,991 \cdot 10^5$ Па;

б) по таблице 37 [5] находят давление насыщенного пара при температуре 74 °С

$$p_n = 0,37 \cdot 10^5 \text{ Па,}$$

тогда

$$x = 0,622 \frac{0,1 \cdot 0,37 \cdot 10^5}{0,991 \cdot 10^5 - 0,1 \cdot 0,37 \cdot 10^5} = 0,0245 \text{ кг/кг с.в.}$$

2) удельную энтальпию влажного воздуха рассчитывают по формуле (31):

$$i = 1,005 \cdot 74 + 0,0245 (2500 + 1,841 \cdot 74) = 138,6 \text{ кДж/кг с.в.}$$

3) для определения параметров влажного воздуха по i - x -диаграмме необходимо найти положение точки, характеризующей состояние воздуха (рисунки 5):

а) выбирают изотерму, соответствующую заданной температуре воздуха $t = 74 \text{ }^\circ\text{C}$;

б) выбирают линию постоянной относительной влажности воздуха $\varphi = 10 \%$

в) на пересечении этих линий находят положение точки А, которой соответствуют $x = 0,0246 \text{ кг/кг с.в.}$; $I = 139 \text{ кДж/кг с.в.}$

4) расхождение в результатах аналитического и графического расчетов составляет: для удельного влагосодержания - 0,4 %; для удельной энтальпии - 0,3 %.

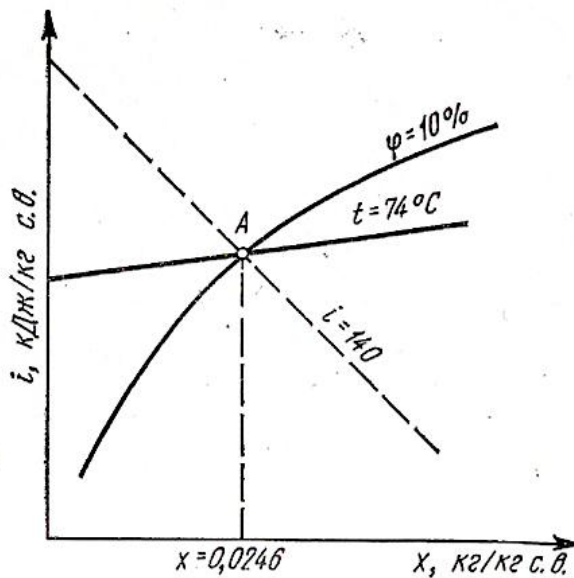


Рисунок 5 – Определение по диаграмме i - x значений x и i

Температура влажного воздуха $78\text{ }^{\circ}\text{C}$, удельная энтальпия 120 кДж/кг с.в. Определить по диаграмме i - x значение температуры точки росы для этого воздуха

Расчет ведут в такой последовательности

- 1) на пересечении изотермы $t = 78\text{ }^{\circ}\text{C}$ и линии удельной энтальпии $i = 120\text{ кДж/кг с.в.}$ (рисунок 6) находят положение точки А, характеризующей состояние влажного воздуха.
- 2) для этой точки удельное влагосодержание $x = 0,013\text{ кг/кг с.в.}$
- 3) температура точки росы соответствует температуре воздуха, при которой он становится полностью насыщенным при охлаждении.

При охлаждении удельное влагосодержание воздуха не изменяется, поэтому на диаграмме i - x изменение его состояния при охлаждении будет характеризоваться линией, которая будет идти от точки А вниз по линии $x = 0,013$ кг/кг с.в. до предела. Пределом охлаждения является достижение $\varphi = 100\%$, что определяется положением точки а. Через эту точку проходит изотерма $t_p = 21^\circ\text{C}$, это и будет значение температуры точки росы.

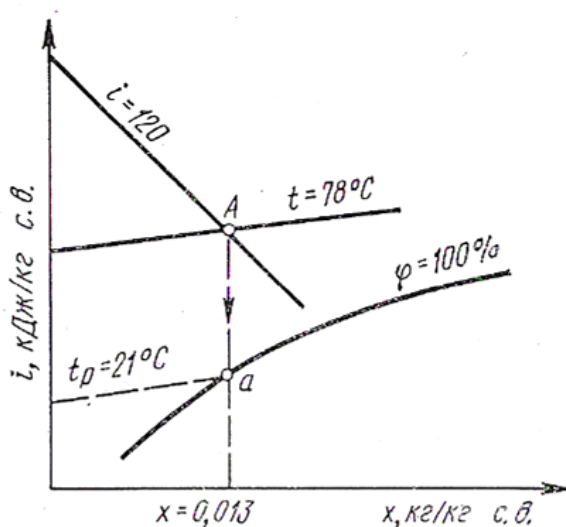


Рисунок 6 – Определение значения t_p по диаграмме i - x

Показания психрометра в воздуховоде перед сушильной камерой: $t = 57^\circ\text{C}$, $t'_{\text{м}} = 30^\circ\text{C}$. Определить по диаграмме i - x значение удельного влагосодержания, удельной энтальпии и относительной влажности воздуха, поступающего в сушильную камеру.

Расчет ведут в такой последовательности

1) на диаграмме i - x (рисунок 7) находят точку пересечения изотермы $t = 57^\circ\text{C}$ и линии показания смоченного термометра $t'_{\text{м}} = 30^\circ\text{C}$ - точка А. Эта точ-

ка характеризует состояние влажного воздуха, поступающего в сушильную камеру.

2) точке А соответствуют:

удельное влагосодержание $x = 0,016$ кг/кг с.в.;

удельная энтальпия $i = 100$ кДж/кг с.в.;

относительная влажность $\varphi = 15\%$.

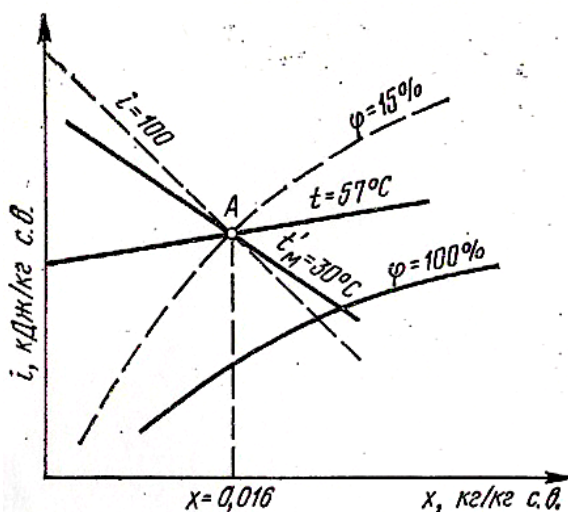


Рисунок 7 – Определение значения φ по диаграмме i - x

Определить парциальное давление пара во влажном воздухе при относительной влажности $\varphi = 10\%$ и удельной энтальпии $i = 90$ кДж/кг с.в.

Расчет ведут в такой последовательности

1) на диаграмме i - x (рисунок 8) находят точку А, характеризующую состояние влажного воздуха на пересечении линии $\varphi = 10\%$ и линии $i = 90$ кДж/кг с.в.

2) парциальное давление пара во влажном воздухе зависит от удельного влагосодержания воздуха. Для определения значения парциального давления пара по i - x -диаграмме нужно опуститься от точки A по линии, соответствующей $x = 0,012$ кг/кг с.в., до пересечения с линией парциального давления водяного пара - точка a и далее по горизонтали перейти на правую ось ординат диаграммы, на которой отложены значения давления в масштабе M_p .

Отрезок $0'b$ на оси давления составляет 14 мм. Таким образом, величина парциального давления пара во влажном воздухе с заданными параметрами составляет:

$$p_n = 14 \cdot 129 = 1806 \text{ Па.}$$

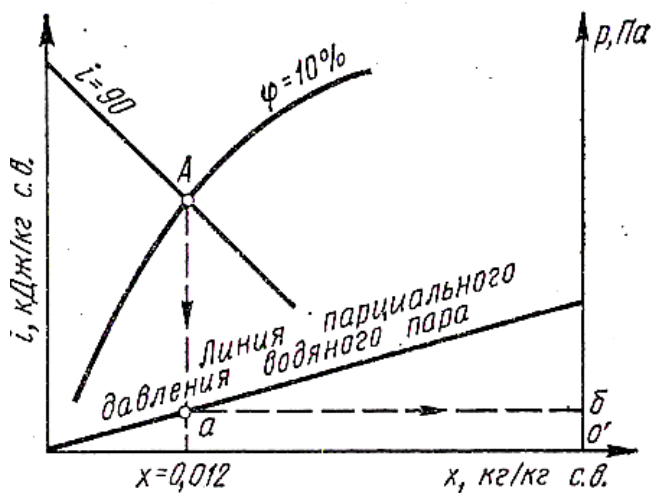


Рисунок 8 – Определение значения p_n по диаграмме i - x

В сушильную камеру поступает влажный воздух с удельной энтальпией 90 кДж/кг с.в.; температура точки росы этого воздуха 15 °С. Определить для этого воздуха по диаграмме i - x значения относительной влажности и температуры. Рассчитать потенциал сушки и определить относительную влажность по психрометрической таблице.

Расчет ведут в такой последовательности

1) на диаграмме i - x находят положение точки, характеризующей состояние влажного воздуха с заданными параметрами (рисунок 9):

а) находят изотерму $t_p = 15$ °С, соответствующую значению температуры точки росы;

б) точка пересечения изотермы $t_p = 15$ °С и линии $\varphi = 100$ % - точка а - определяет значение удельного влагосодержания заданного воздуха $x = 0,115$ кг/кг с.в.;

в) от точки а следует подняться по линии $x = 0,115$ кг/кг с.в. до пересечения с линией удельной энтальпии $i = 90$ кДж/кг с.в. Точка пересечения А характеризует состояние воздуха с заданными параметрами.

2) для воздуха в точке А: $\varphi = 8,5$ %; $t = 60$ °С (на рисунке должно быть тоже 60 °С).

3) потенциал сушки рассчитывают по формуле (30). Для этого по диаграмме i - x для воздуха в точке А определяют значение температуры мокрого термометра $t_m = 28$ °С (на рисунке должно быть тоже 28 °С), затем $\varepsilon = 60 - 28 = 32$ °С.

4) по таблице 39 приложения [5] значениям $t_c - t'_M = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_c = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ соответствует относительная влажность воздуха $\varphi = 8 \text{ } \%$.

Расхождение по сравнению с результатом графического определения составляет $5,9 \text{ } \%$.

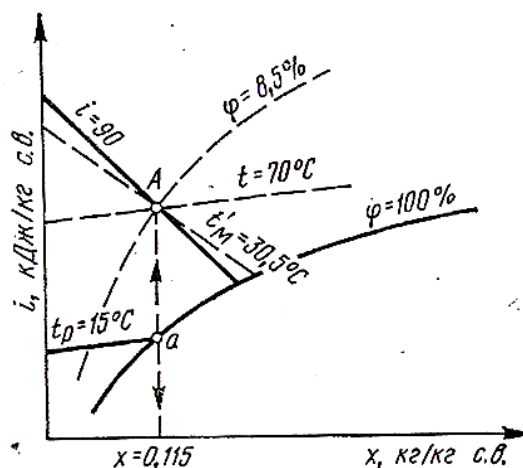


Рисунок 9 – Определение значений t_c и t'_M по диаграмме $i-x$

В сушильную камеру поступает влажный воздух при температуре $80 \text{ }^\circ\text{C}$; потенциал сушки этого воздуха составляет $46 \text{ }^\circ\text{C}$. Поправка на действительную сушилку $\Delta = 0$. Отработавший воздух выходит из сушильной камеры при температуре $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Рассчитать: удельное влагосодержание и относительную влажность воздуха перед сушильной камерой; удельное влагосодержание и относительную влажность отработавшего воздуха.

Расчет ведут в такой последовательности

1) пользуясь формулой (30), находят температуру по смоченному термометру для воздуха, поступающего в сушильную камеру:

$$t'_M = t_c - \varepsilon,$$

$$t'_M = 80 - 46 = 34 \text{ }^\circ\text{C}.$$

2) на диаграмме i - x (рисунок 10) находится точка пересечения изотермы $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ и линии $t'_M = 34 \text{ }^\circ\text{C}$ - точка В, характеризующая состояние воздуха перед сушильной камерой. Для этого воздуха определяют: $x_1 = 0,015 \text{ кг/кг с. в.}$, $\varphi_1 = 4,96 \text{ } \%$.

3) по условию поправка на действительную сушилку $\Delta = 0$, поэтому в процессе сушки удельная энтальпия воздуха не изменяется: $i_2 = i_1 = 120 \text{ кДж/кг с.в.}$

4) состояние отработавшего воздуха определяется точкой С - на пересечении линии $i = 120 \text{ кДж/кг с.в.}$ и изотермы $t_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$. Для этого воздуха находят: $x_2 = 0,029 \text{ кг/кг с.в.}$; $\varphi_2 = 45 \text{ } \%$.

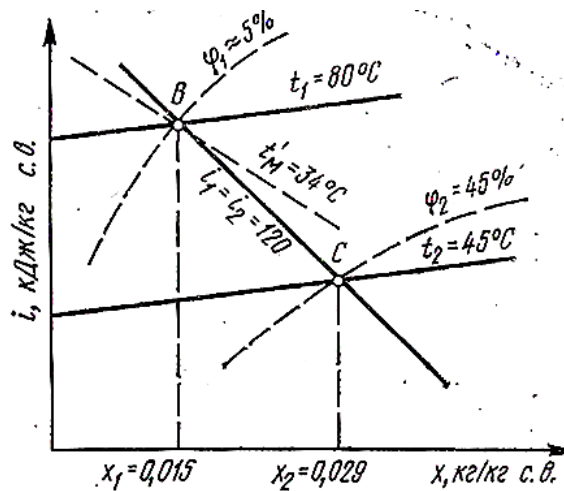


Рисунок 10 – Определение значений x и φ по диаграмме i - x

В калорифер поступает влажный воздух температурой $t_0 = 20$ °С с удельной энтальпией $i_0 = 40$ кДж/кг с.в. Определить, как изменится потенциал сушки при нагревании воздуха в калорифере до температуры $t_1 = 61$ °С.

Расчет ведут в такой последовательности

1) потенциал сушки воздуха до калорифера рассчитывают по формуле (30);

2) на диаграмме i - x (рисунок 11) на пересечении изотермы $t_0 = 20$ °С и линии $i_0 = 40$ кДж/кг с.в. находят положение точки А, характеризующей состояние заданного воздуха. Для этого воздуха определяют: $t'_{m0} = 14,2$ °С, $x_0 = 0,008$ кг/кг с.в. Потенциал сушки $\varepsilon_0 = 20 - 14,2 = 5,8$ °С. На диаграмме i - x находят положение точки, характеризующей состояние подогретого воздуха - на пересечении линии $x_0 = 0,008$ кг/кг с.в. и изотермы $t_1 = 61$ °С - точка В. Для этого воздуха $t'_m = 26,5$ °С;

3) Рассчитывают потенциал сушки подогретого воздуха: $\varepsilon_1 = 61 - 26,5 = 34,5$ °С. Таким образом, при нагревании воздуха в калорифере его потенциал сушки увеличился примерно в 6 раз:

$$\varepsilon_1 / \varepsilon_0 = 34,5 / 5,8 \cong 6.$$

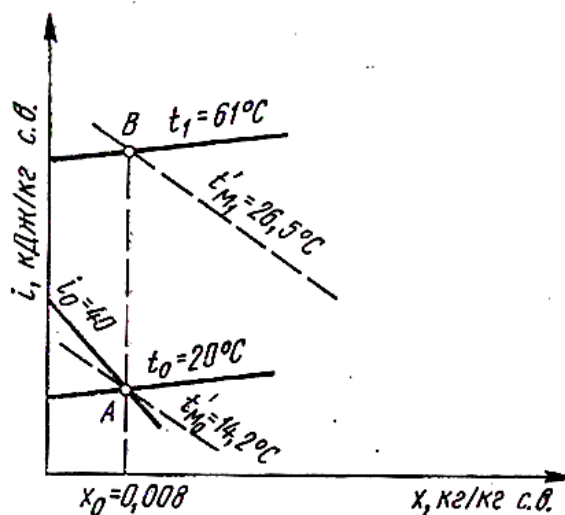


Рисунок 11 – Определение значений x и t'_m по диаграмме i - x

Состояние влажного воздуха характеризуется температурой 40 °С и относительной влажностью 30 %. Определить по диаграмме i - x : удельное влагосодержание воздуха; максимально возможное удельное влагосодержание воздуха при температуре 40 °С; давление насыщенного пара в воздухе.

Расчет ведут в такой последовательности

1) на диаграмме i - x (рисунок 12) находят точку, характеризующую состояние влажного воздуха - на пересечении изотермы $t = 40$ °С и линии $\varphi = 30$ % (точка А). Для этого воздуха определяют $x = 0,012$ кг/кг с.в.;

2) при $t = 40$ °С максимальное влагосодержание воздуха будет иметь при полном насыщении его водяными парами, т.е. при $\varphi = 100$ %. Следовательно, точка пересечения изотермы $t = 40$ °С и линии $\varphi = 100$ % (точка а) будет характеризовать воздух при $t = 40$ °С, полностью насыщенный водяными парами. Для этого воздуха определяют $x_{\text{макс}} = 0,050$ кг/кг с.в.;

3) давление насыщенного пара в воздухе при температуре 40 °С зависит от $x_{\text{макс}}$ и определяется по диаграмме следующим образом:

а) от точки а по линии $x_{\text{макс}} = 0,050$ кг/кг с.в. следует спуститься на линию парциального давления водяного пара – точка б;

б) от точки б нужно перейти по горизонтали на правую ось ординат, где в масштабе отложено давление пара - точка в. Тогда $p_{\text{н}} = O'bM_p$, где $O'b$ - отрезок на оси давления 57 мм; M_p - масштаб оси давления; для диаграммы на вклейке $M_p = 129$.

$$p_{\text{н}} = 57 \cdot 129 = 7353 \text{ Па.}$$

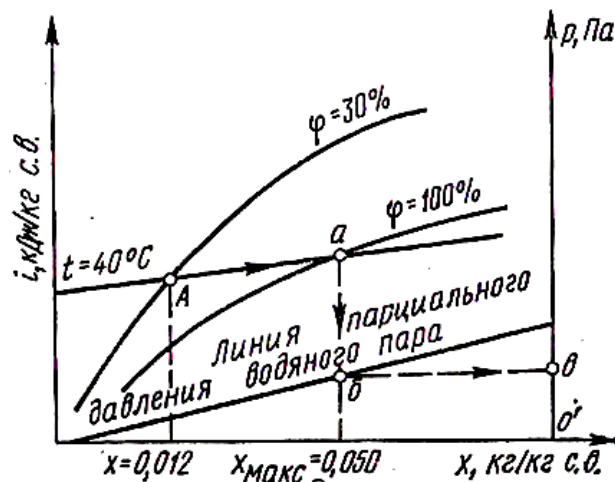


Рисунок 12 – Определение значений $p_{\text{н}}$ по диаграмме i - x

В сушильную камеру поступает воздух с параметрами: $t_1 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = 4 \text{ } \%$. Отработавший воздух выходит из сушильной камеры с параметрами: $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50 \text{ } \%$. Рассчитать плотность воздуха, входящего и выходящего из сушильной камеры.

Расчет ведут в такой последовательности

Плотность влажного воздуха определяют по формуле (32)

1) для нахождения плотности воздуха, поступающего в сушильную камеру, определяют давление насыщенного пара в воздухе при $t_1 = 85 \text{ }^\circ\text{C}$ по таблице 37 приложения [5]: $p_{n1} = 0,576 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Рассчитывают парциальное давление пара в воздухе из формулы (24):

$$p_n = \varphi_1 p_{n1},$$

$$p_{n1} = 0,04 \cdot 0,576 \cdot 10^5 = 0,023 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

тогда

$$\rho_{\text{вл.в1}} = \frac{1,293 \cdot 273}{273 + 85} \left(1 - 0,378 \frac{0,023 \cdot 10^5}{10^5} \right) = 0,9 \text{ кг/м}^3.$$

2) для определения плотности отработавшего воздуха определяют давление насыщенного пара в воздухе при температуре $t_2 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ по таблице 37 приложения [5]: $p_{n2} = 0,0736 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Рассчитывают парциальное давление пара в воздухе:

$$p_{n2} = \varphi_2 p_{n2},$$

$$p_{n2} = 0,5 \cdot 0,0736 \cdot 10^5 \text{ Па},$$

тогда

$$\rho_{\text{вл.в2}} = \frac{1,293 \cdot 273}{273 + 40} \left(1 - 0,378 \frac{0,0367 \cdot 10^5}{0,981 \cdot 10^5} \right) = 1,11 \text{ кг/м}^3.$$

В соответствии с формулой (32) на изменение плотности влажного воздуха в процессе сушки оказывают влияние парциальное давление пара и температура.

Увеличение парциального давления пара в процессе сушки ($p_{n2} > p_{n1}$) вызывает уменьшение плотности. С понижением температуры воздуха в процессе сушки ($t_2 < t_1$) плотность воздуха увеличивается.

По расчету в процессе сушки плотность влажного воздуха возросла. Это свидетельствует о преимущественном влиянии на плотность изменения температуры воздуха.

Влажный воздух температурой 80 °С, с относительной влажностью 15 % охлаждается до 20 °С. Определить: значение температуры точки росы для воздуха с заданными параметрами; удельное влагосодержание воздуха после охлаждения его до 20 °С; на сколько изменится относительная влажность заданного воздуха после охлаждения его до 20 °С и при повторном нагревании до 80 °С

Расчет ведут в такой последовательности

1) на диаграмме i - x на пересечении изотермы $t_1 = 80$ °С и линии $\varphi_1 = 15$ % находят точку А, характеризующую состояние воздуха с заданными параметрами: (рисунок 13);

2) охлаждение воздуха происходит при постоянном удельном влагосодержании $x_1 = 0,042$ кг/кг с.в. до состояния полного насыщения ($\varphi = 100$ %) - точка В. Температура охлажденного воздуха t_2 при $\varphi = 100$ % является температурой точки росы: $t_2 = t_p = 37$ °С.;

3) по условию требуется охладить воздух до температуры $t_3 = 20$ °С. Охлаждение воздуха состояния В ниже $t_p = 37$ °С сопровождается конденсацией пара в нем, т.е. осушкой воздуха. В процессе осушки при $\varphi = 100$ % уменьшается удельное влагосодержание воздуха. Графически этот процесс на диаграмме i - x идет от точки В по линии $\varphi = 100$ % до пересечения с изотермой $t_3 = 20$ °С в точке С.

Из диаграммы видно, что в процессе осушки воздуха за счет конденсации пара удельное влагосодержание уменьшилось от $x_1 = 0,042$ кг/кг с.в. до $x_2 = 0,015$ кг/кг с.в.;

4) при нагревании воздуха состояния С до первоначальной температуры $t_1 = 80\text{ }^\circ\text{C}$ (при постоянном удельном влагосодержании $x_2 = 0,015\text{ кг/кг с.в.}$) получится воздух состояния D. Относительная влажность этого воздуха $\varphi_2 = 5\%$, т.е. воздух стал более сухим, чем исходный ($\varphi_1 = 15\%$).

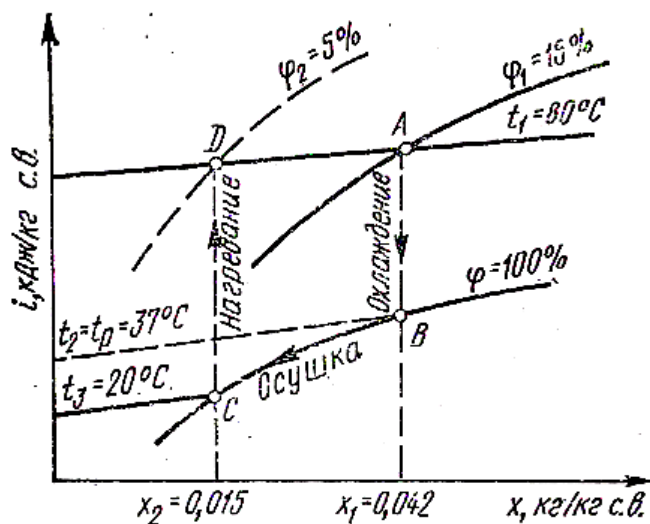


Рисунок 13 – Изображение на диаграмме i - x процессов нагревания, охлаждения, сушки воздуха

Процесс сушки происходит с возвратом частично обработавшего воздуха при кратности смешения $n = 3$. Параметры свежего воздуха: $t_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_0 = 60\%$. Параметры обработавшего воздуха: $t_2 = 45\text{ }^\circ\text{C}$; $\varphi_2 = 50\%$. Определить удельный расход циркулирующего воздуха.

Расчет ведут в такой последовательности

Удельный расход смеси свежего, и обработавшего воздуха (циркулирующего воздуха) при сушке с рециркуляцией (в кг на 1 кг испаренной влаги) рассчитывают по формуле

$$l_{II} = l(n + 1). \quad (36)$$

1) определяют удельный расход свежего воздуха по формуле (36). Сначала рассчитывают удельное влагосодержание свежего воздуха по формуле (28), для чего предварительно по таблице 37 приложения [5] при температуре $t_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ определяют давление насыщенного пара: $p_{H_0} = 0,0234 \cdot 10^5 \text{ Па}$; принимается значение барометрического давления $p_\phi = 10^5 \text{ Па}$, тогда

$$x_0 = 0,622 \frac{0,6 \cdot 0,0234 \cdot 10^5}{10^5 - 0,6 \cdot 0,0234 \cdot 10^5} = 0,009 \text{ кг/кг с.в.}$$

Рассчитывают удельное влагосодержание отработавшего воздуха, для чего по таблице 37 приложения [5] при температуре $t_2 = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ определяют давление насыщенного пара: $p_{H_2} = 0,0957 \cdot 10^5 \text{ Па}$, тогда

$$x_2 = 0,622 \frac{0,5 \cdot 0,957 \cdot 10^5}{10^5 - 0,5 \cdot 0,957 \cdot 10^5} = 0,032 \text{ кг/кг с.в.}$$

Определяют удельный расход свежего воздуха

$$l = \frac{1}{0,032 - 0,009} = 435 \text{ кг/кг исп.вл.}$$

2) рассчитывают удельный расход циркулирующего воздуха

$$l_{II} = 435 (3 + 1) = 1740 \text{ кг/кг исп.вл.}$$

Рассчитать, какое количество мармелада влажностью 30 % (влажность на общую массу) необходимо подавать в сушилку, чтобы обеспечить выход 550 кг/ч высушенного мармелада влажностью 23 %.

Количество влаги (в кг/ч или кг/с), удаляемой из материала в процессе сушки находят по формуле:

$$U = G_1 \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} . \quad (37)$$

Или

$$U = G_2 \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1} , \quad (38)$$

где G_1 и G_2 - масса материала до и после сушки, кг/ч или кг/с;

W_1 и W_2 - влажность материала до и после сушки , %.

G_1 и G_2 связаны следующими соотношениями:

$$G_2 = G_1 \frac{100 - W_1}{100 - W_2} . \quad (39)$$

Или

$$G_1 = G_2 \frac{100 - W_2}{100 - W_1} . \quad (40)$$

Для расчета производительности сушилки по влажному материалу используют формулу:

$$G_1 = 550 \frac{100 - 23}{100 - 30} = 605 \text{ кг/ч.}$$

Рассчитать, какой влажности получится пастила, если в процессе сушки из 800 кг/ч пастилы влажностью 32 % (на общую массу) удаляется влаги 144 кг/ч.

Для определения конечной влажности пастилы используют формулу (37), откуда

$$W_2 = \frac{G_1 W_1 - 100U}{G_1 - U},$$

$$W_2 = \frac{800 \cdot 32 - 100 \cdot 144}{800 - 144} = 17 \text{ \%}.$$

Список использованных источников

1. Баум, А.Е. Сушка зерна / А.Е. Баум, В.А. Резчиков. – Москва: Колос, 1983. – 223 с.
2. Атаназевич, В.И. Сушка зерна / В.И. Атаназевич. – Москва: Агропромиздат, 1989. – 240 с.
3. Гинзбург, А.С. Технология сушки пищевых продуктов / А.С. Гинзбург. – Москва: Пищевая промышленность, 1976. – 247 с.
4. Жидко, В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко. – Москва: Колос, 1982. – 239 с.
5. Расчеты и задачи по процессам и аппаратам пищевых производств: учеб. пособие / под ред. С.М. Гребенюка, Н.С. Михеевой. - Москва: Агропромиздат, 1987. - 304 с.