

Тема: СУШКА СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ

1. Способы сушки
2. Характеристики влажных тел и агентов сушки
3. Кинетика процесса сушки
4. Материальный баланс конвективной сушки
5. Тепловой баланс сушки

1. СПОСОБЫ СУШКИ

Сушкой называют процесс, направленный на удаление влаги из влажных материалов (твердых, пастообразных, в виде растворов или суспензий). Влагу из материала можно удалить разными способами: механическим, сорбционным и тепловым.

К **механическому** способу относят фильтрацию, прессование, центрифугирование. Этот способ применяют при выделении путем фильтропрессования соков из плодов и ягод.

При **сорбционном** способе влажный материал находится в непосредственном контакте с гигроскопическими веществами (хлористым кальцием и пр.). Сорбционный метод используют для сушки материалов, к которым не применим тепловой способ (семена фасоли, сои и пр.).

При **тепловом способе** влага испаряется с поверхности тела и диффундирует в окружающий воздух. Отсюда следует, что в этом случае имеет место **термическая сушка**.

В зависимости от способа подведения теплоты к объекту сушки различают конвективный, кондуктивный (контактный), радиационный, сублимационный и электрический способы.

При **конвективном** способе теплота передается материалу путем конвекции от нагретого агента сушки (нагретый воздух или смесь нагретого воздуха с топочными газами).

Кондуктивным называют способ сушки, при котором теплота, необходимая для нагревания влажного материала и испарения жидкости, передается при непосредственном контакте теплопроводностью от нагретой поверхности к телу, подвергаемому сушке.

Контактный метод сушки используют на крупозаводах в паровых сушилках.

Радиационная сушка может быть естественной (солнечными лучами) и искусственной (инфракрасными лучами).

Солнечная сушка имеет ограниченное применение. Для ее реализации необходима площадка из расчета 10...13 м² на 1 т зерна. В солнечную погоду в течение дня влажность зерна уменьшается на 3-4 %.

Для сушки **инфракрасными лучами** генераторами излучения служат специальные электрические лампы, керамические плиты и металлические панели, нагреваемые электротоком или газом. Они характеризуются высоким тепловым напряжением.

Сублимационная сушка - удаление влаги из продуктов путём их замораживания и последующего перехода льда в пар (минуя жидкую фазу) при разрежении в вакууме. Сублимационная сушка производится при температуре ниже 0 °С. При сублимационной сушке влага перемещается в продукте в виде пара, не захватывая с собой ферментов, витаминов, экстрактивных веществ и других полезных веществ.

Сублимацию применяют в тех случаях, когда необходимо сохранить первоначальные свойства материалов. Так сушат фрукты, мясо, различные биологические препараты. Продукт сохраняет цвет, запах, вкус. Сублимационную сушку применяют в пищевой промышленности, а также для высушивания биологически активных препаратов и вакцин.

Сушка в электрическом поле токов высокой частоты (ТВЧ). При сушке токами высокой частоты подвод тепла осуществляется с помощью переменных полей электрического тока высокой (10-25 МГц) и сверхвысокой (2000-2500 МГц) частоты. Влажные материалы растительного происхождения являются диэлектриками, обладают свойствами полупроводников. В их состав входят ионы электролитов, электроны, молекулы полярных и неполярных диэлектриков, обладающие дипольными моментами. В электромагнитном поле диполи располагаются осью вдоль поля. Попадая в переменное электромагнитное поле, они совершают колебательные движения, стремясь следовать за полями.

При сушке материал помещается между обкладками конденсатора, к которым подается ток высокой или сверхвысокой частоты. Обкладки имеют противоположные заряды, поэтому ионы и электроны перемещаются внутри материала к той или иной обкладке. При смене заряда на обкладках они перемещаются в противоположных направлениях, в результате возникает трение с выделением теплоты. Диполи в переменном электрическом поле будут колебаться то в одну, то в другую сторону, в результате также возникает трение с выделением тепла. Энергия электромагнитных волн, затрачиваемая на преодоление этих трений, будет превращаться в тепло.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЛАЖНЫХ ТЕЛ И АГЕНТОВ СУШКИ

Виды связи влаги и материала

Процесс удаления влаги из тела сопровождается нарушением связи влаги с материалом, на что расходуется энергия. От характера этой связи зависят режимы сушки, обеспечивающие наиболее эффективное удаление влаги.

Химическая связь влаги с материалом образуется в результате химической реакции и является наиболее прочной. В этом случае вода может быть удалена только за счет химических реакций. В большинстве технологических процессов эта влага из материала не удаляется.

Физико-химическая связь существует в виде двух форм: адсорбционной и осмотической.

Адсорбционно-связанная влага удерживается на поверхности частиц тела. Для удаления этой влаги необходимо сообщить телу соответствующее количество теплоты.

Осмотически связанная влага проникает внутрь коллоидного материала через полупроницаемые оболочки ячеек тела, чем обусловлено набухание тела.

Физико-механическая связь влаги с материалом наименее прочная. К ней относят поверхностную, т. е. влагу смачивания, и капиллярную влагу. Механически связанная влага может быть удалена механическим способом или испарением.

Влажные тела принято разделять на три группы в зависимости от преобладающей формы связи влаги с материалом.

Тела, в которых жидкость в основном связана капиллярными силами, называют **капиллярно-пористыми**. Примером таких тел могут служить влажный кварцевый песок, древесный уголь и пр.

Тела, в которых преобладает осмотически связанная влага, называют **коллоидными** (например, желатин).

Тела, содержащие осмотически связанную и капиллярную воду, называют коллоидно-капиллярно-пористыми. К ним относятся торф, древесина, некоторые строительные материалы, зерно, зеленые корма и пр.

Независимо от формы связи различают внешнюю и гигроскопическую влагу. Последняя в процессе сушки не удаляется полностью из тела.

Теплофизические характеристики

В процессе сушки большое значение имеют теплофизические характеристики влажного материала.

Влажностью материала называют отношение содержания массы жидкости $m_{Ж}$ к массе влажного материала $m_{ВМ}$:

$$W = \frac{m_{Ж}}{m_{ВМ}} = \frac{m_{Ж}}{m_{С} + m_{Ж}}, \text{ кг/кг} \quad (1)$$

где $m_{С}$ — масса сухого материала, кг;

$m_{Ж}$ - масса жидкости;

$m_{ВМ}$ - масса влажного материала, кг

Влажность W выражают в килограммах на килограмм или процентах.

Влагосодержание материала — это отношение массы жидкости $m_{ж}$ к массе сухого тела m_c :

$$u = \frac{m_{ж}}{m_c}, \text{ кг/кг} \quad (2)$$

Между влагосодержанием и влажностью тела существует следующая связь:

$$W = \frac{u}{1+u} \quad (3)$$

В процессе сушки не всю влагу удаляют из тела.

Концентрацией влаги называют массу жидкости, приходящуюся на единицу объема материала, называют.

Теплоемкость влажного материала:

$$c_{вм} = c_c(1-u) + c_{ж} \cdot u \quad (4)$$

где c_c и $c_{ж}$ — массовые теплоемкости сухого тела и жидкости.

Перемещение влаги в материале в процессе сушки происходит под воздействием **потенциала переноса**. Потенциал переноса влаги является параметром, аналогичным температуре при переносе теплоты.

В процессе сушки в материале создаются градиенты температуры и влагосодержания, под действием которых происходит перенос теплоты и влаги.

Перенос влаги характеризуют **коэффициентом диффузии** a_T , m^2/c , являющимся функцией влагосодержания тела и температуры. Этот коэффициент характеризует скорость протекания диффузии во влажном теле при изотермических условиях.

Если рассматривать влажный воздух в качестве агента сушки, то определенному значению относительной влажности φ воздуха соответствует определенная влажность материала, при которой внешний обмен влагой между ними прекращается, т. е. устанавливается **гидротермическое равновесное состояние тела**.

Равновесная влажность W_p зависит от относительной влажности и температуры воздуха.

Равновесное состояние влажного тела может быть достигнуто двумя путями: поглощением водяного пара телом из окружающего воздуха (процесс сорбции) или испарением влаги из материала (процесс десорбции).

Равновесную влажность при полном насыщении воздуха, т. е. при $\varphi = 100\%$, называют **гигроскопической влажностью**. Поглощение влаги материалом путем сорбции возможно до тех пор, пока не достигнута гигроскопическая влажность.

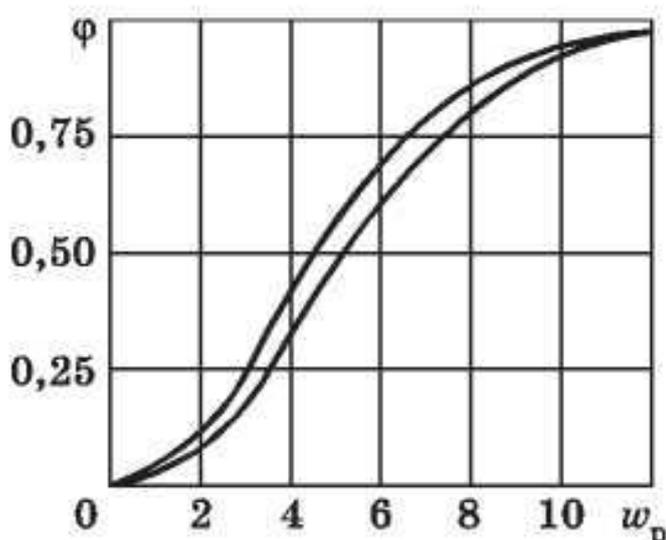


Рис. 1. Кривые сорбции и десорбции материала

Влажность W_{PK} , соответствующая связанной влаге в материале, которая не может быть достигнута лишь путем десорбции, называют **конечной равновесной влажностью**.

Очевидно, можно построить зависимость между парциальным давлением пара в воздухе, т. е. между его относительной влажностью, и влажностью материала в равновесном состоянии при данной температуре. Такую зависимость называют **изотермой сорбции**, если равновесие достигнуто путем сорбции, и **изотермой десорбции**, если равновесие достигнуто десорбцией. Для капиллярно-пористых коллоидных тел эти зависимости имеют вид *s*-образных кривых (рис. 1). Изотермы сорбции и десорбции не совпадают друг с другом. Это явление называют **сорбционным гистерезисом**.

3. КИНЕТИКА ПРОЦЕССА СУШКИ

Кинетикой сушки называют закономерность изменения во времени τ влагосодержания « u » и температуры t высушиваемого материала, а также скорости сушки, взятой по абсолютной величине $|du / d\tau|$.

Для анализа кинетики сушки на одной диаграмме совмещают три графика (рис. 2):

- зависимости между влагосодержанием материала и продолжительностью процесса сушки $u = f_1(\tau)$;

- зависимости между скоростью сушки и влагосодержанием материала $du / d\tau = f_2(u)$;

- зависимости между температурой и влагосодержанием материала в процессе сушки $t = f_3(u)$.

Из приведенной диаграммы следует, что весь процесс сушки можно разделить на три стадии:

a – нагревания материала;

b – постоянной скорости сушки;

c – убывающей скорости сушки.

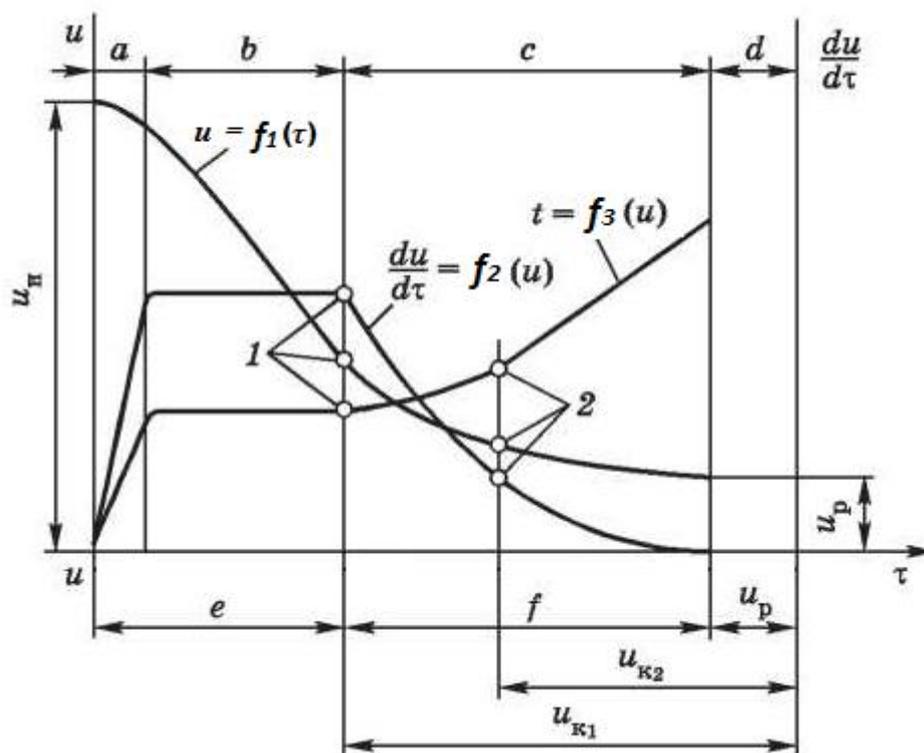


Рис. 2. Общий вид кривых сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов:

a – период нагревания; *b* – период постоянной скорости сушки; *c* – период убывающей скорости сушки; *d* – область равновесного состояния; *e* – область влажного состояния; *f* – область гигроскопического состояния материала

Стадию «*a*» называют стадией или периодом прогревания материала. Для тонких материалов и тел небольших размеров (стебли и листья растений, зерно и т. п.) начальная стадия сушки очень мала и поэтому при расчетах не учитывается.

После стадии нагревания влагосодержание материала изменяется по линейному закону и, следовательно, скорость сушки, представляющая собой изменение влагосодержания за единицу времени, будет постоянной.

Стадия постоянной скорости сушки продолжается до определенного значения $u_{к1}$, называемого **первым критическим влагосодержанием** (точка 1 на рис. 2).

После критической точки 1 следует третья стадия «с». Характерной особенностью этой стадии является убывание скорости сушки, и повышение температуры материала. Скорость сушки падает, достигая нулевого значения, соответствующего равновесному влагосодержанию.

На графике падающей скорости сушки расположена **вторая критическая точка 2**, начиная с которой температура тела является линейной функцией влагосодержания. До этого критического состояния происходит удаление капиллярной влаги, а в дальнейшем — адсорбционно-связанной влаги.

Период постоянной скорости принято называть первым периодом сушки, а период падающей скорости — вторым периодом сушки.

Сушку материала можно продолжать до тех пор, пока влагосодержание материала не достигнет равновесного значения u_p . При этом температура материала будет равна температуре окружающей среды.

Зависимость $du / dt = f_2(u)$ характеризует качество протекания процесса сушки. Зависимости $u = f_1(\tau)$ и $t = f_3(u)$ позволяют дать количественную оценку этому процессу.

4. МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ

На рис. 3 приведена схема конвективной сушилки, работающей на горячем воздухе или на смеси топочных газов с воздухом. Установка состоит из подогревателя 1 (топки или калорифера), сушильной камеры 2 и охлаждающей камеры 3.

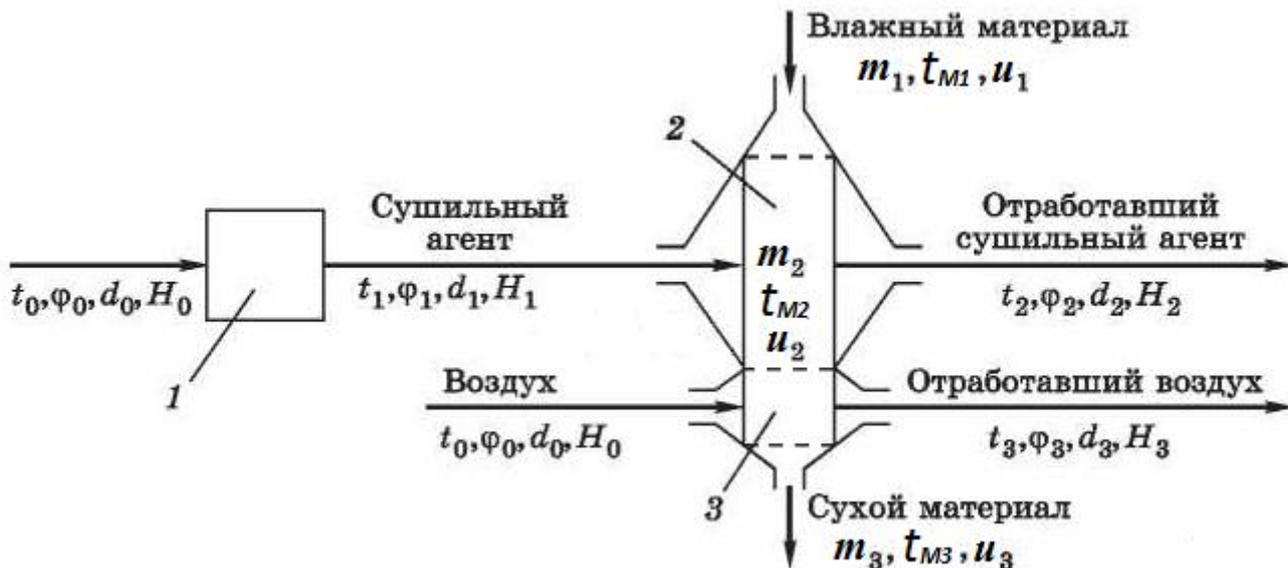


Рис. 3. Схема процессов в сушилке конвективного действия:
1 — калорифер (топка); 2 — сушильная камера; 3 — охлаждающая камера

Влажный материал с параметрами m_1, t_{M1}, u_1 поступает в сушильную камеру.

Наружный атмосферный воздух с параметрами t_0, φ_0, d_0 и H_0 поступает в подогреватель 1, где он нагревается и выходит с параметрами t_1, φ_1, d_1, H_1 . В нагревателе воздух может смешиваться с топочными газами или выходить как самостоятельный агент сушки.

Подготовленный сушильный агент подается в сушильную камеру, проходит через влажный материал, нагревает его, забирает лишнюю влагу и выходит наружу с параметрами t_2, φ_2, d_2, H_2 .

Нагретый высушенный материал с параметрами m_2, t_{M2}, u_2 подается в камеру охлаждения, куда также подается холодный атмосферный воздух.

После охлаждения материал имеет параметры m_3, t_{M3}, u_3 , а параметры отработанного воздуха равны t_3, φ_3, d_3, H_3 .

Масса удаляемой влаги равна разности между массой материала до и после сушки:

$$m_{\text{ВД}} = m_1 - m_2 \quad (5)$$

В процессе сушки масса абсолютно сухого материала m_C неизменна и равна:

$$m_C = m_1(1 - u_1) = m_2(1 - u_2) = \text{const} \quad (6)$$

Выразим отсюда массу m_2 :

$$m_2 = m_1 \frac{(1 - u_1)}{1 - u_2} \quad (7)$$

Подставив значение m_2 в уравнение (5), получим:

$$m_{\text{ВД}} = m_1 - m_1 \frac{1 - u_1}{1 - u_2} = m_1 \frac{u_1 - u_2}{1 - u_2} \quad (8)$$

Аналогично можно записать:

$$m_{\text{ВД}} = m_2 \frac{u_1 - u_2}{1 - u_1} \quad (9)$$

Относительная убыль в массе материала:

$$\Delta m_{\text{вБ}}(\%) = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \cdot 100 = \frac{u_1 - u_2}{1 - u_2} \cdot 100, \% \quad (10)$$

При установившемся режиме сушки количество влаги, поступившей с материалом и с агентом сушки, равно количеству влаги, уносимой из сушильной камеры:

$$m_1 \cdot u_1 + G_{AG} \cdot \frac{d_1}{1000} = m_2 \cdot u_2 + G_{AG} \cdot \frac{d_2}{1000} \quad (11)$$

где G_{AG} — расход агента сушки (сухая масса), кг/ч;

d_1, d_2 — влагосодержание агента сушки до и после сушильной камеры (нагретого воздуха или газовой смеси), г/кг.

Это уравнение материального баланса сушки.

Из уравнения (10) следует:

$$G_{AG} \cdot \frac{d_1 - d_2}{1000} = m_1 \cdot u_1 - m_2 \cdot u_2 = m_{\text{ВД}} \quad (12)$$

Таким образом, получим:

$$G_{AG} = \frac{1000 \cdot m_{\text{ВД}}}{d_1 - d_2} \quad (13)$$

Удельный расход сушильного агента, т. е. расход воздуха или газовой смеси на 1 кг испаренной влаги:

$$G_{AG}^{\text{ВД}} = \frac{G_{AG}}{m_{\text{ВД}}} = \frac{1000}{d_1 - d_2} \quad (14)$$

При использовании в качестве сушильного агента нагретого воздуха $d_1 = d_0$, так как влагосодержание воздуха до и после калорифера не изменяется. При сушке смесью воздуха с топочными газами влагосодержание агента сушки возрастает ($d_1 > d_0$) за счет влаги, полученной при сгорании топлива.

5. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС СУШКИ

5.1. Расход теплоты на сушку

С учетом потерь теплоты уравнение теплового баланса теплоты для сушильной камеры имеет вид:

$$G_{AG} \cdot H_0 + Q + m_2 \cdot c_2 \cdot t_{M2} + c_{Ж} \cdot t_{M1} \cdot m_{уд} + Q_D = G_{AG} \cdot H_2 + m_2 \cdot c_2 \cdot t_{M2} + Q_{ОКР} \quad (15)$$

где t_{M1} и t_{M2} – температуры материала в начале и конце процесса сушки;

Q – расход теплоты на нагрев сушильного агента;

Q_D – теплота от дополнительного источника;

$Q_{ОКР}$ – потери теплоты в окружающую среду через стенки сушильной камеры;

H_0 – энтальпия охлаждающего воздуха до камеры охлаждения;

H_2 – энтальпия сушильного агента после сушильной камеры;

c_2 – массовая теплоемкость материала после сушильной камеры;

$c_{Ж}$ – массовая теплоемкость удаляемой влаги.

Удельный расход теплоты на сушку:

$$q = G_{AG}^{уд} (H_2 - H_0) - q_D - \frac{m_2}{m_{уд}} \cdot c_2 \cdot t_{M1} - c_{Ж} \cdot t_{M1} + \frac{m_2}{m_{уд}} \cdot c_2 \cdot t_{M2} + q_{ОКР} \quad (16)$$

где q_D — удельный расход добавочной теплоты;

$q_{ОКР}$ — удельная теплота, теряемая через стенки в окружающую среду;

Удельный расход теплоты на нагрев материала определяется:

$$q_{НАГР} = \frac{m_2}{m_{уд}} \cdot c_2 (t_{M2} - t_{M1}), \text{ Дж/кг вл.} \quad (17)$$

Тогда уравнение (16) примет вид:

$$q = G_{AG}^{уд} (H_2 - H_0) - [(c_{Ж} \cdot t_{M1} + q_D) - (q_{НАГР} + q_{ОКР})] \quad (18)$$

5.2. Охлаждение материала

Количество теплоты, отдаваемой материалом (см. рис. 3):

$$Q_3 = m_3 \cdot c_3 (t_{M2} - t_{M3}) \quad (19)$$

c_3 – теплоемкость материала после камеры охлаждения;

t_{M3} – температура материала после камеры охлаждения.

Потери теплоты в окружающую среду через поверхность стенок охладительной камеры определяют по формуле:

$$Q_{ОКР}^{охл} = 3,6 \cdot F_{ОХЛ} k_{ОХЛ} (t_{CP} - t_{П}) \quad (20)$$

где $F_{ОХЛ}$ — площадь стенок охладительной камеры, m^2 ;

$k_{ОХЛ}$ — коэффициент теплопередачи через стенки камеры, $Вт/(m^2 \cdot K)$;

$t_{П}$ — температура в помещении, где находится сушильная установка, $^{\circ}C$;

$t_{CP} = (t_{M2} + t_{M3})/2$ — средняя температура охлаждаемого материала, $^{\circ}C$.

Следовательно, уравнение теплового баланса для охладительной камеры имеет вид:

$$G_{ОХЛ} \cdot H_0 + c_{Ж} \cdot t_{M2} \cdot m_{уд} + m_3 \cdot c_3 (t_{M2} - t_{M3}) = G_{ОХЛ} \cdot H_3 + Q_{ОКР}^{охл} \quad (21)$$

где $G_{ОХЛ}$ – расход охлаждающего воздуха, $кг/ч$;

H_3 – энтальпия отработавшего воздуха после камеры охлаждения;

Запишем уравнение теплового баланса для охладительной камеры для 1 кг испаренной влаги:

$$G_{ОХЛ}^{уд} \cdot H_0 + c_{ж} \cdot t_{M2} + \frac{m_3}{m_{уд}^{ОХЛ}} \cdot c_3(t_{M2} - t_{M3}) = G_{ОХЛ}^{уд} \cdot H_3 + q_{ОКР}^{ОХЛ} \quad (22)$$

$G_{ОХЛ}^{уд}$ - удельный расход охлаждающего воздуха, (кг/ч)/(кг вл).

$m_{уд}^{ОХЛ}$ - масса удаляемой влаги при охлаждении материала;

$q_{ОКР}^{ОХЛ}$ - удельная отдача теплоты через стенки охлаждающей камеры, Дж/кг вл.;

Удельная теплота, забираемая охлаждающим воздухом, определяется:

$$q_{ОХЛ}^{ВОЗ} = \frac{m_3}{m_{уд}^{ОХЛ}} \cdot c_3(t_{M2} - t_{M3}), \text{ Дж/кг вл.} \quad (23)$$

Тогда удельный расход охлаждающего воздуха будет определяться:

$$G_{ОХЛ}^{уд} = \frac{c_{ж} \cdot t_{M2} + q_{ОХЛ}^{ВОЗ} + q_{ОКР}^{ОХЛ}}{H_3 - H_0}, \text{ кг/ч)/(кг вл)} \quad (24)$$