

СУШКА

Сушка – процесс удаления влаги из твёрдых влажных материалов путём подвода тепловой энергии.

Удаление влаги из жидких и газообразных материалов к процессу сушки не относится.

Механическое удаление влаги путём фильтрования, центрифугирования, прессования и т.п. к процессу сушки не относится.

Различают:

1. естественную сушку – на открытом воздухе
2. искусственную сушку – в промышленных условиях.
3. Естественная сушка экономична, качество продукции может быть очень высоким (древесина, кожи, фрукты, виноград и др.), однако громоздка и длительна.

Методы искусственной сушки:

1. Конвективная – сушка воздухом, дымовыми или топочными газами, азотом, аргоном и др.
2. Радиационно-конвективная – сушка инфракрасными лучами в сочетании с конвективной сушкой.
3. Контактная – сушка при контакте с нагретой твёрдой поверхностью.
4. Сушка в электромагнитном поле – сушка диэлектриков токами высокой частоты (ТВЧ) и других материалов в переменном магнитном поле.
5. Сублимационная – сушка в глубоком вакууме, когда влага в материале находится в замороженном состоянии и удаляется возгонкой (сублимацией).

Типы влажных материалов (по П.А. Ребиндеру):

1. Типичные коллоидные тела (эластичные гели) – желатин, агар-агар, мучное тесто и др. При удалении жидкости они значительно изменяют свои размеры.
2. Капиллярнопористые тела (хрупкие гели) – кварцевый песок, древесный уголь, керамические материалы и др. При удалении жидкости эти тела мало сжимаются, становятся хрупкими и могут быть превращены в порошок.
3. Капиллярнопористые коллоидные тела – торф, древесина, картон, ткани, зерно, кожа, глина и др. Обладают свойствами первых двух типов.

Формы связи влаги с материалом

Химическая связь

1. Ионная, $Ca(OH)_2$
2. Гидратная, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$

Физико-химическая связь

3. Адсорбционная
4. Осмотическая
5. Иммобилизационная (захват влаги набухающим коллоидным телом)

Физико-механическая связь

6. В микрокапиллярах, $r < 0.1$ мкм
7. В макрокапиллярах, $10 > r > 0.1$ мкм
8. Смачивания.

Сушка – удаление влаги типа 3,6,7,8 путём подвода тепловой энергии. Сушка – физический процесс удаления влаги, не меняющий существенно структуру материала.

Параметры влажного материала.

1. Относительная влажность (или просто влажность).

Это – количество влаги, приходящейся на 1 кг влажного материала.

Обозначим:

m – масса влажного материала,

m_0 - масса абсолютно сухого материала,

$m_{\text{ж}}$ - масса жидкости в материале.

Очевидно, $m = m_0 + m_{\text{ж}}$

$$\text{Относительная влажность } W = \frac{m_{\text{ж}}}{m} \cdot 100 = \frac{m_{\text{ж}}}{m_0 + m_{\text{ж}}} \cdot 100\% \quad (141)$$

Задача. Получено 100 кг ягод влажности 99%. После некоторого периода хранения влажность ягод составила 98%. Сколько стало ягод?

а) До хранения $99 = \frac{m_{\text{ж}}}{100} \cdot 100$; $m_{\text{ж}} = 99$ кг; $m_0 = 100 - 99 = 1$ кг.

б) После хранения $98 = \frac{m_{\text{ж}}}{1 + m_{\text{ж}}} \cdot 100$; $98 + 98 m_{\text{ж}} = 100 m_{\text{ж}}$; $m_{\text{ж}} = 49$ кг.

$$m = m_0 + m_{\text{ж}} = 1 + 49 = 50 \text{ кг.}$$

Ответ: ягод стало 50 кг.

2. Влагосодержание.

Количество влаги, приходящееся на 1 кг абсолютно сухого материала

$$U = \frac{m_{\text{ж}}}{m_0} \cdot 100\% \quad (142)$$

Если влажность материала не может быть больше 100%, то влагосодержание материала может быть значительно больше 100%.

Конвективная сушка.

Параметры влажного воздуха.

1. Абсолютная влажность.

Массовое количество пара в 1 м³ воздуха – $\rho_n \left[\frac{\text{кг пара}}{\text{м}^3 \text{ воздуха}} \right]$

2. Относительная влажность.

Отношение массового количества пара в паровоздушной смеси к максимально возможному количеству при той же температуре

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_H} \cdot 100\% \quad (T = \text{const}) \quad (143)$$

Уравнение Менделеева – Клапейрона:

$$p \cdot V = \frac{G}{M} \cdot RT, \quad \text{где } \rho = \frac{G}{V}$$

$$\text{Для пара } P_n \cdot \frac{1}{\rho_n} = \frac{RT}{M_n}, \quad \text{и в состоянии насыщения } P_H \cdot \frac{1}{\rho_H} = \frac{RT}{M_n}$$

$$\text{Для } T = \text{const}: \quad P_n \cdot \frac{1}{\rho_n} = P_H \cdot \frac{1}{\rho_H}$$

$$\text{Откуда: } \varphi = \frac{\rho_n}{\rho_H} = \frac{P_n}{P_H}; \quad P_n = \varphi \cdot P_H$$

Для определения относительной влажности воздуха используется прибор "психрометр", состоящий из двух термометров: мокрого и сухого. Разность показаний термометров градуируется в значения φ .

3. Влажосодержание.

Количество пара в смеси, приходящееся на 1 кг сухого воздуха.

Пусть мы имеем 1 м³ воздуха. Его масса - ρ_B [кг/м³].

В этом кубометре содержится: ρ_n - кг пара, ρ_r - кг сухого воздуха.

Очевидно: $\rho_B = \rho_n + \rho_r$.

$$\text{Влажосодержание: } d(x) = \frac{\rho_n}{\rho_r} \left[\frac{\text{кг пара}}{\text{кг сухого воздуха}} \right] \quad (144)$$

4. Энтальпия воздуха.

Складывается из двух величин: энтальпия сухого воздуха и пара.

$$J = C_B \cdot t + d(r_n + C_n \cdot t) \quad \text{кДж/кг} \quad (145)$$

5. Точка росы.

Температура, при которой газ данного состояния, охлаждаясь при постоянном влажосодержании ($d=\text{const}$), становится насыщенным ($\varphi=1.0$), называется точкой росы t_p .

6. Температура мокрого термометра.

Температура, при которой газ при взаимодействии с жидкостью, охлаждаясь при постоянной энтальпии ($J=\text{const}$), становится насыщенным ($\varphi=1.0$), называется температурой мокрого термометра t_M .

Диаграмма состояния воздуха.

Диаграмма составлена отечественным учёным Рамзиным (1918 год) и представлена на рис.169.

Диаграмма представлена для среднего атмосферного давления $P=745$ мм рт. ст. и по сути является изобарой равновесия системы пар - сухой воздух.

Оси координат диаграммы J-d развёрнуты под углом 135° . Внизу располагается наклонная линия для определения парциального давления водяного пара P_n . Парциальное давление сухого воздуха $P_r = P - P_n$

Выше на диаграмме проведена кривая насыщения ($\varphi=100\%$). Процесс сушки на диаграмме можно представить только выше этой кривой. Для произвольной точки "А" на диаграмме Рамзина можно определить следующие параметры воздуха: $J, d, t, \varphi, t_M, t_P, P_n, P_r$.

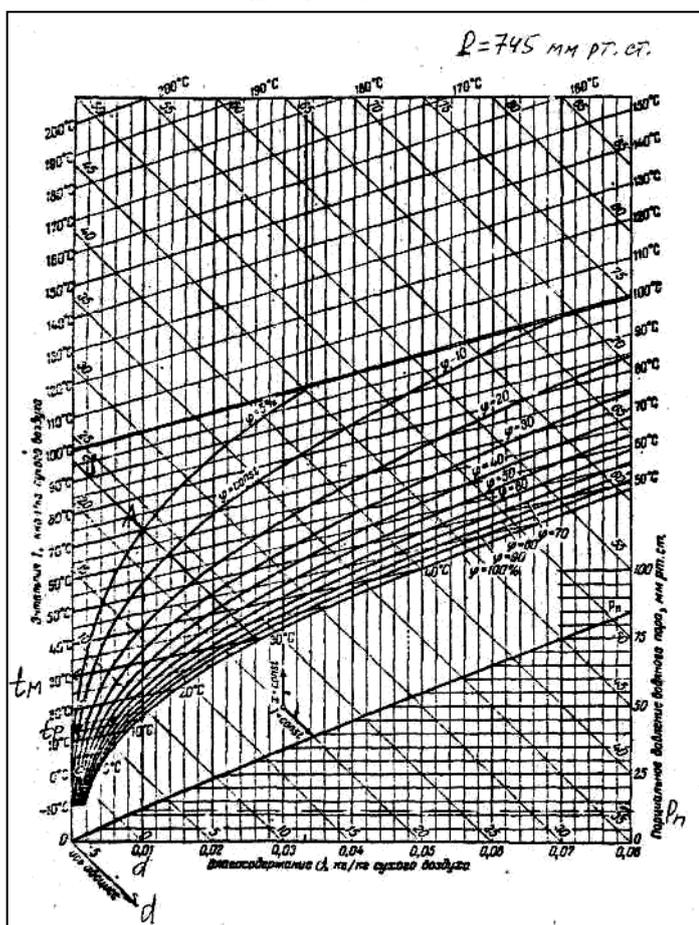


Рис.169. Диаграмма J-d состояния влажного воздуха.

Статика сушки.

В процессе конвективной сушки, например, воздухом влажный материал взаимодействует, контактирует с паровоздушной смесью, парциальное давление водяного пара в которой составляет P_n . Влага может уходить из материала в виде пара, если парциальное давление пара в тонком пограничном слое над поверхностью материала или, как говорят, в материале P_M будет больше P_n .

Движущая сила процесса сушки (Дальтон, 1803 г.)

$$\Delta P = P_M - P_n \quad (146)$$

В состоянии равновесия $\Delta P=0$. Влагосодержание материала, соответствующее условию равновесия, называется равновесным влагосодержанием (U_p).

Проведём опыт. В камеру сушильного шкафа при определённой температуре ($t = \text{const}$) поместим абсолютно сухое вещество на длительное время. При определённом φ воздуха в шкафу влагосодержание материала достигнет U_p . Изменяя φ , можно получить кривую (изотерму) сорбции влаги материалом. При уменьшении φ - кривую десорбции.

На рис.170 представлена кривая сорбции – десорбции влажного материала (изотерма равновесия).

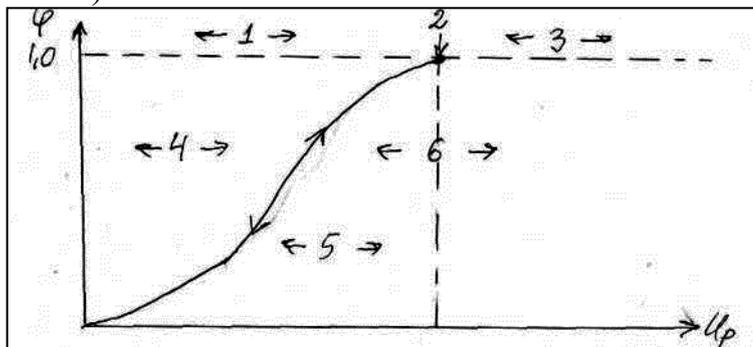


Рис.170. Изотерма равновесия влажного материала с воздухом.

1-область гигроскопического материала, 2-гигроскопическая точка, 3-область влажного материала, 4-область сорбции, 5-область десорбции, 6-область сушки.

Различают кривые равновесия:

1. гигроскопического
2. негигроскопического материала.

Изотермы представлены на рис.171.

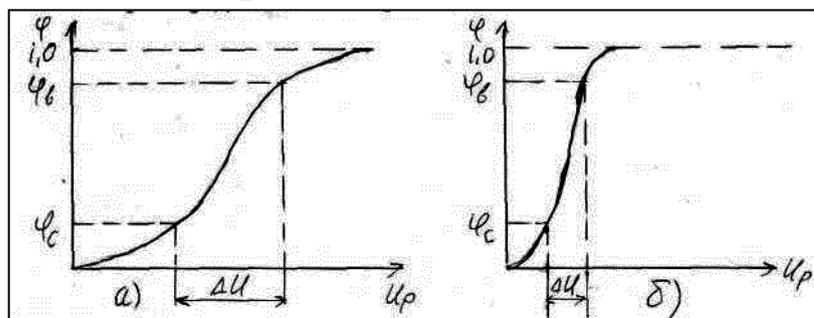


Рис.171. Изотермы равновесия.

а) гигроскопического, б) негигроскопического материала.

φ_c, φ_b - относительная влажность воздуха в сушилке и в атмосфере.

После сушилки при контакте с атмосферным воздухом гигроскопичный материал значительно увеличивает влагосодержание на ΔU (рис.171 а) за счёт адсорбции влаги из воздуха. Поэтому гигроскопический материал после сушки должен храниться в условиях, не допускающих контакта с атмосферным воздухом (эксикация, обёртка и др.).

Материальный баланс.

В качестве учебной обычно принимают туннельную сушилку, т.к. она имеет транспортные средства в виде вагонеток (сушка кирпича, древесины и др.). Схема установки представлена на рис.172.

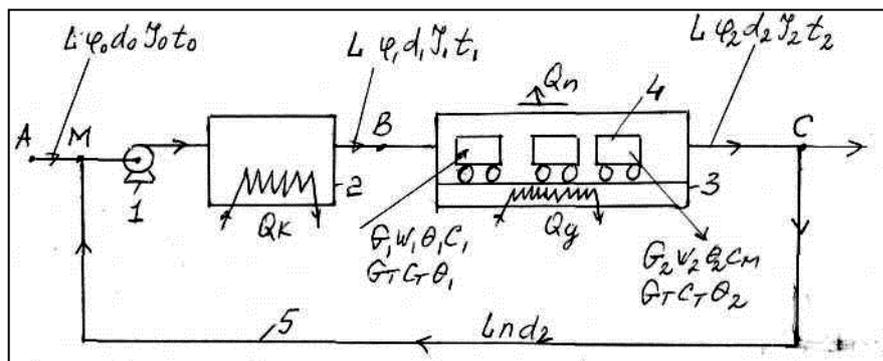


Рис.172. Схема туннельной сушилки.

1-вентилятор, 2-калорифер, 3-сушилка, 4-вагонетки, 5-линия рецкла отработанного воздуха.

Обозначения:

$L\varphi_0 d_0 J_0 t_0$
 $L\varphi_1 d_1 J_1 t_1$
 $L\varphi_2 d_2 J_2 t_2$

- расход и параметры воздуха до калорифера, после него и после сушилки.

$G_1 W_1 \theta_1 C_1$
 $G_2 W_2 \theta_2 C_M$

- расход, влажность, температура и теплоёмкость материала до и после сушилки.

$G_T C_T \theta_1$
 $G_T C_T \theta_2$

- количество, теплоёмкость и температура транспортных средств до и после сушилки.

Q_K, Q_g - тепло, подводимое в калорифере и в сушильной камере.

Q_{Π} - потери тепла в окружающую среду.

1. Материальный баланс по абсолютно сухому материалу.

$$G_{\text{сух}} = G_1 - G_1 \cdot \frac{W_1}{100} = G_2 - G_2 \cdot \frac{W_2}{100} \quad \text{или} \quad G_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100} = G_2 \cdot \frac{100 - W_2}{100}$$

$$\text{Расход влажного материала} \quad G_1 = G_2 \cdot \frac{100 - W_2}{100 - W_1} \quad (147)$$

$$\text{Выход сухого материала} \quad G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2} \quad (148)$$

2. Материальный баланс по всему продукту.

$$G_1 = G_2 + W$$

Откуда количество испарённой влаги $W = G_1 - G_2$ (149)

Или с учётом (147, 148)

$$W = G_1 - G_1 \cdot \frac{100 - W_1}{100 - W_2} = G_1 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}$$

$$W = G_2 \cdot \frac{100 - W_2}{100 - W_1} - G_2 = G_2 \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_1}$$

3. Материальный баланс по влаге воздуха и материала.

$$L \cdot d_1 + G_1 \cdot \frac{W_1}{100} = L \cdot d_2 + G_2 \cdot \frac{W_2}{100}$$

В калорифере $d_1 = d_0$, тогда $G_1 \cdot \frac{W_1}{100} - G_2 \cdot \frac{W_2}{100} = W = L \cdot (d_2 - d_0)$

Расход воздуха на сушилку $L = \frac{W}{d_2 - d_0}$ (150)

Удельный расход воздуха (на 1 кг испарённой влаги) $l = \frac{L}{W} = \frac{1}{d_2 - d_0}$ (151)

Тепловой баланс.

Теоретическая сушилка.

Теоретической называется такая сушилка, в которой отсутствуют:

1. $Q_{\Pi} = 0$ - потери тепла в окружающую среду.
2. $Q_{\text{М}} = 0$ - потери тепла с высушенным материалом.
3. $Q_{\text{Т}} = 0$ - потери тепла с транспортными средствами.
4. $Q_{\text{г}} = 0$ - нет подвода тепла в сушильной камере.

1. Тепловой баланс системы "калорифер + сушилка".

$$L \cdot J_0 + Q_K = L \cdot J_2$$

Откуда расход тепла на калорифер $Q_K = L \cdot (J_2 - J_0)$

Удельный расход тепла на калорифер

$$q_K = \frac{Q_K}{W} = \frac{L}{W} \cdot (J_2 - J_0) = l \cdot (J_2 - J_0) \quad (152)$$

2. Тепловой баланс калорифера.

$$L \cdot J_0 + Q_K = L \cdot J_1$$

Откуда расход тепла на калорифер $Q_K = L \cdot (J_1 - J_0)$

Удельный расход тепла $q_K = \frac{Q_K}{W} = l \cdot (J_1 - J_0)$ (153)

С учётом (152) $l \cdot (J_2 - J_0) = l \cdot (J_1 - J_0)$

Откуда $J_1 = J_2 = \text{const}$

В теоретической сушилке процесс сушки протекает при постоянной энтальпии воздуха. Постоянство энтальпии воздуха объясняется тем, что испарённая влага вносит в воздух ровно столько тепла, сколько было затрачено на её испарение при охлаждении воздуха.

Построение теоретической сушки в энтальпийной диаграмме.

1. Известны точки: А ($\varphi_0; t_0$) и С ($\varphi_2; t_2$), которые наносятся на диаграмму.
2. Из точки А следуем вверх по линии $d = \text{const}$.
3. Из точки С следуем под углом 45° вверх по линии $J = \text{const}$.
4. Пересечение этих линий обозначим точкой В.

Схема построения представлена на рис.173.

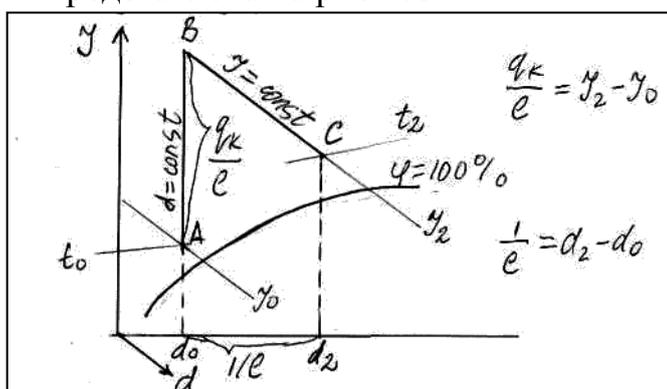


Рис.173. Построение теоретической сушки на энтальпийной диаграмме.

На рис.173 ABC – теоретическая сушка, где АВ – нагрев воздуха в калорифере, ВС – изменение параметров воздуха в сушилке.

Действительная сушилка.

Тепловой баланс

$$L \cdot J_0 + Q_K + Q_g + (G_2 \cdot C_M + G_1 \cdot C_1 \cdot \theta_1 + W \cdot c') + G_T \cdot C_T \cdot \theta_1 = \\ = L \cdot J_2 + G_2 \cdot C_M \cdot \theta_2 + G_T \cdot C_T \cdot \theta_2 + Q_{\Pi}$$

$$\left(c' = 4.19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right)$$

Расход тепла на калорифер и дополнительно в сушильной камере

$$Q = Q_K + Q_g = L \cdot (J_2 - J_0) + G_2 \cdot C_M \cdot (\theta_2 - \theta_1) + G_T \cdot C_T \cdot (\theta_2 - \theta_1) + Q_{\Pi} - W \cdot c' \cdot \theta_1$$

Делим обе части уравнения на W, обозначив:

$$q_M = \frac{G_2 \cdot C_M \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W}; \quad q_T = \frac{G_T \cdot C_T \cdot (\theta_2 - \theta_1)}{W}; \quad q_{\Pi} = \frac{Q_{\Pi}}{W}.$$

Тогда $q = q_K + q_g = l \cdot (J_2 - J_0) + q_M + q_T + q_{\Pi} - c' \cdot \theta_1$

Обозначим $\sum q_{\Pi} = q_M + q_T + q_{\Pi}$ и с учётом (153):

$$l \cdot (J_1 - J_0) + q_g = l \cdot (J_2 - J_0) + \sum q_{\Pi} - c' \cdot \theta_1$$

$$\text{или } l \cdot (J_2 - J_1) = q_g + c' \cdot \theta_1 - \sum q_{\text{п}}$$

Обозначим $\Delta = q_g + c' \cdot \theta_1 - \sum q_{\text{п}}$

(величина "дельта": дополнительное тепло, плюс тепло, вносимое влагой, минус потери)

$$\text{Тогда } l \cdot (J_2 - J_1) = \Delta \quad (154)$$

Возможные значения Δ .

1. $\Delta < 0$: в этом случае $q_g = 0$; $\sum q_{\text{п}} > c' \cdot \theta_1$; $J_1 > J_2$.

Это характерно для основного сушильного варианта.

2. $\Delta = 0$: тогда $\sum q_{\text{п}} = q_g + c' \cdot \theta_1$; $J_1 = J_2$.

Потери тепла в точности компенсируются дополнительным вводом тепла в сушильную камеру. Внешне сушилка работает как теоретическая.

3. $\Delta > 0$: это возможно, когда $(q_g + c' \cdot \theta_1) > \sum q_{\text{п}}$; $J_2 > J_1$.

Для этого случая дополнительное тепло с избытком покрывает все тепловые потери, что характерно для варианта сушки с подводом тепла в сушильной камере.

Варианты конвективной сушки с представлением на энтальпийной диаграмме.

1. Основной сушильный вариант (рис.174).

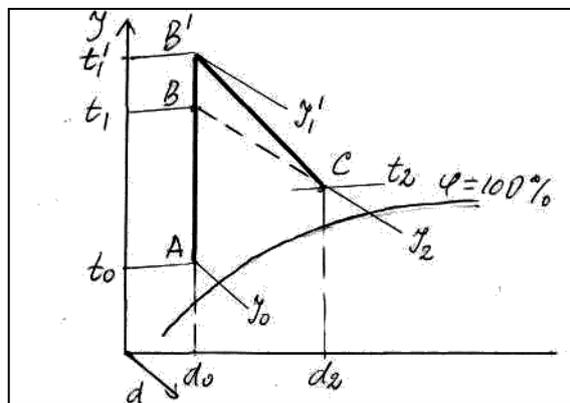


Рис.174. Основной сушильный вариант.

Дано: $q_g = 0$; т т $(\varphi_0; t_0)$ [т.С $(\varphi_2; t_2)$].

1. Строим ABC – теоретическая сушка.

2. Рассчитываем $\Delta = c' \cdot \theta_1 - \sum q_{\text{п}}$; $\Delta < 0$

3. Приравниваем $l \cdot (J_2 - J_1') = \Delta$ или $l \cdot (J_1' - J_2) = |\Delta|$

$$\text{Откуда } J_1' = J_2 + \frac{|\Delta|}{l} = J_2 + |\Delta| \cdot (d_2 - d_0)$$

На линии $d=\text{const}$ отмечаем точку B' со значением J_1' .
 $AB'C$ – действительная сушка по основному варианту.

$$\text{Расход тепла на калорифер } Q_K' = L \cdot (J_1' - J_0)$$

$$\text{Расход воздуха на сушку } L = \frac{W}{d_2 - d_0}$$

Недостаток метода состоит в том, что температура t_1' имеет высокое значение, что нежелательно для некоторых продуктов (сахарный песок, зерно и др.). Поэтому остальные методы сушки направлены на создание "мягких" условий сушки.

2. Вариант с подводом тепла в сушильной камере (рис.175).

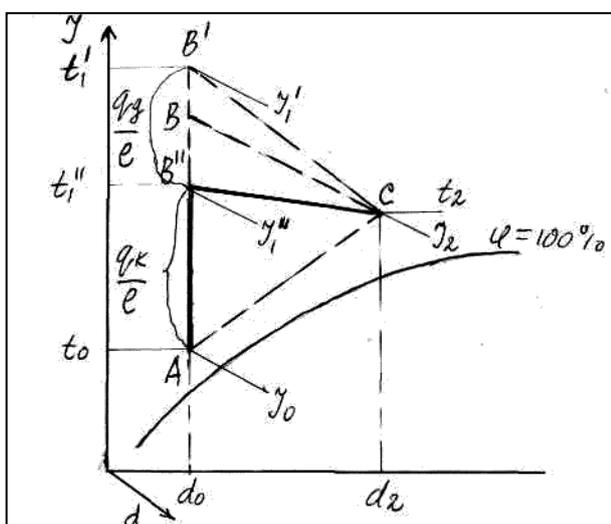


Рис.175. Вариант сушки с подводом тепла в сушильной камере.

Дано: точки A и C, условие, что $t_1'' < t_1'$.

1. Строим ABC – теоретическая сушка.
2. Строим $AB'C$ – основной сушильный вариант.
3. На линии $d=\text{const}$ отмечаем точку B'' с температурой t_1'' . Точку B'' соединяем с точкой C. $AB''C$ - действительная сушка.

$$\text{Расход воздуха на сушку остаётся тем же } L = \frac{W}{d_2 - d_0}$$

$$\text{Расход тепла на калорифер } Q_K'' = L \cdot (J_1'' - J_0)$$

$$\text{Расход тепла в сушильной камере } Q_g'' = L \cdot (J_1' - J_1'')$$

Крайний случай сушки – линия AC, когда всё тепло подводится только к сушильной камере (калорифер отсутствует).

$$q_K = 0; \quad Q_g = L \cdot (J_1' - J_0)$$

3. Вариант сушки с рециркуляцией воздуха (рис.176).

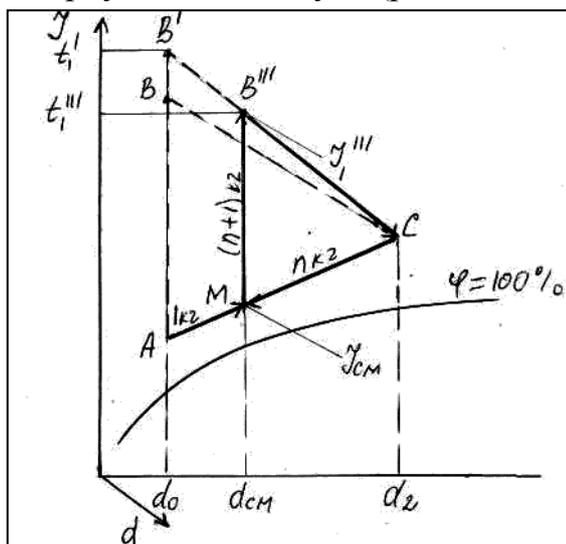


Рис.176. Вариант сушки с рециркуляцией части отработанного воздуха.

Дано: точки A и C, условие, что $t_1''' < t_1'$.

1. Строим ABC – теоретическая сушка.
2. Строим AB'C – основной сушильный вариант.
3. На линии B'C отмечаем точку B''' с температурой t_1''' . Точку A соединяем с точкой C. Проводим вертикаль B'''M.

AMB'''C - действительная сушка.

Расход свежего воздуха тот же $L = \frac{W}{d_2 - d_0}$

Доля отработанного воздуха $n = \frac{d_{CM} - d_0}{d_2 - d_{CM}}$

Количество циркулирующего воздуха $L_{ЦИРК} = L \cdot (n + 1)$

Расход тепла на калорифер $Q_K''' = L_{ЦИРК} \cdot (J_1''' - J_{CM})$

В этом варианте конвективной сушки помимо снижения температуры увеличивается влагосодержание воздуха на входе в сушилку, что создаёт ещё более благоприятные условия сушки для некоторых материалов (ткани и др.).