

# Сушка

## Задача 1.

В теоретическую сушилку поступает  $G_1=1000$  кг/ч (0,276 кг/с) материала с абсолютной влажностью  $\omega_1=50\%$  масс. Конечная влажность  $\omega_2=6\%$  масс. Воздух поступает в калорифер с  $t_0=20^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_0=70\%$ . Температура отработанного воздуха на выходе из сушильной камеры  $t_2=46^\circ\text{C}$ . Относительная влажность отработанного воздуха составляет  $\varphi_2=60\%$ .

Определить:

- объемный расход влажного воздуха на выходе из сушилки;
- затраты тепловой энергии.

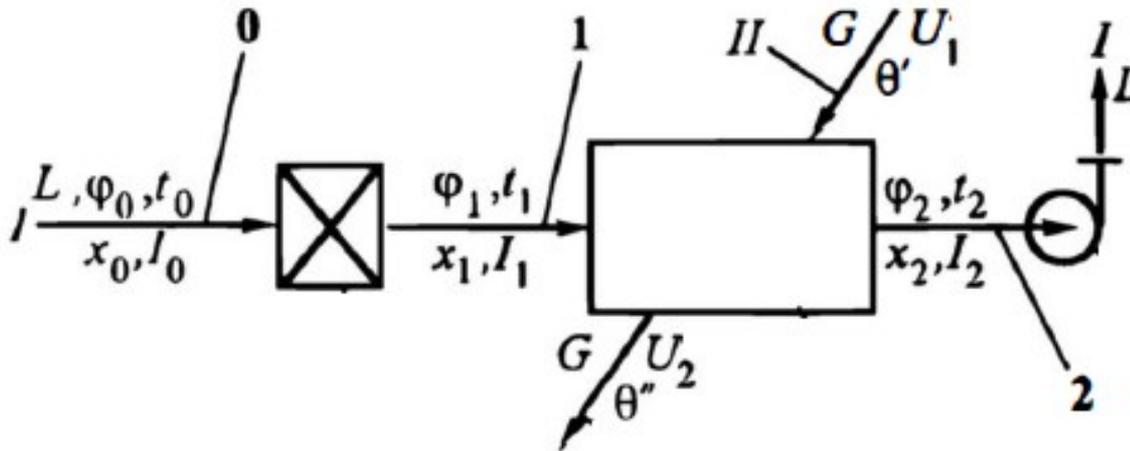


Схема сушильной  
установки.

Определим количество (потока) удалённой влаги.

Для этого по известной абсолютной влажности материала, найдём относительную его влажность:

$$U_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0,5}{1 - 0,5} = 1 \text{ кгВл/кгСМ}$$

$$U_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0,06}{1 - 0,06} = 0,0638 \text{ кгВл/кгСМ}$$

Массовый поток сухой части материала  $G_2$  по потоку влажного материала  $G_1$ :

$$G_2 = \frac{G_1}{1 + U_1} = \frac{0,276}{1 + 1} = 0,138 \text{ кгСм/с}.$$

Количество удаляемой из материала влаги:

$$W = G_2 (U_1 - U_2) = 0,138(1 - 0,0638) = 0,129 \text{ кг/с}.$$

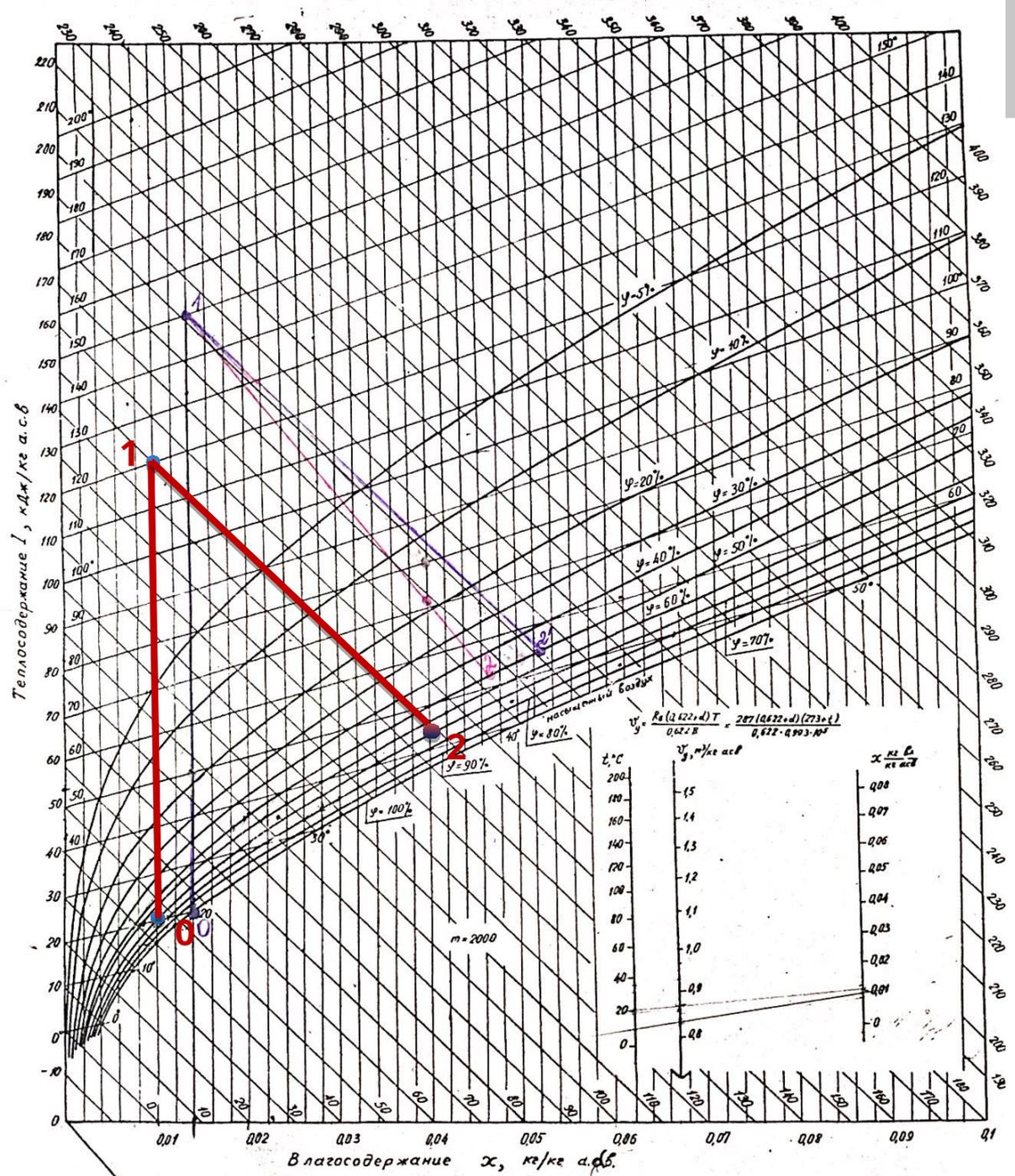
Расчёт удельного расхода теплоты в калорифере для идеальной сушилки  $q_k^{\text{ид}}$ .

Построим процесс **идеальной** сушки в  $I$ -х диаграмме. Известные параметры воздуха выделены в таблице красным цветом. Линия 1-2 это процесс для идеальной сушилки, он проходит по линии  $I = \text{const}$  до заданной относительной влажности воздуха. Параметры воздуха в рабочих точках заносим в таблицу:

## Сводная таблица параметров воздуха

	<i><math>I</math>, кДж/кг</i>	<i><math>x</math>, кг/кг</i>	<i><math>\varphi</math>, %</i>	<i><math>t</math>, °C</i>
<b>0</b>	<b>45</b>	<b>0,01</b>	<b>70</b>	<b>20</b>
<b>1</b>	<b>150</b>	<b>0,01</b>	<b>&lt;5</b>	<b>120</b>
<b>2</b>	<b>150</b>	<b>0,04</b>	<b>60</b>	<b>46</b>

# Изображение процесса идеальной сушки в I-x диаграмме



Расчет материальных и тепловых потоков в теоретической сушилке.

Массовый расход воздуха:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} = \frac{0,129}{0,04 - 0,01} = 4,3 \frac{\text{кг а.с.в.}}{\text{с}}$$

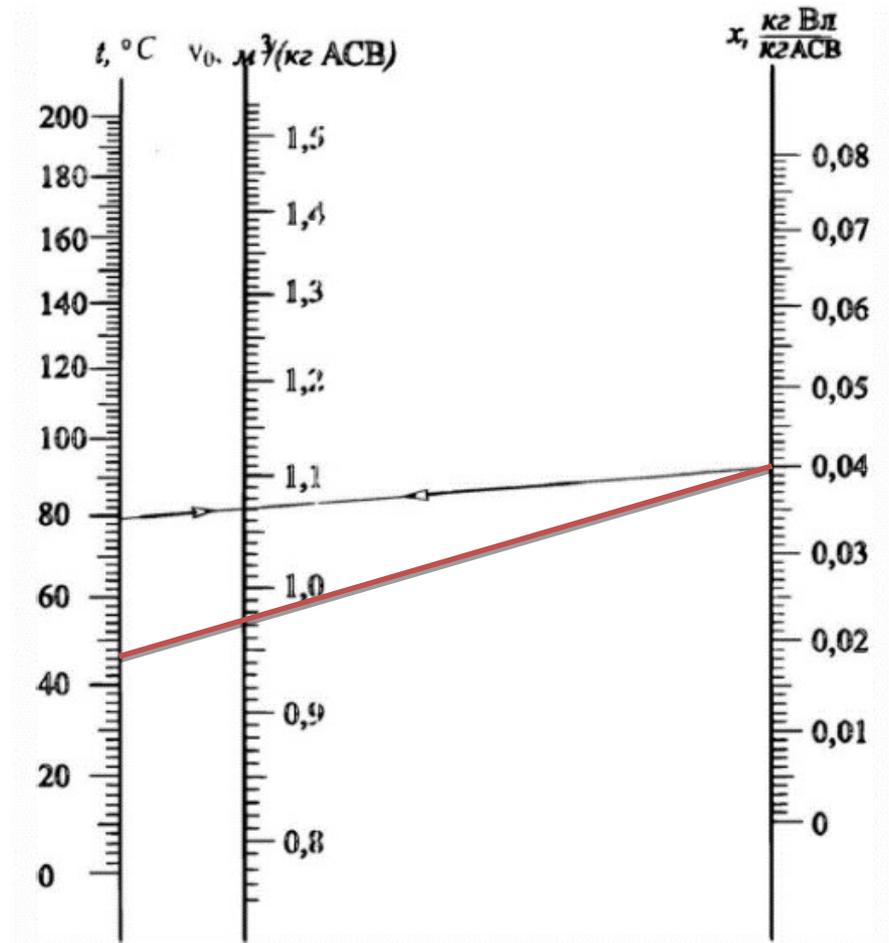
Объемный расход воздуха на выходе из сушилки:

$$V = L \cdot v_0 = 4,3 \cdot 0,97 = 4,17 \text{ м}^3/\text{с} ,$$

где  $v_0$  - относительный (условный) удельный объем влажного воздуха находим по номограмме (по  $t_2=46$  °С и  $x_2=0,04$  кг Вл/кг а.с.в.):

$$v_0 = 0,97 [\text{м}^3 \text{ вл. возд./кг а.с.в.}]$$

## Номограмма



Расход теплоты в калорифере  
идеальной сушилки:

$$Q_K = W \cdot l(I_1 - I_0) = \frac{W}{x_2 - x_0} (I_1 - I_0) = \frac{0,129}{0,04 - 0,01} (150 - 45) = 451,5 \text{ кВт.}$$

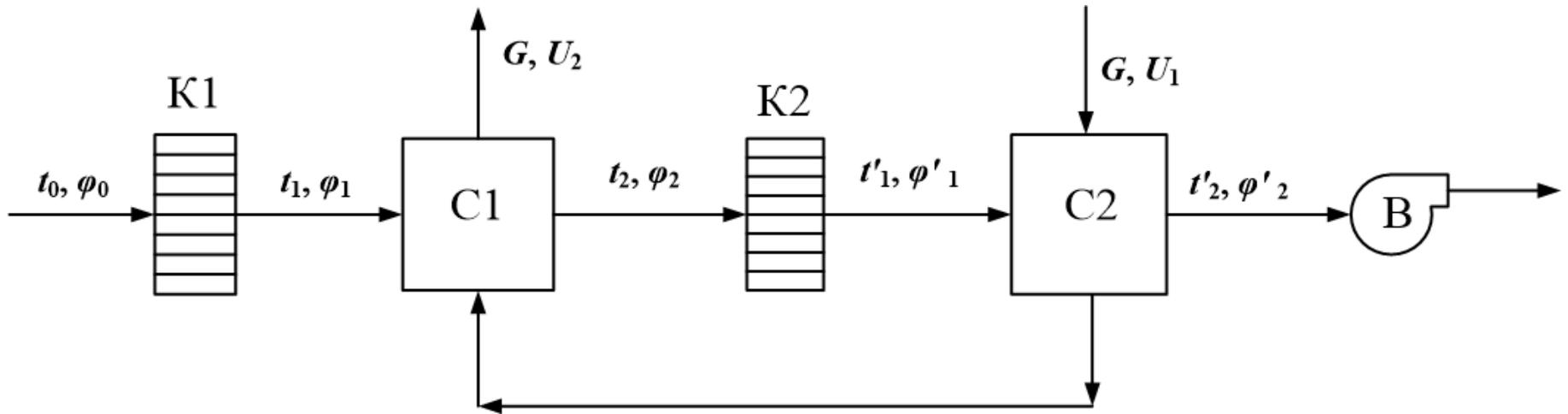
## Задача 1 (вариант 2).

В теоретическую сушилку с промежуточным подогревом воздуха поступает  $G_1=1000$  кг/ч ( $0,276$  кг/с) материала с абсолютной влажностью  $\omega_1=50\%$  масс. Конечная влажность  $\omega_2=6\%$  масс. Воздух поступает в калорифер с  $t_0=20^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_0=70\%$ . Температура отработанного воздуха на выходе из сушильной камеры  $t_2=46^\circ\text{C}$ . Относительная влажность отработанного воздуха составляет  $\varphi_2=60\%$ . Нагрев в зонах сушки ведут при температуре  $t_1 = t_1' = 85^\circ\text{C}$ . Количество удаляемой влаги  $W_1 = W_2$ .

Определить:

- объемный расход влажного воздуха на выходе из сушилки;
- затраты тепловой энергии.

## Схема сушильной установки.



Определим количество (потока) удалённой влаги.

Для этого по известной абсолютной влажности материала, найдём относительную его влажность:

$$U_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0,5}{1 - 0,5} = 1 \text{ кгВл/кгСМ}$$

$$U_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0,06}{1 - 0,06} = 0,0638 \text{ кгВл/кгСМ}$$

Массовый поток сухой части материала  $G_2$  по потоку влажного материала  $G_1$ :

$$G_2 = \frac{G_1}{1 + U_1} = \frac{0,276}{1 + 1} = 0,138 \text{ кгСм/с}.$$

Количество удаляемой из материала влаги:

$$W = G_2 (U_1 - U_2) = 0,138(1 - 0,0638) = 0,129 \text{ кг/с}.$$

Количество удаляемой влаги в каждой зоне идеальной сушилки:

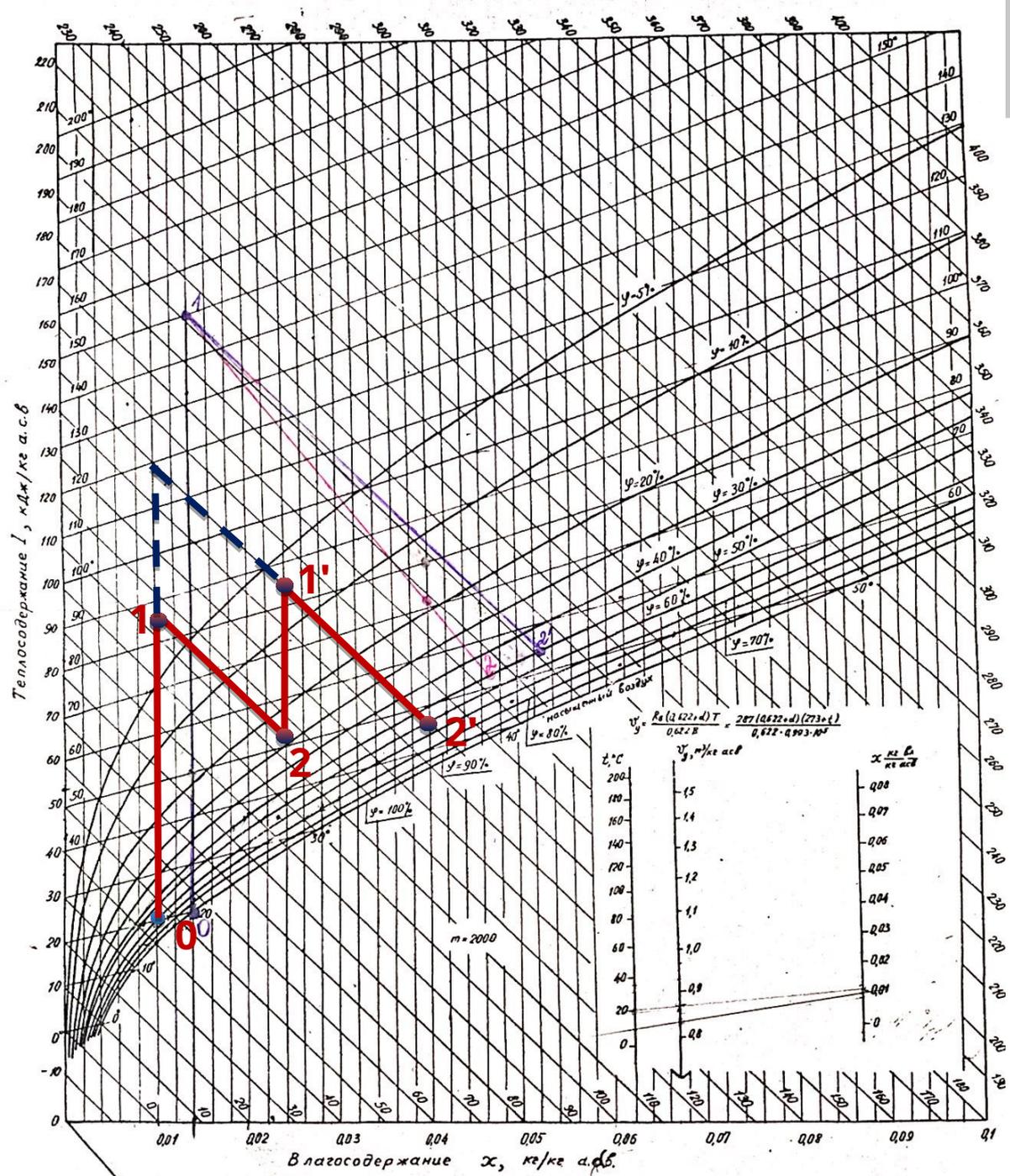
$$W_1 = W_2 = W/2 = 0,129/2 = 0,0645 \text{ кг/с}.$$

Построим процесс **идеальной** сушки в  $I$ -х диаграмме. Известные параметры воздуха выделены в таблице красным цветом. Линия 1-2 это процесс для идеальной сушилки, он проходит по линии  $I = const$  до заданной относительной влажности воздуха. Параметры воздуха в рабочих точках заносим в таблицу:

## Сводная таблица параметров воздуха

	<i>I, кДж/кг</i>	<i>x, кг/кг</i>	<i>φ, %</i>	<i>t, °C</i>
<b>0</b>	<b>45</b>	<b>0,01</b>	<b>70</b>	<b>20</b>
<b>1</b>	<b>115</b>	<b>0,01</b>	<b>&lt;5</b>	<b>85</b>
<b>2</b>	<b>115</b>	<b>0,024</b>	<b>28</b>	<b>52</b>
<b>1'</b>	<b>150</b>	<b>0,024</b>	<b>7</b>	<b>85</b>
<b>2'</b>	<b>150</b>	<b>0,04</b>	<b>60</b>	<b>46</b>

# Изображение процесса реальной сушки в $I$ - $x$ диаграмме



Расчет материальных и тепловых потоков в двухзональной сушилке.

Массовый расход воздуха:

$$L = \frac{W}{2} \left( \frac{1}{x_2 - x_0} + \frac{1}{x_2^* - x_2} \right) = 0,0645 \left( \frac{1}{0,024 - 0,01} + \frac{1}{0,04 - 0,024} \right) = 8,64 \frac{\text{кг а.с.в.}}{\text{с}}$$

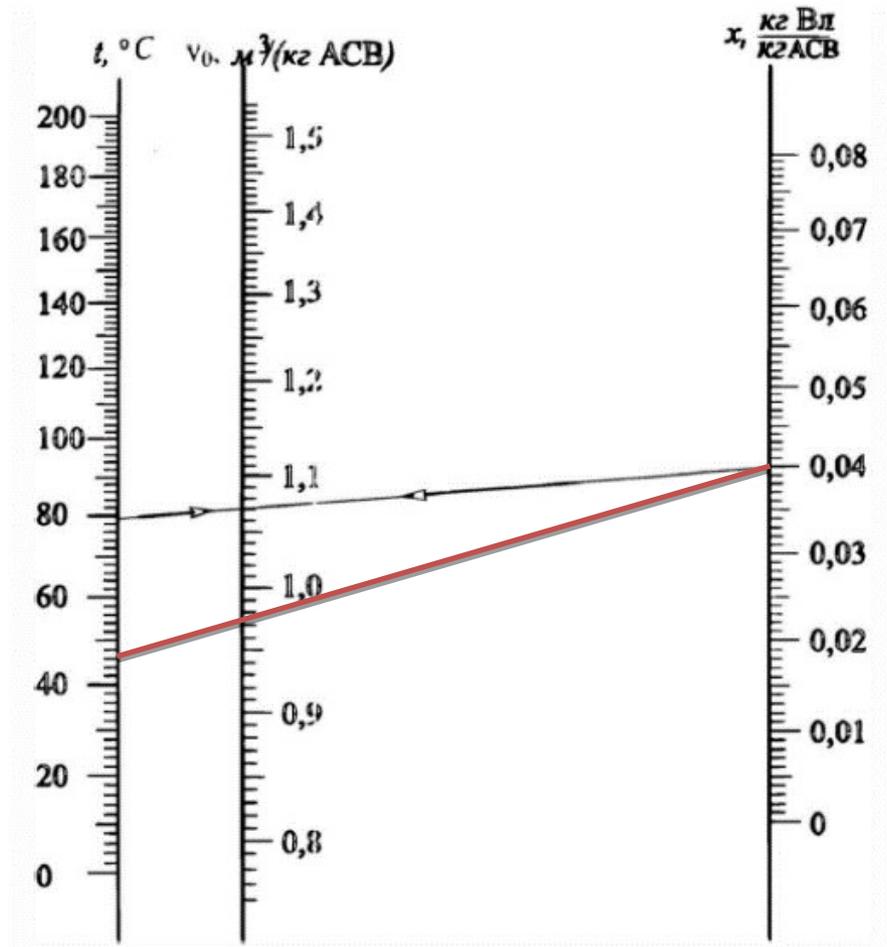
Объемный расход воздуха на выходе из сушилки:

$$V = L \cdot v_0 = 8,64 \cdot 0,97 = 8,38 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $v_0$  - относительный (условный) удельный объем влажного воздуха находим по номограмме (по  $t'_2 = 46 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $x'_2 = 0,04 \text{ кг Вл/кг а.с.в.}$ ):

$$v_0 = 0,97 [\text{м}^3 \text{ вл. возд./кг а.с.в.}]$$

## Номограмма



Расход теплоты в калориферах двухзональной сушилки:

$$Q_K = \left( \frac{W}{2} l_1 (I_1 - I_0) + \frac{W}{2} l_2 (I_1^* - I_2) \right) = \left( \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{x_2 - x_0} (I_1 - I_0) + \frac{W}{2} \cdot \frac{1}{x_2^* - x_2} (I_1^* - I_2) \right) =$$
$$= \left( 0,0645 \cdot \frac{1}{0,024 - 0,01} (115 - 45) + 0,0645 \cdot \frac{1}{0,04 - 0,024} (150 - 115) \right) = 463,6 \text{ кВт.}$$

## Задача 1 (вариант №3).

В теоретической сушилке с возвратом 80% отработанного воздуха высушивается  $G_1=1000$  кг/ч (0,276 кг/с) влажного материала от  $\omega_1=50\%$  до  $\omega_2=6\%$ , масс. (абсолютной влажности). Параметры исходного воздуха  $t_0=20$  °C,  $\varphi_0=70\%$ , параметры отработанного воздуха  $t_2=46$  °C,  $\varphi_2=60\%$ .

Определить:

- температуру воздуха на входе в сушилку  $t_1$ -?
- объемный расход влажного воздуха на выходе из сушилки  $V$  -?
- тепловую нагрузку калорифера  $Q_K$  -?

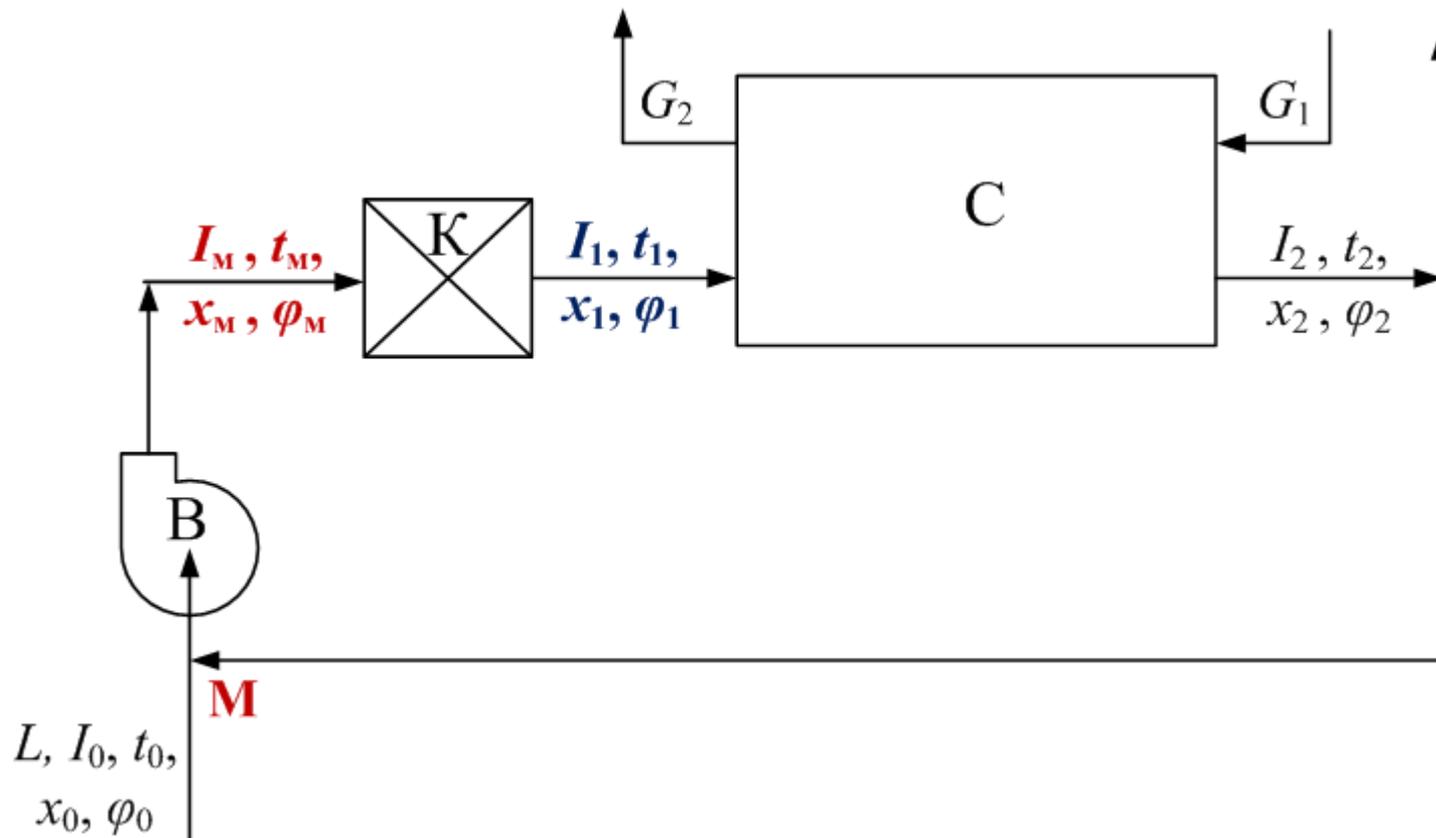


Рис. 1 Схема сушильной установки

Расчет количества (потока) удалённой влаги.

По известной абсолютной влажности материала, найдём относительную влажность материала:

$$U_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0,5}{1 - 0,5} = 1,00 \text{ кг Вл / кг СМ};$$

$$U_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0,06}{1 - 0,06} = 0,0638 \text{ кг Вл / кг СМ}.$$

Массовый поток сухой части материала  $G_2$  по потоку влажного материала  $G_1$ :

$$G_2 = \frac{G_1}{1 + U_1} = \frac{0,276}{1 + 1,00} = 0,138 \text{ кг СМ / с}.$$

Количество удаляемой из материала влаги:

$$W = G_2(U_1 - U_2) = 0,138(1 - 0,0638) = 0,1292 \text{ кг Вл/с}.$$

Построим линию смешения исходного и отработанного воздуха на  $I$ - $x$  диаграмме. Известные параметры воздуха выделены в таблице красным цветом. По условию задачи 80% отработанного воздуха смешивается с 20% исходного.

Для нахождения точки смешения определим влагосодержание в этой точке по формуле:

$$x_M = 0,2x_0 + 0,8x_2 = 0,2 \cdot 0,01 + 0,8 \cdot 0,04 = 0,034 \text{ кг/кг}.$$

Далее, находим эту точку смешения  $M_{см}$  по полученному значению  $x_M$  на линии смешения 0-2. Линия процесса идеальной сушки проходит по  $I=const$ . Проведём по линии идеальной сушки второй луч от точки 2. На пересечении этих двух лучей (по  $x=const$  и  $I=const$ ) получаем точку 1. Определяем в ней все параметры воздуха и заносим их в таблицу.

	$I, \text{кДж/кг}$	$x, \text{кг/кг}$	$\varphi, \%$	$t, \text{°C}$
<b>0</b>	45	0,01	<b>70</b>	<b>20</b>
$M_{см}$	129	0,034	60	40
<b>1</b>	150	0,034	25	60
<b>2</b>	150	0,04	<b>60</b>	<b>46</b>

Сводная таблица  
параметров воздуха

Удельный расход теплоты (на кг уд. Влага) в калорифере сушильной установки

$$q_K = l(I_1 - I_M) = \frac{1}{x_2 - x_M} (I_1 - I_M) =$$
$$\frac{1}{0,04 - 0,034} (150 - 129) = 3497 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$



Массовый расход воздуха в сушилке:

$$L_{\text{ц}} = \frac{W}{x_2 - x_M} = \frac{0,129}{0,04 - 0,034} = 21,5 \frac{\text{кг а.с.в.}}{\text{с}}$$

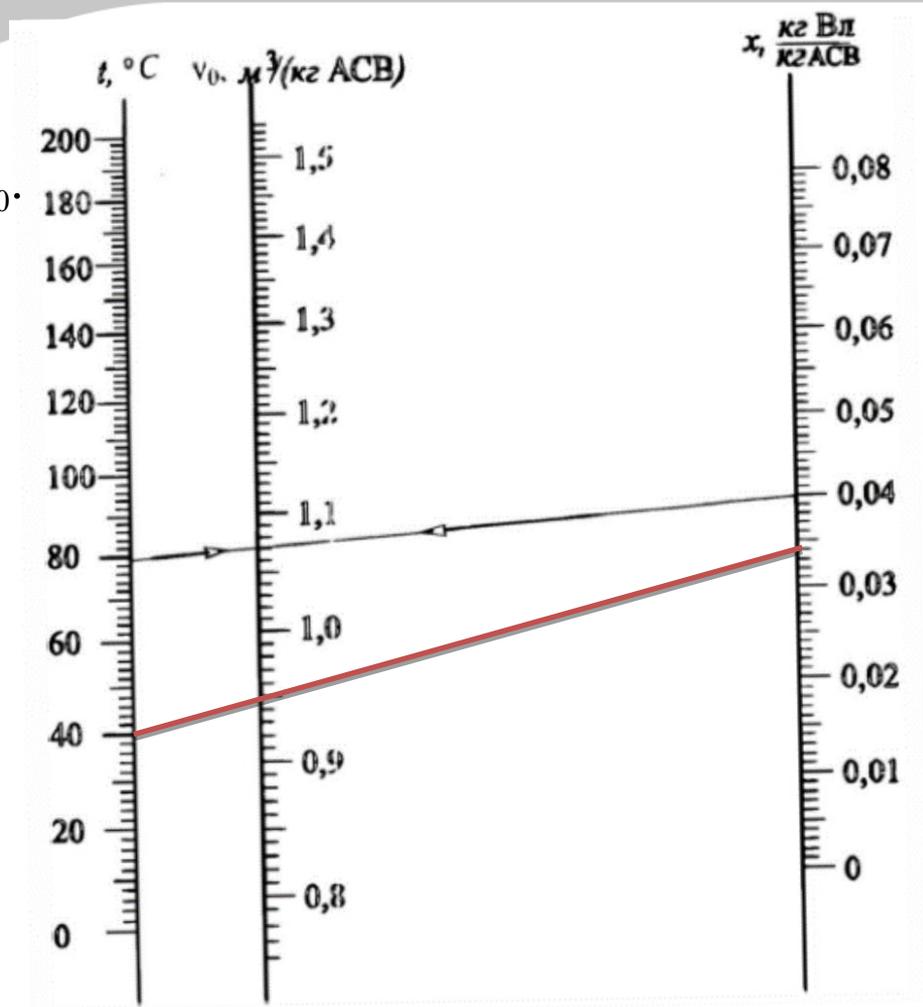
Объемный расход воздуха на входе в сушилку:

$$V = L_{\text{ц}} \cdot v_0 = 21,5 \cdot 0,96 = 20,64 \text{ м}^3/\text{с} ,$$

где  $v_0$  - относительный (условный) удельный объем влажного воздуха находим по номограмме (по  $t_M = 40 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $x_M = 0,034 \text{ кг Вл/кг а.с.в.}$ ):

$$v_0 = 0,96 \text{ [м}^3 \text{ вл. возд./кг а.с.в.]}$$

Рис. 3 номограмма для определения  $v_0$ .



Тепловая нагрузка калорифера  $Q_K$ :

$$Q_K = L(I_1 - I_M) = 21,5(150 - 129) = 454 \text{ кВт}.$$

## Задача 2.

В сушилку, работающую по принципу противотока, поступает  $G_1=3600$  кг/ч (1 кг/с) материала с абсолютной влажностью  $\omega_1=42\%$  масс. при температуре материала  $\theta'=18^\circ\text{C}$ . Конечная влажность  $\omega_2=11\%$  масс. Температура уходящего материала  $\theta''=38^\circ\text{C}$ , а его относительная теплоемкость  $C_M''=2,35$  кДж/(кг  $^\circ\text{C}$ ). Воздух поступает в калорифер с  $t_0=15^\circ\text{C}$ ;  $\varphi_0=70\%$ . Температура воздуха на входе в сушильную камеру  $t_1=140^\circ\text{C}$ . Относительная влажность отработанного воздуха на выходе из сушилки  $\varphi_2=60\%$ . Потери тепла в окружающую среду и с транспортными приспособлениями составляют 12% от расхода теплоты в калорифере идеальной сушилки ( $q_T + q_0 = 0,12 \cdot q_K^{\text{ид}}$ ).

Сушильная камера не имеет дополнительного подогрева ( $q_c=0$ ). Калорифер обогревается насыщенным водяным паром давлением  $P_{\text{II}}=5$  атм ( $t_{\text{II}}=151,1^\circ\text{C}$ , теплота конденсации пара  $r_{\text{II}}=2117$  кДж/кг).

Определить:

- объемный расход влажного воздуха на выходе из сушилки;
- расход греющего пара.

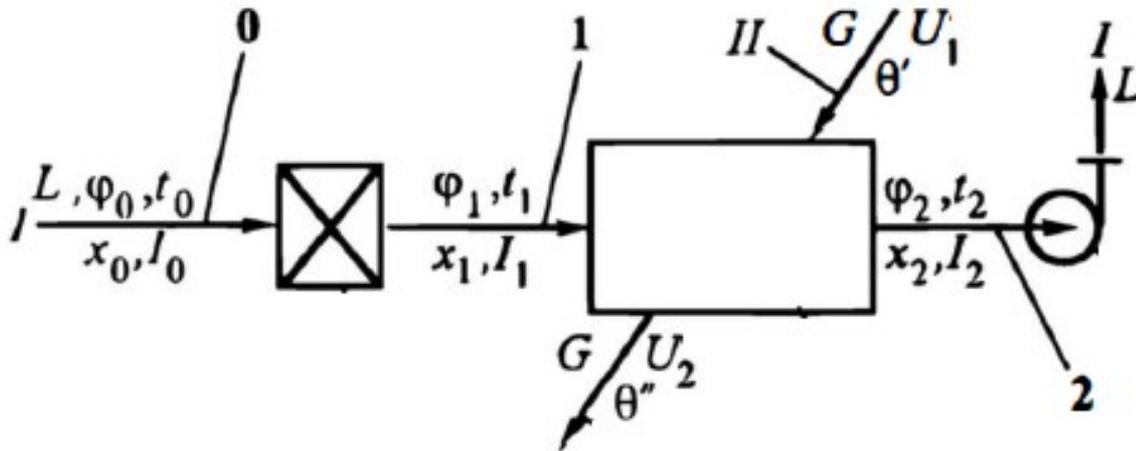


Схема реальной  
сушильной  
установки.

Определим количество (потока) удалённой влаги.

Для этого по известной абсолютной влажности материала, найдём относительную его влажность:

$$U_1 = \frac{w_1}{1 - w_1} = \frac{0,42}{1 - 0,42} = 0,724 \text{ кгВл/кгСМ};$$

$$U_2 = \frac{w_2}{1 - w_2} = \frac{0,11}{1 - 0,11} = 0,124 \text{ кгВл/кгСМ}.$$

Массовый поток сухой части материала  $G_2$  по потоку влажного материала  $G_1$ :

$$G_2 = \frac{G_1}{1 + U_1} = \frac{1}{1 + 0,724} = 0,58 \text{ кг CM} / \text{с}.$$

Количество удаляемой из материала влаги:

$$W = G_2(U_1 - U_2) = 0,58(0,724 - 0,124) = 0,3584 \text{ кг Вл} / \text{с}.$$

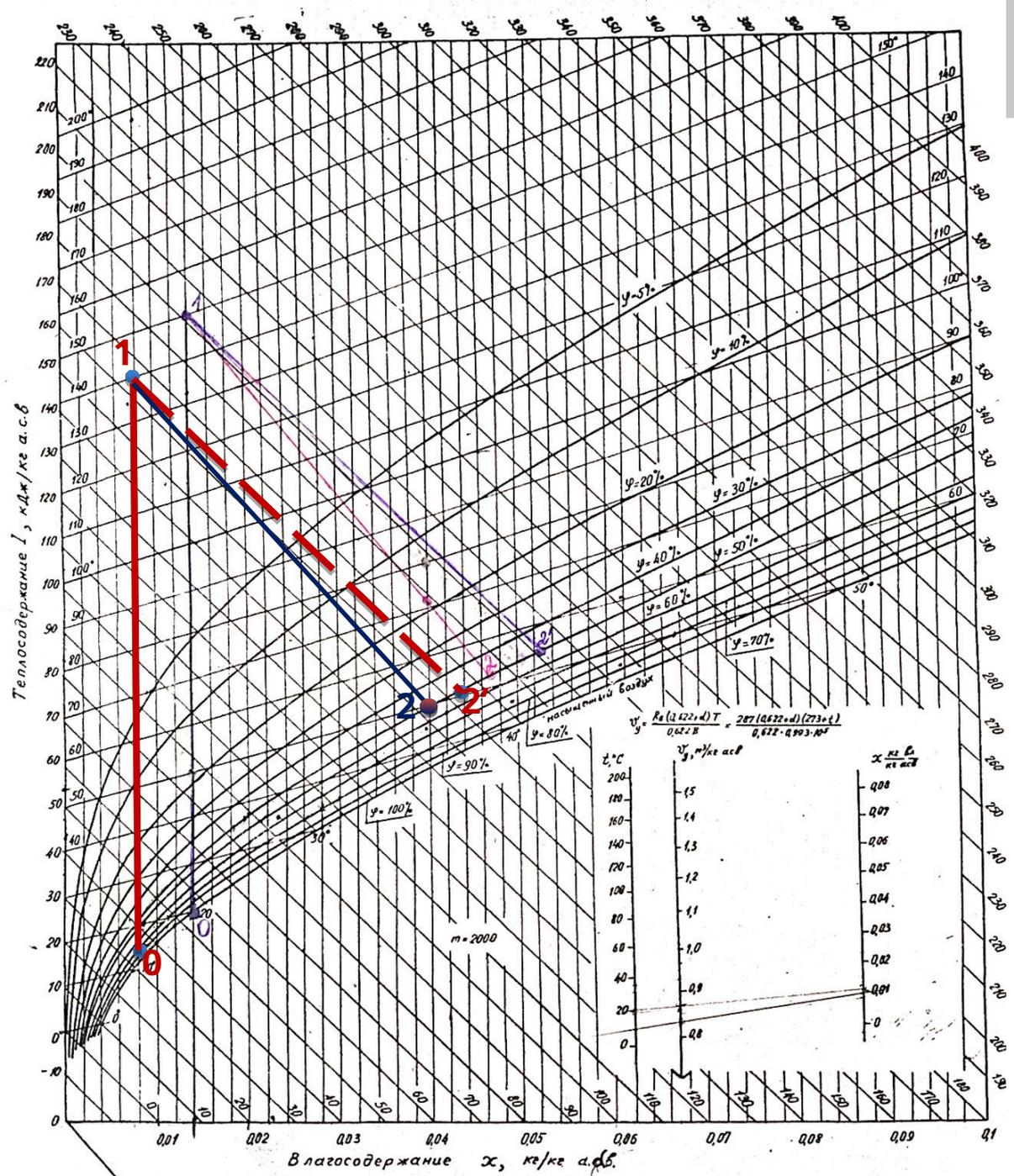
Расчёт удельного расхода теплоты в калорифере для идеальной сушилки  $q_k^{\text{ид}}$ .

Построим процесс **идеальной** сушки в  $I$ -х диаграмме. Известные параметры воздуха выделены в таблице красным цветом. Линия 1-2 это процесс для идеальной сушилки, он проходит по линии  $I = \text{const}$  до заданной относительной влажности воздуха. Параметры воздуха в рабочих точках заносим в таблицу:

## Сводная таблица параметров воздуха

	<i>I, кДж/кг</i>	<i>x, кг/кг</i>	<i>φ, %</i>	<i>t, °C</i>
<b>0</b>	36	0,008	<b>70</b>	<b>15</b>
<b>1</b>	165	0,04	<5	<b>140</b>
<b>2</b>	150	0,04	<b>60</b>	46
<b>2<sup>и</sup></b>	165	0,045	<b>60</b>	48

# Изображение процесса реальной сушки в $I$ - $x$ диаграмме



Удельный расход теплоты в калорифере идеальной сушилки

$$q_{\text{К}}^{\text{ид}} = l(I_1 - I_0) = \frac{1}{x_2' - x_0} (I_1 - I_0) = \frac{1}{0,045 - 0,008} (165 - 36) = 3483 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Построение рабочей линии реального процесса в сушилке.

Расчет параметра сушки  $\Delta q^*$

Параметр процесса сушки - баланс прихода и расхода удельных потоков теплоты определяют по формуле:

$$\Delta q^* = q_c - (q_m + q_T + q_0)$$

$q_c = 0$  – дополнительный подвод теплоты в сушильную камеру [ $\text{кДж/кг.уд.Вл}$ ];

$$(q_0 + q_T) = 0,12 \cdot q_{\text{К}}^{\text{ид}} = 0,12 \cdot 3483 = 418 \frac{\text{кДж}}{\text{кг.уд.Вл}}$$

Расчёт потерь теплоты с материалом:

$$q_m = \frac{G_2}{W} (C_M'' \theta'' - C_M' \theta').$$

В этой расчётной формуле неизвестна относительная теплоёмкость исходного влажного материала

$$C_M' = C_T + U_1 C_B.$$

При известной относительной теплоёмкости высушенного материала

$$C_M'' = C_T + U_2 \cdot C_B = 2,35 \frac{\text{кДж}}{\text{кгСМ} \cdot \text{К}}$$

найдем теплоёмкость сырого материала:

$$\begin{aligned} C_M' &= C_M'' + C_B (U_1 - U_2) = \\ &= 2,35 + 4,19(0,724 - 0,124) = 4,864 \frac{\text{кДж}}{\text{кгСМ} \cdot \text{К}}, \end{aligned}$$

где  $C_B = 4,19$  [кДж/(кг К)] – теплоёмкость воды.

Тогда потери теплоты с материалом составят:

$$q_m = \frac{G_2}{W} C_M'' (t_m'' - t_m') = \frac{0,652}{0,358} (2,35 \cdot 38 - 4,864 \cdot 18) = 3,183 \frac{\text{кДж}}{\text{кгуд.Вл.}}$$

Определим параметр сушки:

$$\Delta q^* = q_c - (q_m + q_T + q_0) = 0 - (3,18 + 418) = -421 \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кгуд.Вл.}} \right]$$

### Нахождение точки 2 реальной сушилки

Запишем уравнение линии процесса в реальной сушилке:  $I = I_1 + \Delta q^* (x - x_1)$ ,  
где  $x$  и  $I$  – координаты точек этой прямой.

Чтобы найти промежуточную точку, зададимся значением влагосодержания  $x_{\text{пр}} = 0,04$ , тогда по этому уравнению можно определить относительную энтальпию воздуха:  $I_{\text{пр}} = 165 - 421(0,04 - 0,008) = 151,5 \text{ кДж/кг а.с.в.}$   
Теперь проводим луч из точки 1, проходящий, через точку  $(x_{\text{пр}}, I_{\text{пр}})$  до пересечения с заданной  $\varphi_2$ . Это и есть точка 2 реального процесса.

Расчет материальных и тепловых потоков в реальной сушилке.

Массовый расход воздуха:

$$L = \frac{W}{x_2 - x_0} = \frac{0,3584}{0,04 - 0,008} = 11,2 \text{ кг а.с.в.} / \text{с}.$$

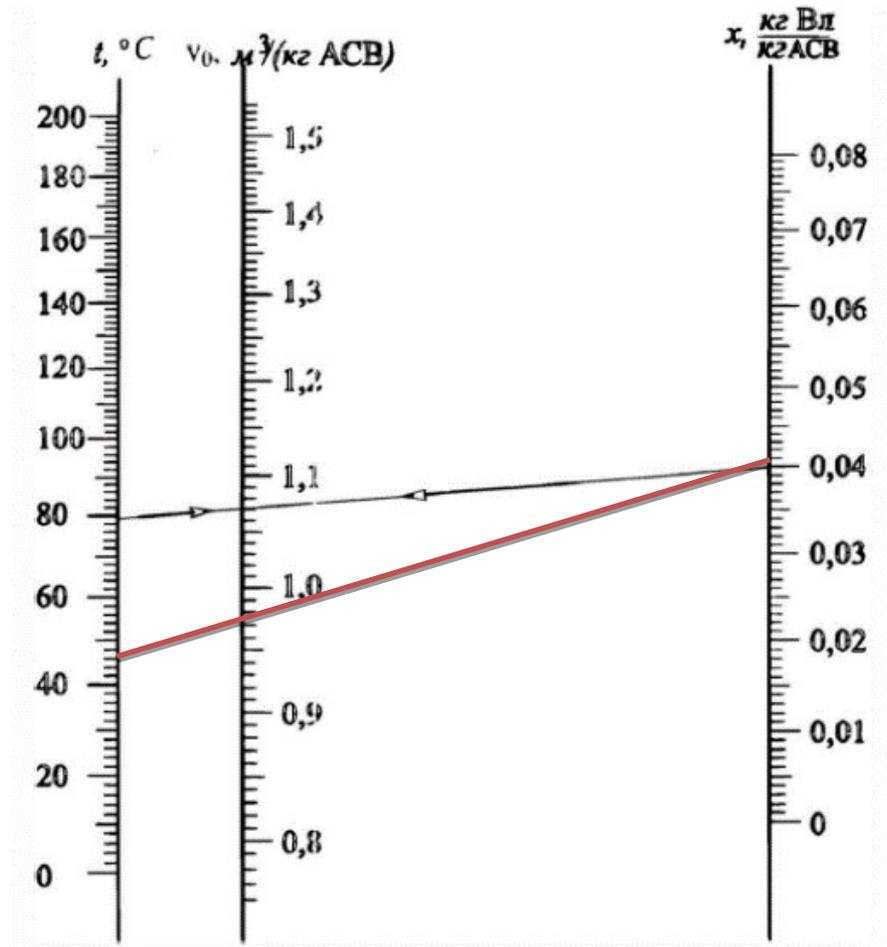
Объемный расход воздуха на выходе из сушилки:

$$V = L \cdot v_0 = 11,2 \cdot 0,97 = 10,86 \text{ м}^3/\text{с},$$

где  $v_0$  - относительный (условный) удельный объем влажного воздуха находим по номограмме (по  $t_2 = 46 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $x_2 = 0,04 \text{ кг Вл/кг а.с.в.}$ ):

$$v_0 = 0,97 \text{ [м}^3 \text{ вл. возд./кг а.с.в.]}$$

## Номограмма



Тепловой поток в калорифере  $Q_K$  и расход греющего пара в калорифере:

$$Q_K = \frac{W}{x_2 - x_0} (I_1 - I_0) = \frac{0,3584}{0,04 - 0,008} (165 - 36) = 1445 \text{ кВт.}$$

$$D_{\Pi} = \frac{Q_K}{r_{\Pi}} = \frac{1445}{2117} = 0,682 \text{ кг/с.}$$