

СУШКА

Общая характеристика процесса и области его применения. Состояние высушиваемых материалов. Методы сушки. Конвективная сушка. Материальный и тепловой балансы. Кинетика процесса сушки. Тепло- и массообмен между воздухом и материалом. Типовые кинетические кривые сушки. Периоды постоянной и падающей скоростей

ОБЕЗВОЖИВАНИЕ

- Процесс обезвоживания материала за счет испарения влаги и отвода ее паров - **сушка.**
- Все тела обладают способностью поглощать влагу, отдавать влагу и интенсивно удерживать влагу.
- Количество влаги в теле меняется в значительных пределах в зависимости от условий.

Влажность материала

- Баланс влажного материала:

$$M_{\text{вл}} = M_{\text{с}} + W$$

- Относительная влажность

$$u = \frac{W}{M_{\text{вл}}} 100, \%$$

- Абсолютная влажность

$$u' = \frac{W}{M_{\text{с}}} 100, \%$$

Влажность материала

- Влажность материала меняется.
- Влага, содержащаяся в материале в различных количествах, неоднородна по интенсивности связи с твердой фазой, по своим свойствам, по характеру воздействия на свойства влажного материала.

Формы связи влаги с материалом

- **Химическая связь** влаги с материалом – влага входит в состав кристаллических решеток материала;
- **Физико-химическая связь** – осуществляется адсорбционными и осмотическими силами:
адсорбционная и осмотическая;
- **Физико-механическая связь** – влага, заполняющая макро- и микрокапиляры, и влага смачивания;



Физико-химическая связь

- Адсорбционная (гидратационная) связанная влага;
- Осмотическая влага

Адсорбционная влага

- Адсорбционная (гидратационная) – поглощается с выделением тепла; сорбируется внешней поверхностью за счет нескомпенсированного силового поля молекул из паровоздушной смеси и при непосредственном контакте с водой;
- Образуется адсорбционный слой;
 - меняются физические свойства материала (пластифицирует);
 - плотность воды повышается, снижается теплоемкость и температура замерзания.

Осмотическая влага

- Осмотическая влага проникает в капиллярно-пористое тело, состоящее из замкнутых пор, через стенки путем избирательной диффузии за счет сил осмотического давления.
- Проникает в материал в основном при соприкосновении с жидкостью;
- Энергия связи незначительна;
- Свойства воды и материала не меняются.



Физико – механическая связь

- Капиллярная влага;
- Влага смачивания;

Капиллярная влага

- Заполняет микрокапилляры, макрокапилляры тела, вследствие сил капиллярного давления.
- Механически удерживается (тонкий слой у стенок связан адсорбционно).
- Поглощается из паровоздушной смеси и при непосредственном контакте с водой.

Влага смачивания

- Находится на наружной поверхности и в макропорах. Макрокапилляры заполняются влагой при непосредственном соприкосновении с водой.
- Удерживается прилипанием.
- Поглощается при непосредственном контакте с водой.

Классификация влажного материала

- **Коллоидные тела** – сохраняют эластичные свойства после удаления из них влаги (желатин), преобладает осмотическая форма связи;
- **Капиллярно-пористые тела** – при удалении влаги становятся хрупкими (песок, древесный уголь), преобладает капиллярная форма связи;
- **Капиллярно-пористые коллоидные тела** – характерны процессы набухания и усадки (торф, зерно, кожа).

Равновесная влажность

- При долгом контакте материала с воздухом определенной t и ϕ , влажность материала постоянна – равновесная.
- Температура материала равна температуре влажного воздуха, давление паров воды у поверхности материала равно парциальному давлению водяного пара в воздухе: $p_M = p_{ПВ}$

Равновесная влажность

- Зависит
 - от свойств материала;
 - характера связи влаги с материалом;
 - параметров окружающей среды.
- Равновесная влажность материала при контакте с воздухом $\varphi=100\%$ - гигроскопическая точка материала.

Гигроскопическая точка

- Парциальное давление пара в воздухе и непосредственно над поверхностью материала равны парциальному давлению насыщенного пара при данной температуре: $p_M = p_{пв} = p_{нас}$;

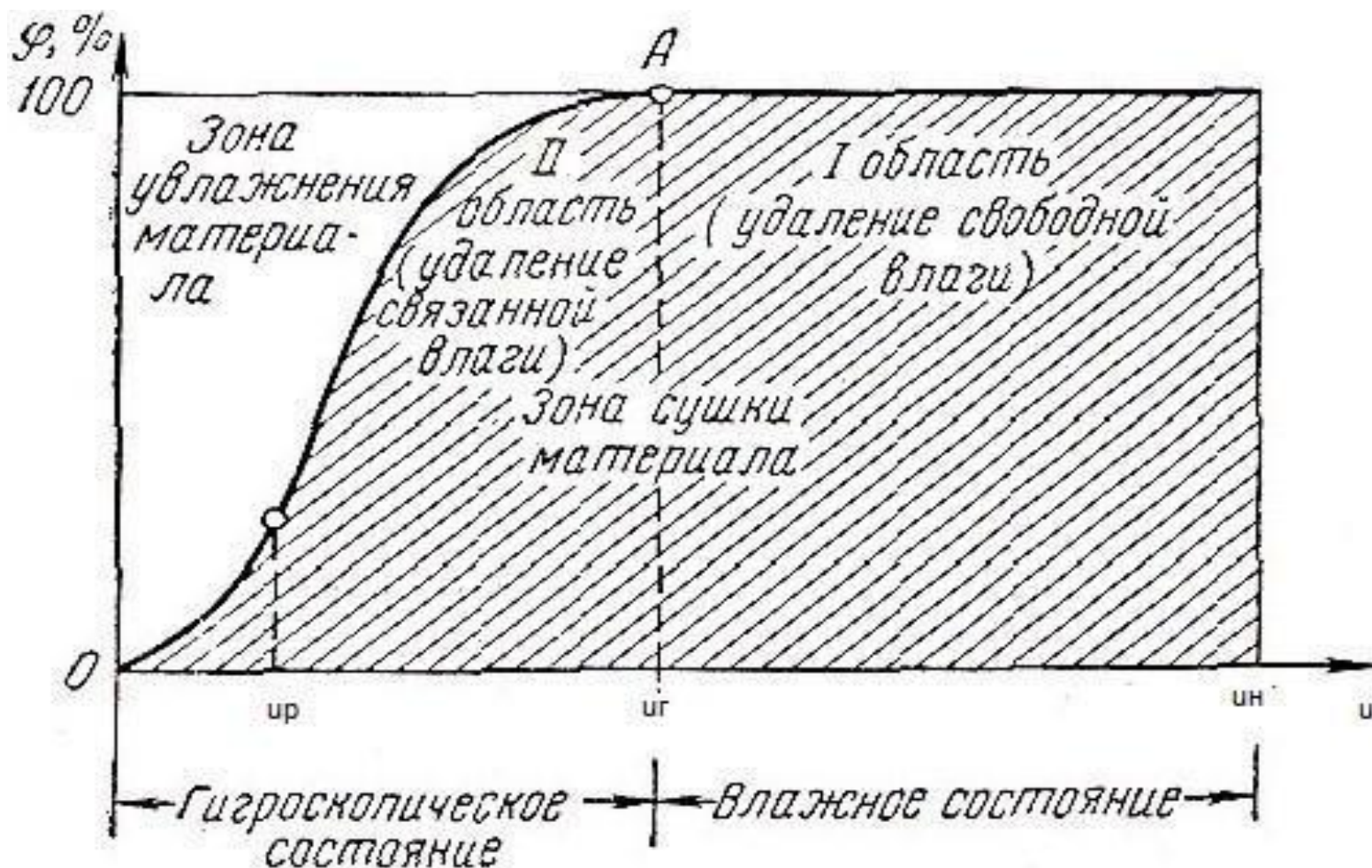
Состояние материала

- Если влажность материала больше влажности гигроскопической точки – материал находится во **влажном состоянии**: $\rho_m = \rho_{нас}$
- Сушка материала, находящегося во влажном состоянии, протекает при любых параметрах окружающей среды до ее полного насыщения.

Состояние материала

- Если влажность материала меньше влажности гигроскопической точки – материал находится в **гигроскопическом состоянии**: $\rho_m < \rho_{нас}$
- Сушка материала, находящегося в гигроскопическом состоянии, зависит от давления водяного пара в окружающей среде и возможна только при влажности материала больше равновесной.

Равновесная влажность



Особенности тепло- массообмена

- Если парциальное давление водяных паров у поверхности материала больше, чем в окружающем воздухе, **материал отдает влагу воздуху.**
- Парциальное давление водяных паров у поверхности материала меньше, чем в окружающем воздухе, **-материал собирает влагу из воздуха**

Процесс сушки

- При сушке жидкость испаряется и переходит в газовую фазу в виде пара, передавая от жидкости к воздуху (газу) тепло, равное теплоте испарения жидкости:

$$Q_2 = Wr$$

- Т.к. сушка – массообменный процесс:

$$W = KF(p_M^* - p_{ПВ})$$

Влияние температуры

- Чем выше температура материала, тем больше давление пара над материалом p_m , т.е. для интенсификации процесса необходимо тепло.



Тепловая сушка

- Контактная сушка;
- Воздушная или газовая сушка;
- Терморрадиационная сушка;
- Высокочастотная сушка

Тепло- массообмен

- При тепловой сушке процесс передачи влаги (вещества) из одной фазы в другую сопровождается процессом теплопередачи.
- Температура фаз не одинакова.
- Количество тепла, передаваемого от газообразного сушильного агента к жидкости за счет конвекции при $t_{\Gamma} > \Theta_{\text{М}}$:


$$Q_1 = \alpha F (t_{\Gamma} - \Theta_{\text{М}})$$

Теплообменное равновесие

- Процесс испарения сопровождается передачей тепла от жидкости в окружающую среду;
- Жидкость соприкасается с горячим теплоносителем и нагревается;
- Когда $Q_1=Q_2$ наступает тепловое равновесие, идет испарение при постоянной температуре.

$$Q_2 = Wr$$

$$Q_1 = \alpha F (t_{\Gamma} - \Theta_{\text{М}})$$

- 
-
- Температура, принимаемая жидкостью при испарении после достижения теплового равновесия, - температура мокрого термометра.
 - Процесс сушки при данных параметрах газа (воздуха) происходит до достижения равновесной влажности материала.

Кинетика процесса сушки

- Влага перемещается от центра материала к периферии (границе контакта с воздухом) за счет массопроводности:

$$dM = -k \frac{\partial c}{\partial \delta} dF d\tau$$

где k – коэффициент влагопроводности, $\text{м}^2/\text{с}$;

Кинетика процесса сушки

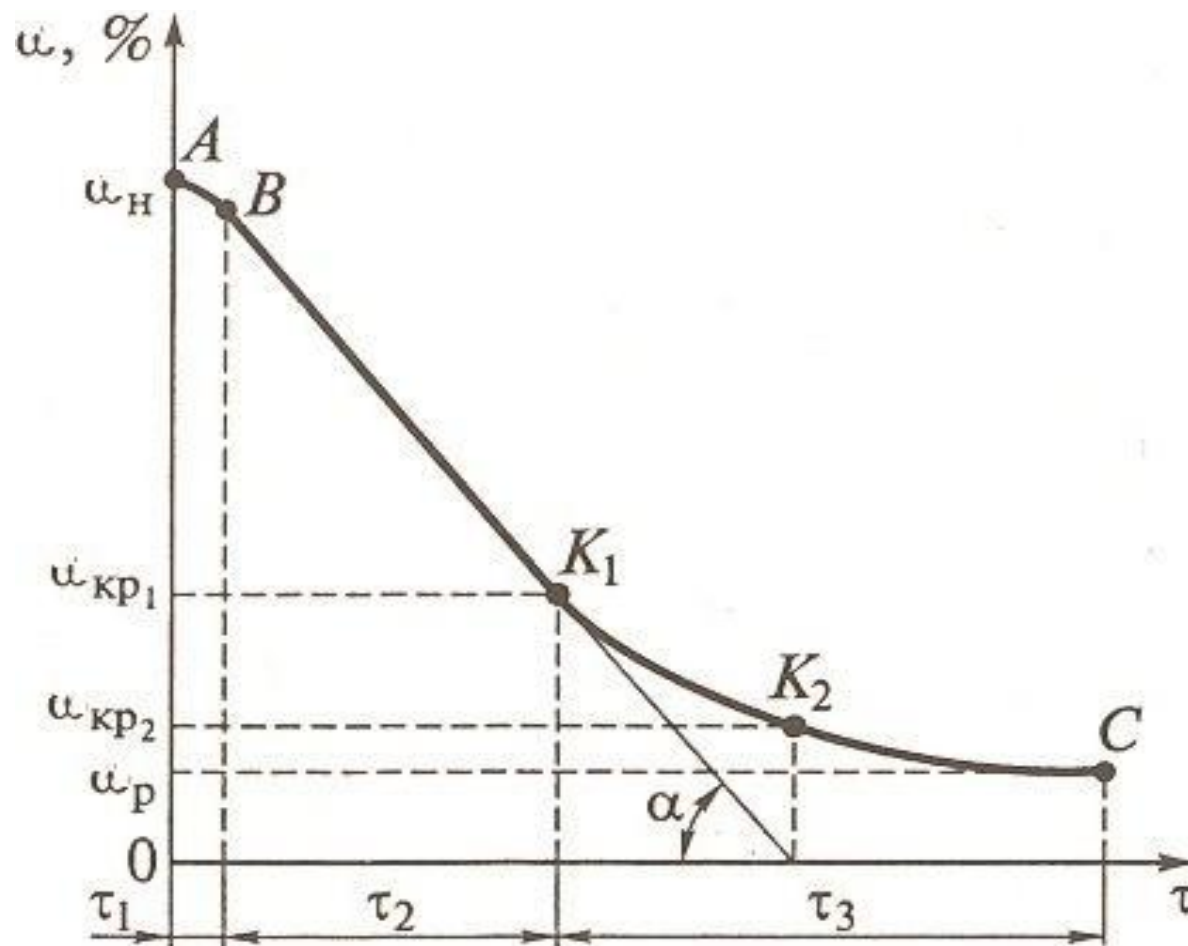
- С поверхности материала влага в виде пара передается в ядро газового потока за счет конвективной диффузии:

$$\frac{u - u_p}{u_H - u_p} = f(Bi_D; Fo_D; \frac{z}{\delta})$$

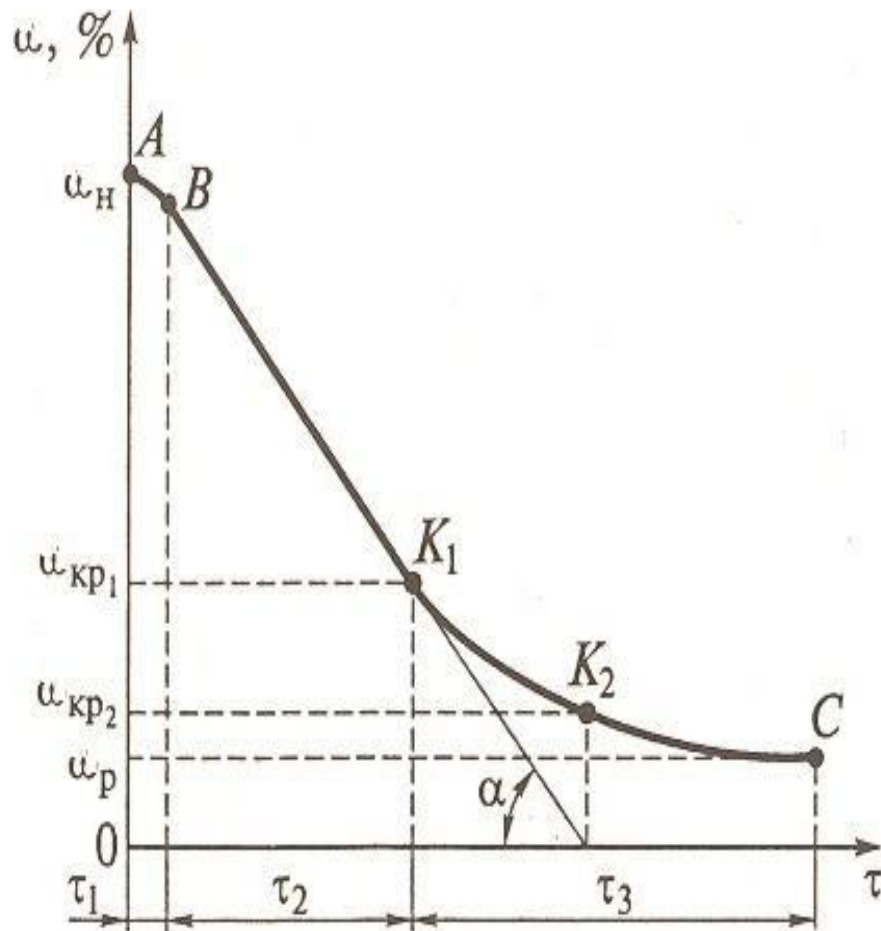
где

$$Bi_D = \frac{\beta l}{k} \quad - \text{ критерий Био}$$

Кривая сушки



Первый период сушки



- Кинетический закон

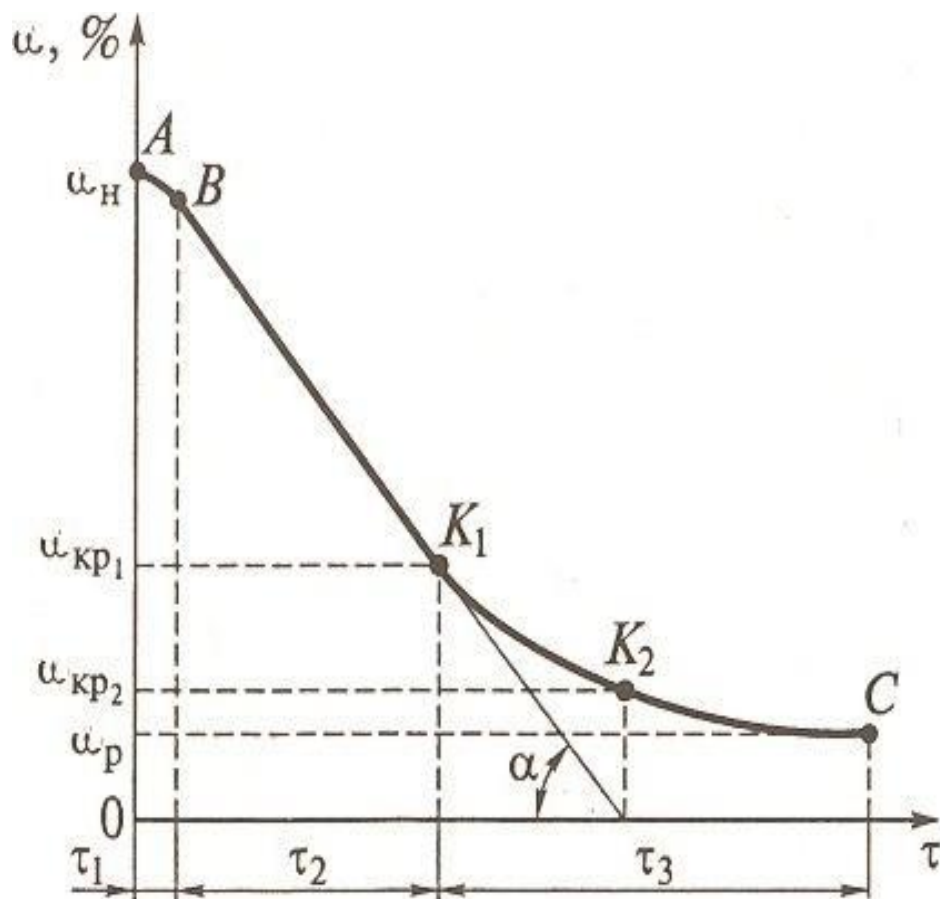
$$W = \beta_x F(x_{\text{нас}} - x) = \beta_p F(p_{\text{нас}} - p)$$

- Скорость процесса

$$\omega = \frac{W}{F\tau} = \beta_p \Delta p_{\text{ср}}$$

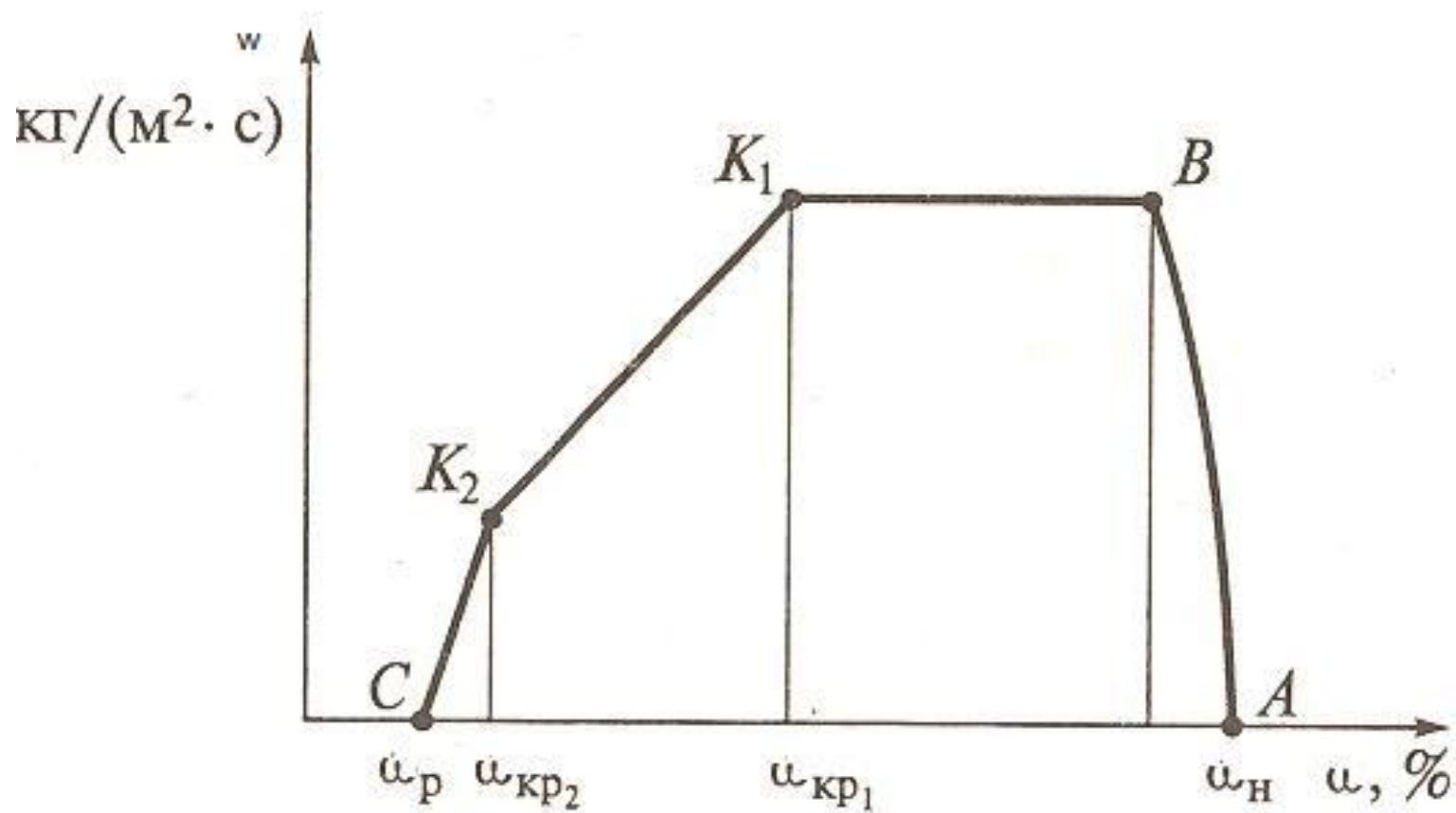
- Температура материала $\Theta_M = t_M$

Второй период сушки



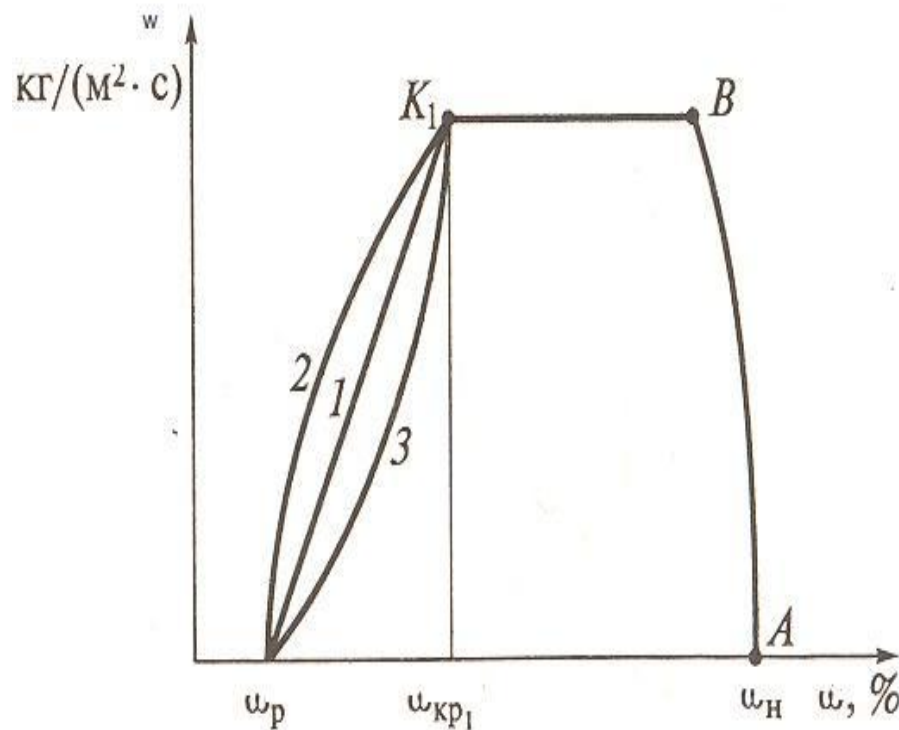
- Кинетический закон
 $W = KF(u - u_p)$
- Скорость процесса –
равномерно падающая
и неравномерно
падающая
- Температура
материала повышается
до t_B

Кривая скорости сушки

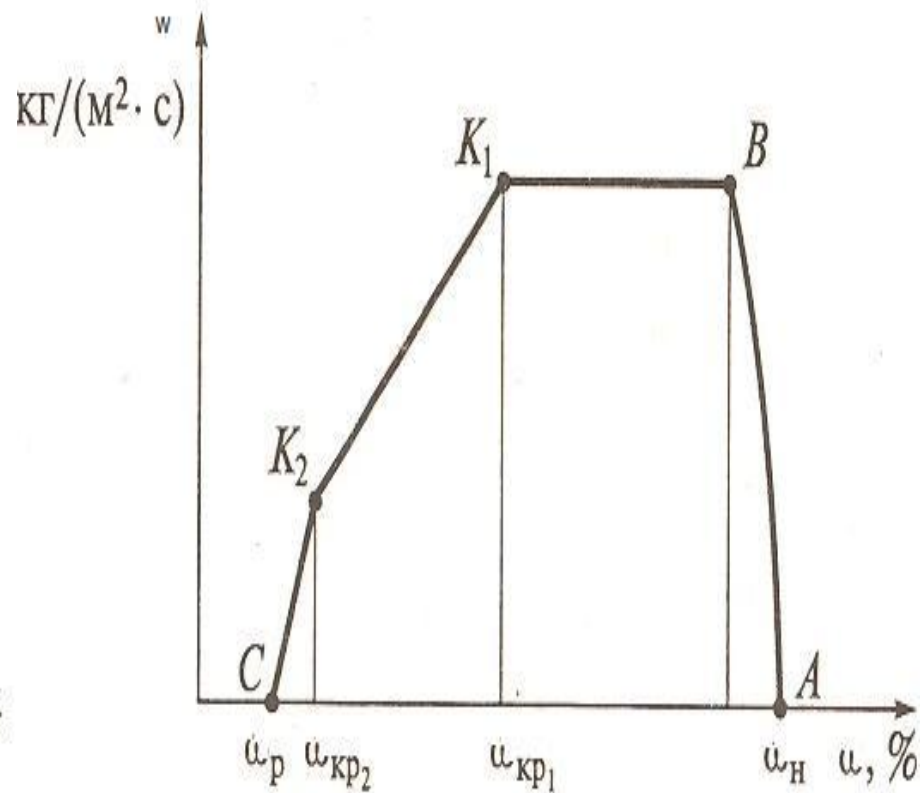
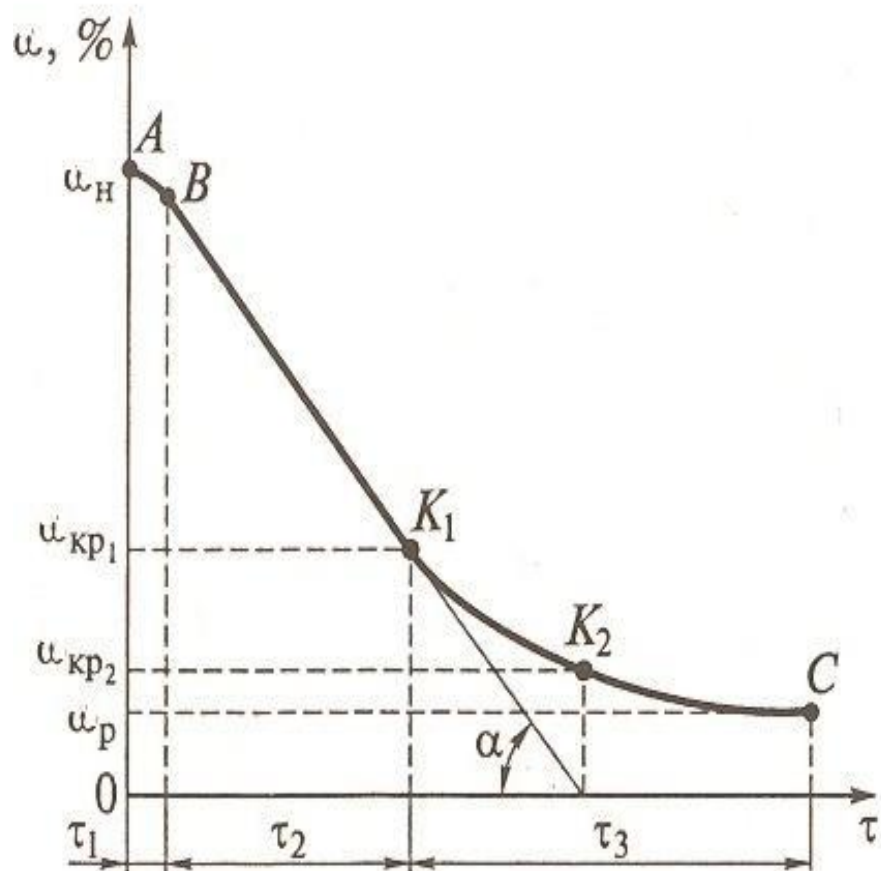


Кривая скорости сушки

- 1- для тонких материалов с большой удельной поверхностью;
- 2 – для пористых материалов (ткань, кожа, бумага)
- 3 – для материалов с небольшой удельной поверхностью (керамика)



Кривая скорости сушки



Факторы, влияющие на скорость

- Природа высушиваемого материала;
- Размеры;
- Начальная и конечная влажность материала;
- Относительная влажность, температура и скорость воздуха:
 - 1 период – скорость и направление движения
 - 11 период – температура и относительная влажность воздуха
- Характер и условия обтекания материала воздухом

Ускорение процесса сушки

- Повышение температуры – возрастает парциальное давление водяных паров в материале и движущая сила процесса;
- Уменьшение давления – снижается парциальное давление водяного пара и увеличивается движущая сила процесса;
- Увеличение скорости газа – увеличивается коэффициент массоотдачи и скорость процесса;
- Измельчение материала

Материальный баланс

- По общим потокам

$$M_H = M_K + W$$

- По абсолютно сухому веществу

$$M_H(1 - u_H) = M_K(1 - u_K)$$

Расход свежего воздуха

- Расход свежего воздуха

$$L_0 = \frac{W}{x_2 - x_0}$$

- Удельный расход воздуха

$$l_0 = \frac{1}{x_2 - x_0}$$

Тепловой баланс конвективной сушки

- Затраты тепла на проведение процесса сушки:

$$\Delta Q_{\text{суш}} = L_0(I_2 - I_0) + M_{\text{к}} c_{\text{к}}(\Theta_{\text{к}} - \Theta_{\text{н}}) - W c_{\text{вод}} \Theta_{\text{н}} + \Delta Q_{\text{тр}} + \Delta Q_{\text{пот}}$$

- Затраты тепла в калорифере

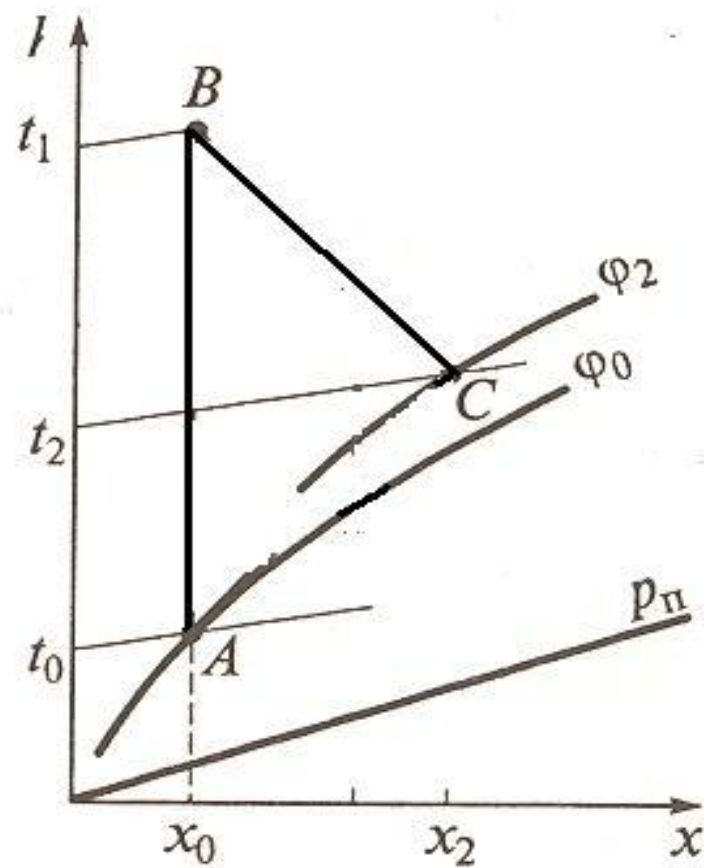
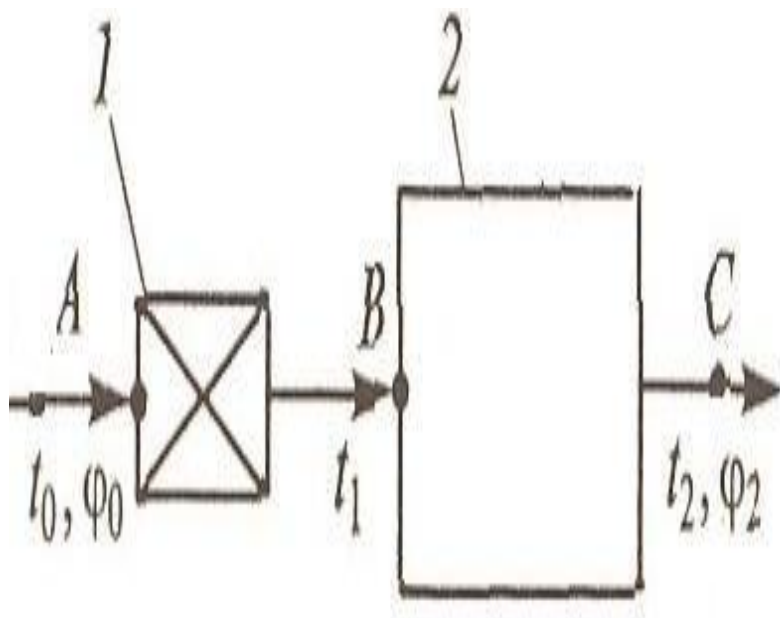
$$\Delta Q_{\text{суш}} = \Delta Q_{\text{кал}}$$

$$\Delta Q_{\text{кал}} = L_0(I_1 - I_0) = D r$$

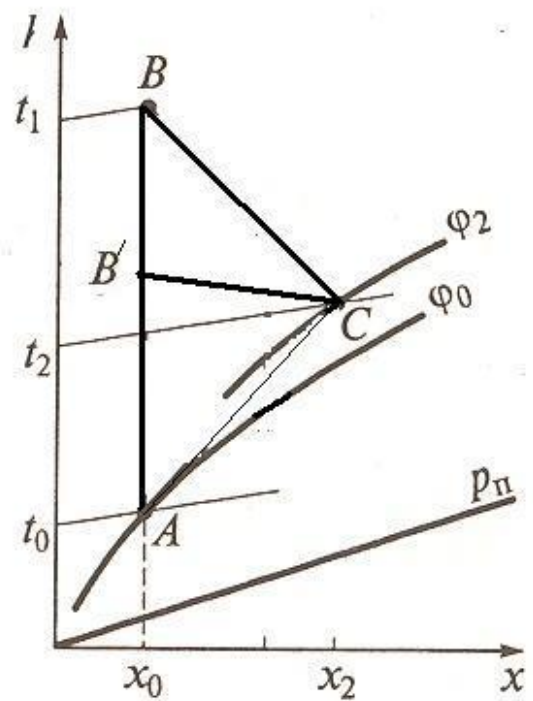
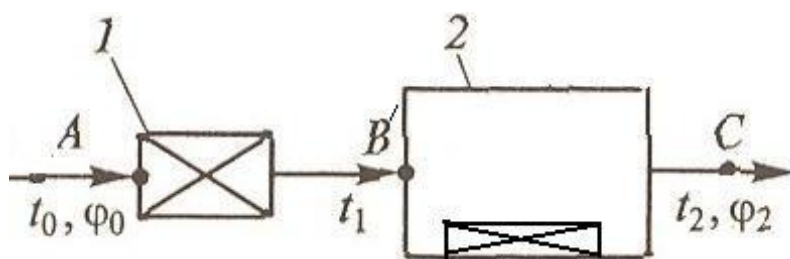
Схемы сушки

- Простая схема;
- С дополнительным подогревом;
- С промежуточным подогревом;
- С рециркуляцией отработанного воздуха;
- С замкнутой циркуляцией сушильного агента.

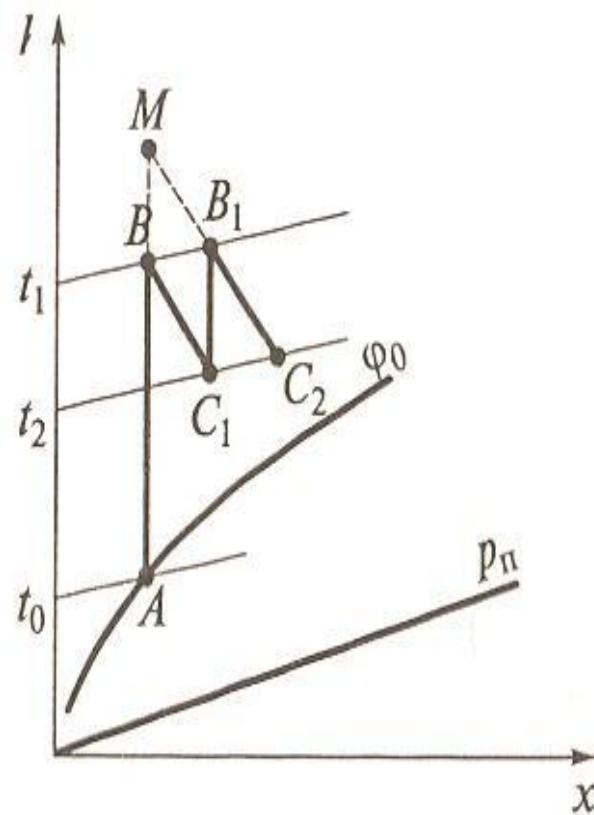
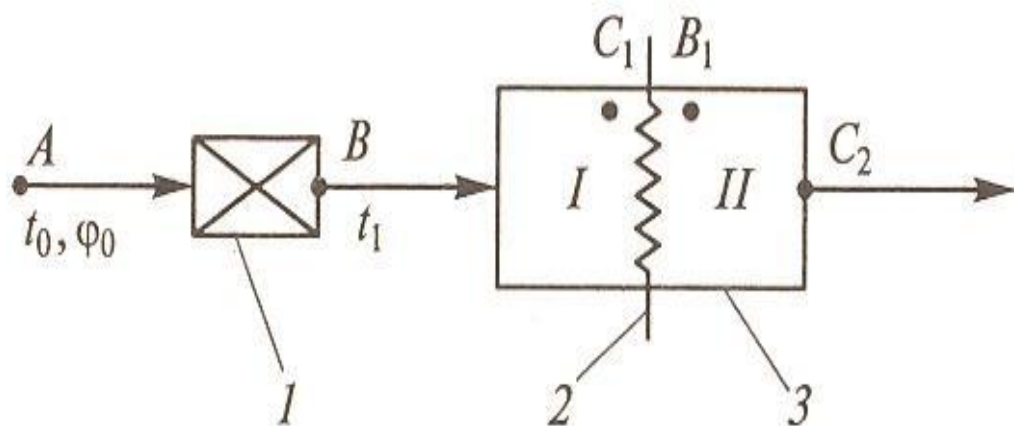
Простая схема



С дополнительным подогревом



С промежуточным подогревом



С рециркуляцией отработанного воздуха

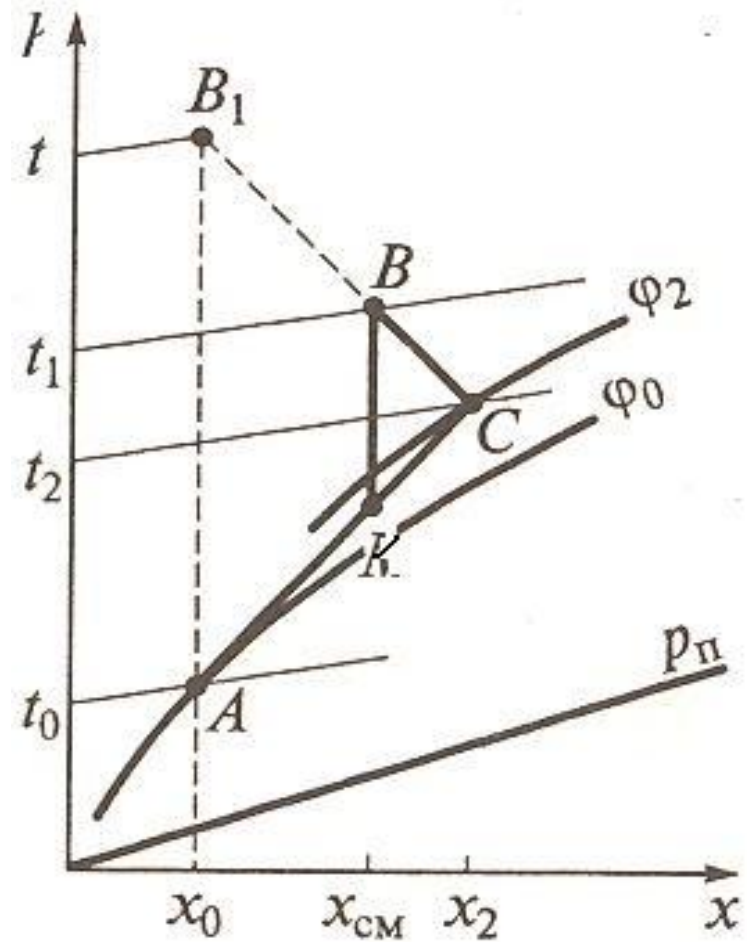
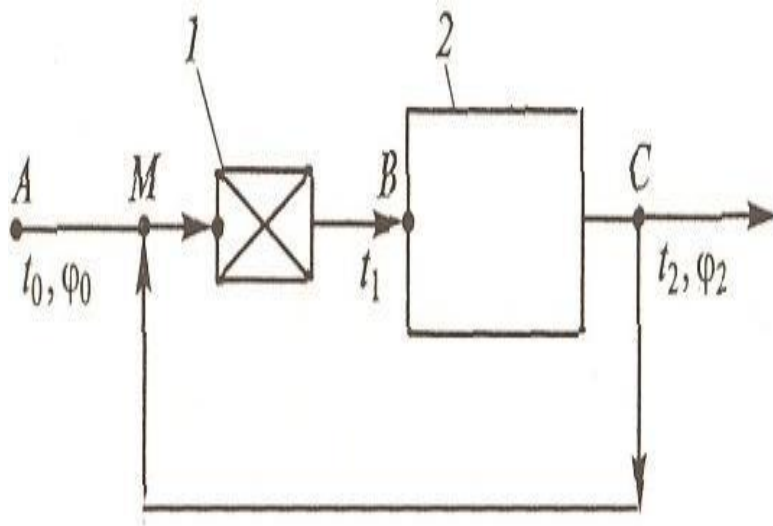


Схема с замкнутой циркуляцией воздуха

