

# 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  $\phi$ , 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.

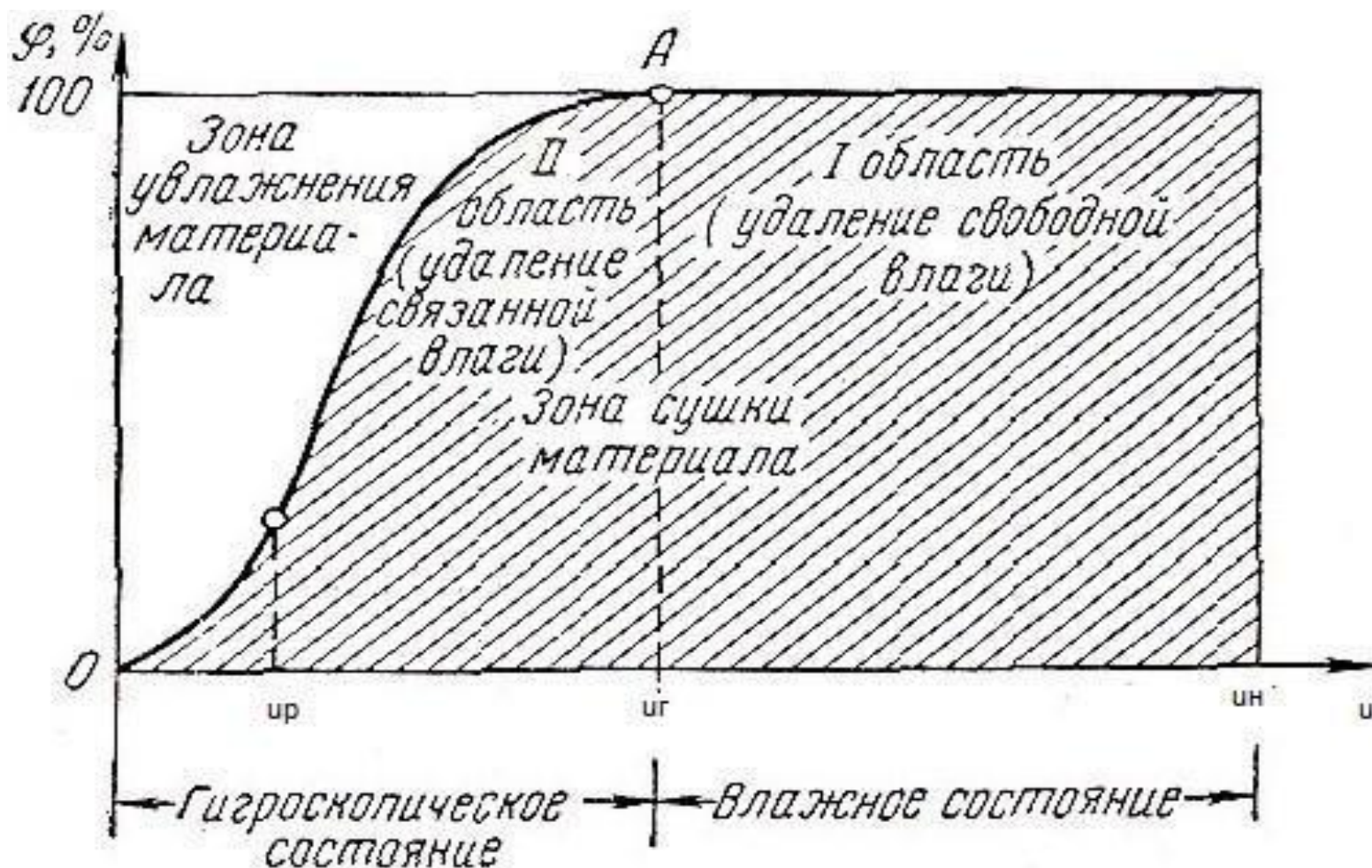


# Состояние материала

---

- 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  $t_{\Gamma} > \Theta_{\text{M}}$ :

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

# 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

---

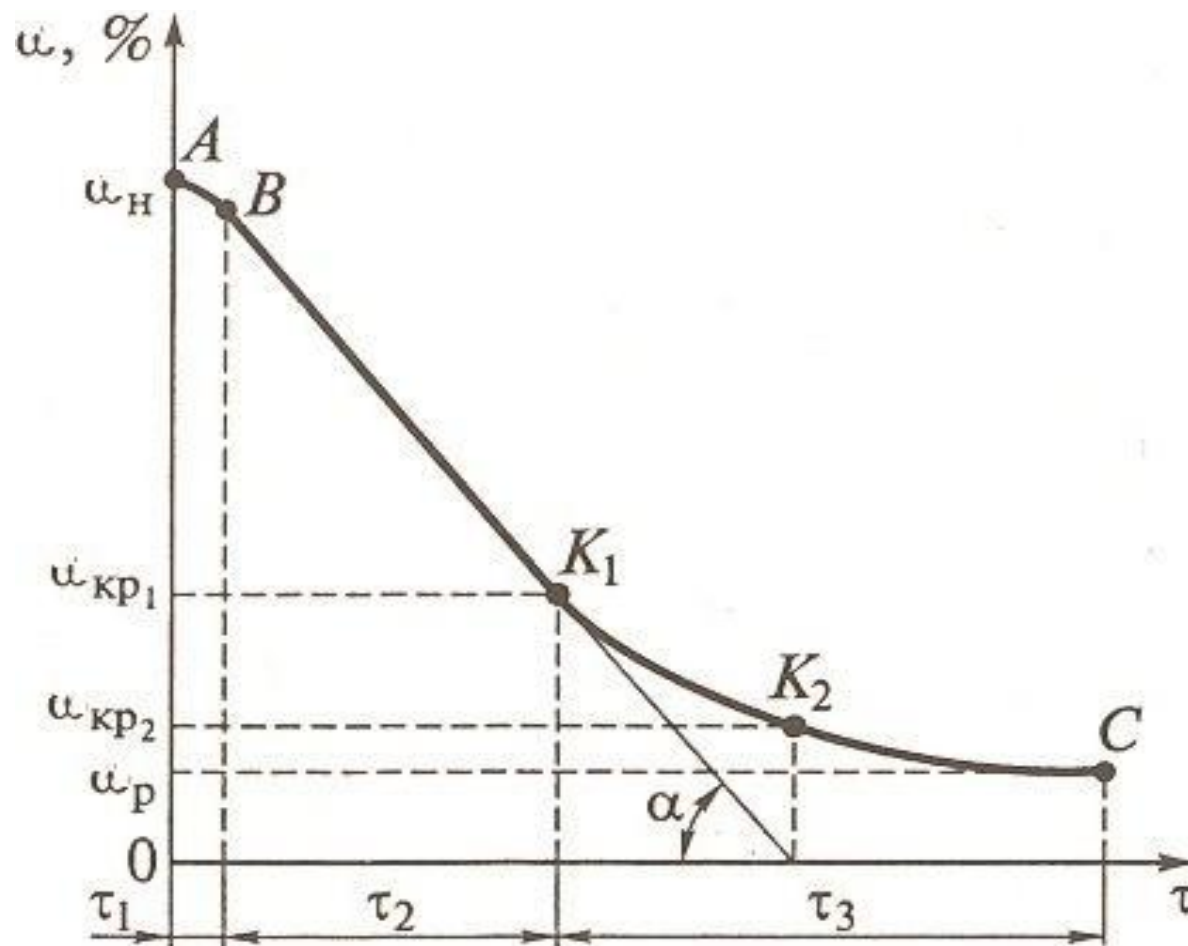
- С поверхности материала влага в виде пара передается в ядро газового потока за счет конвективной диффузии:

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

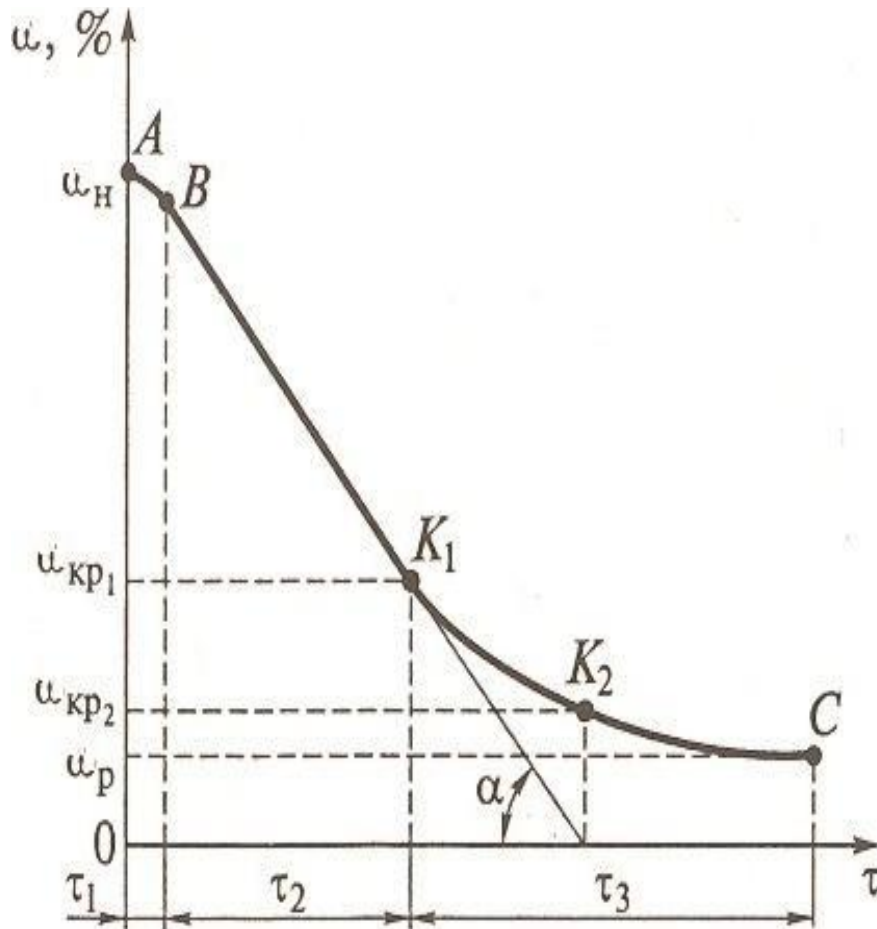
где

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

# Кривая сушки



# Первый период сушки



- Кинетический закон

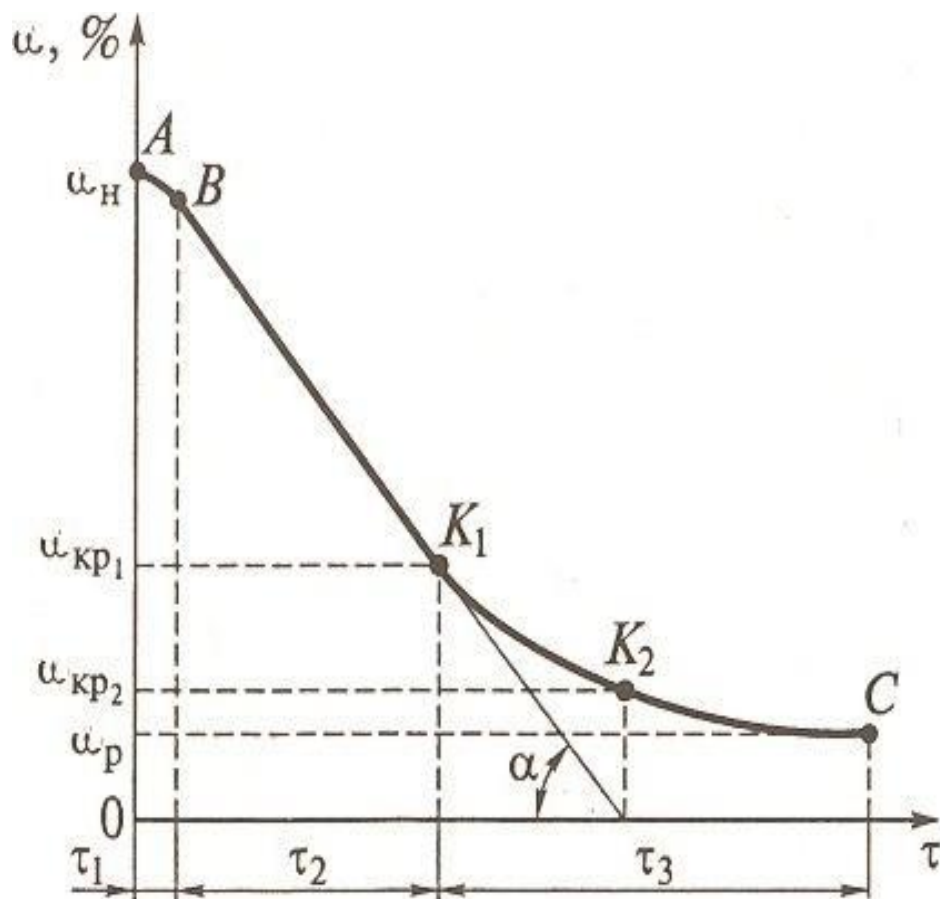
$$W = \beta_x F(x_{\text{нас}} - x) = \beta_p F(p_{\text{нас}} - p)$$

- Скорость процесса

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

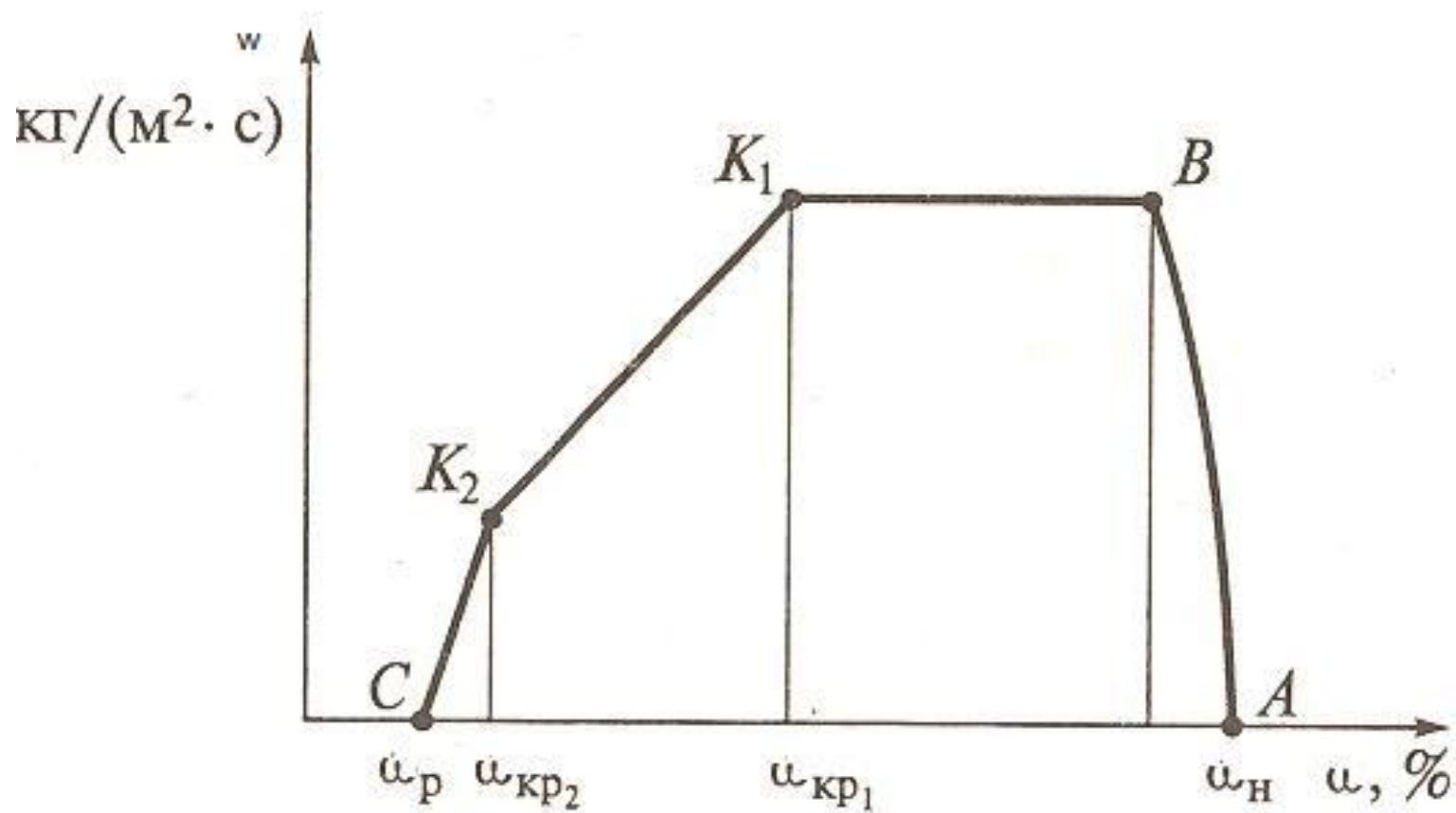
- Температура материала  $\Theta_M = t_M$

# Второй период сушки



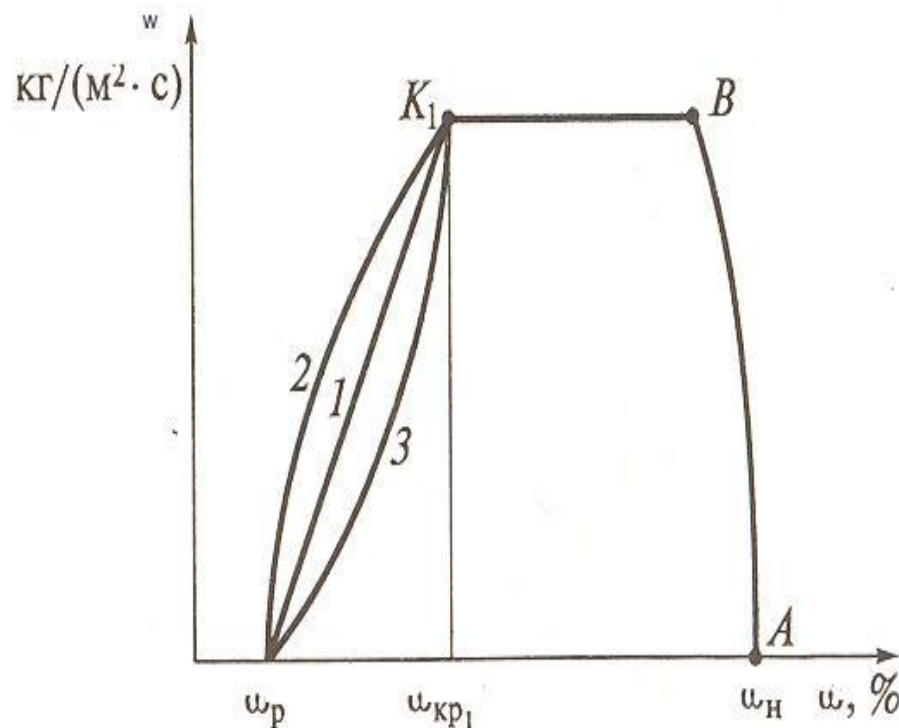
- Кинетический закон  
 $W = KF(u - u_p)$
- Скорость процесса –  
равномерно падающая  
и неравномерно  
падающая
- Температура  
материала повышается  
до  $t_B$

# Кривая скорости сушки



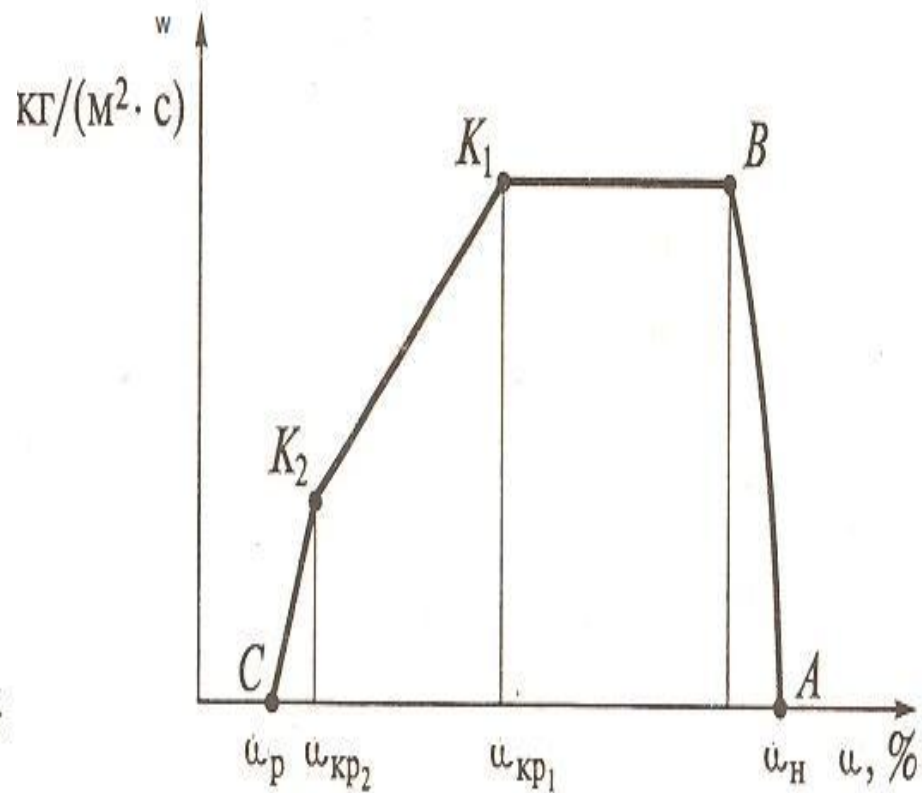
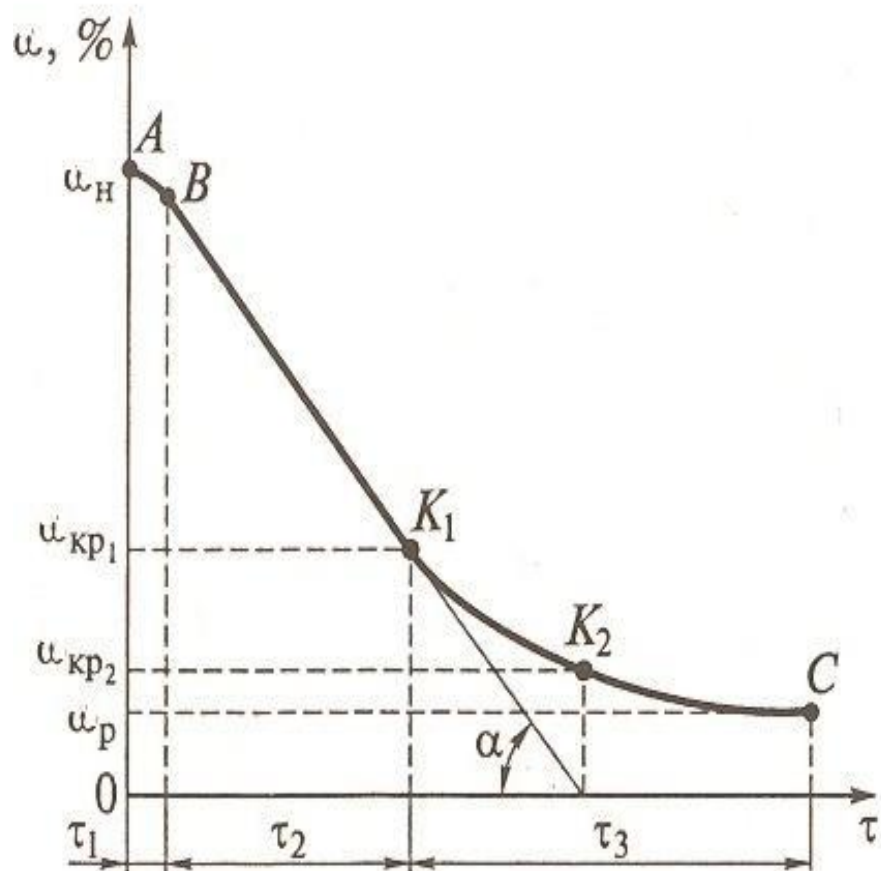
# Кривая скорости сушки

- 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

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

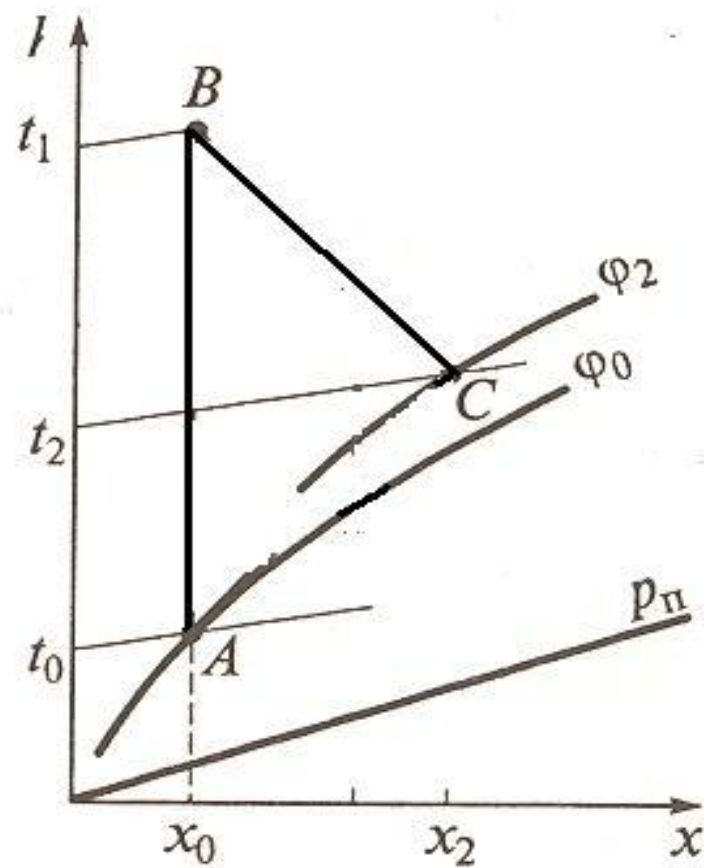
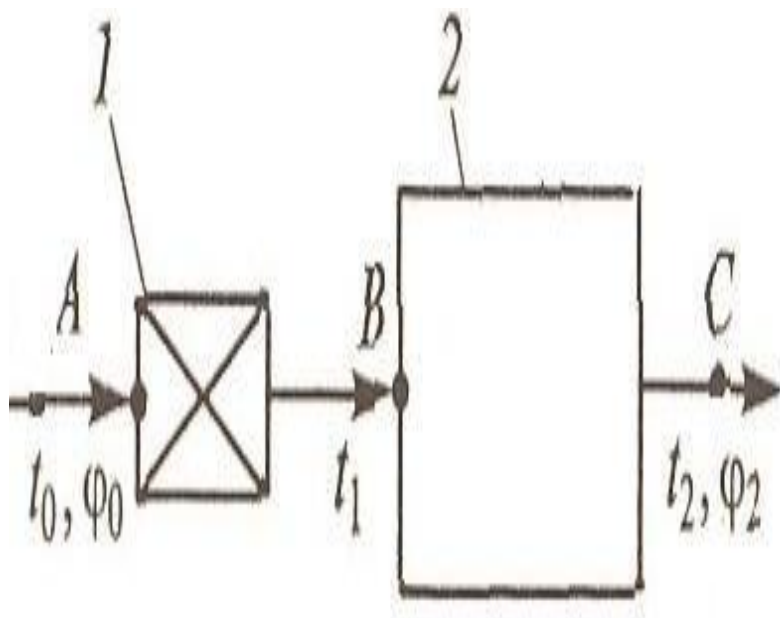
$$\Delta Q_{\text{кал}} = L_0(I_1 - I_0) = D r$$

# Схемы сушки

---

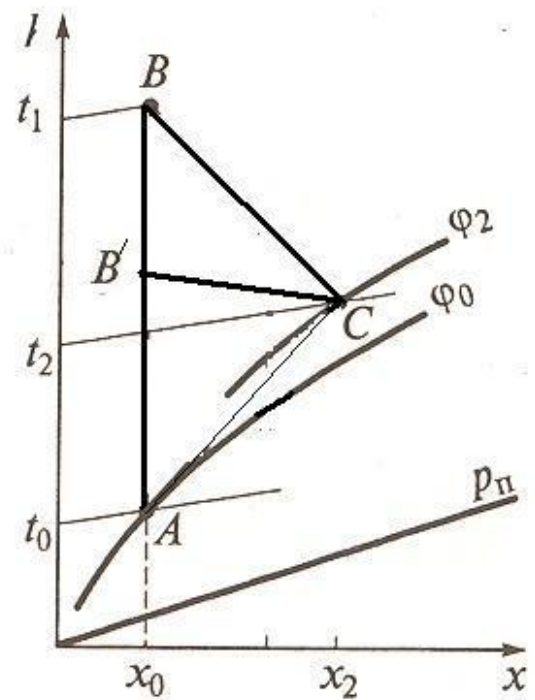
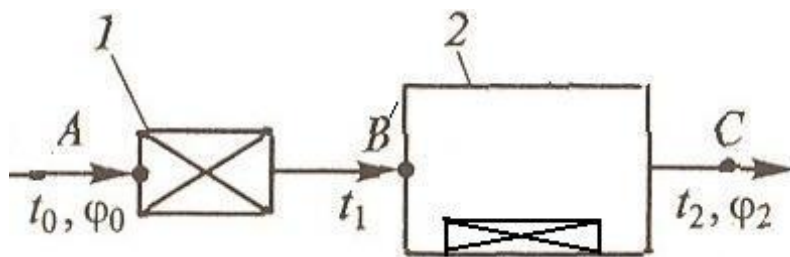
- Простая схема;
- С дополнительным подогревом;
- С промежуточным подогревом;
- С рециркуляцией отработанного воздуха;
- С замкнутой циркуляцией сушильного агента.

# Простая схема

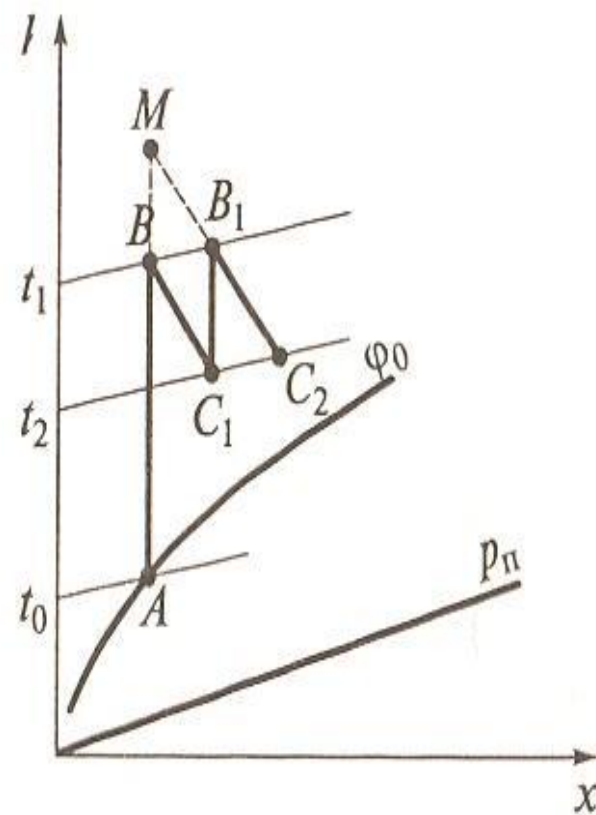
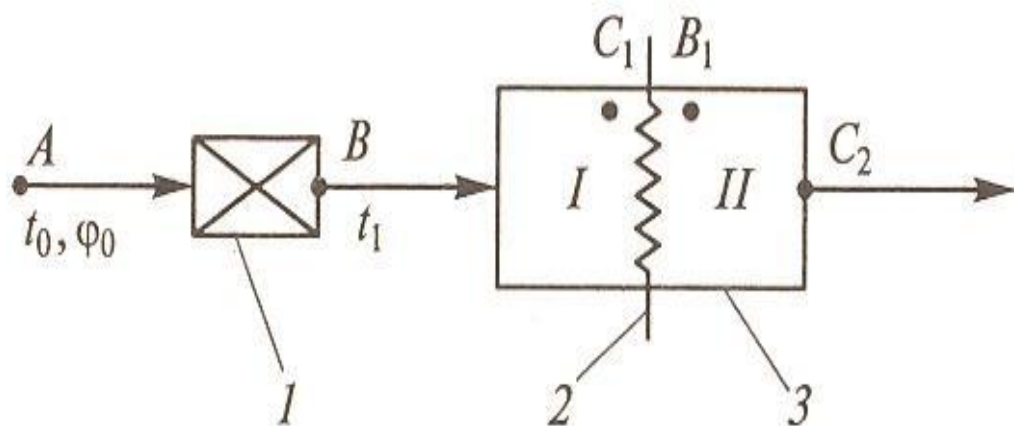




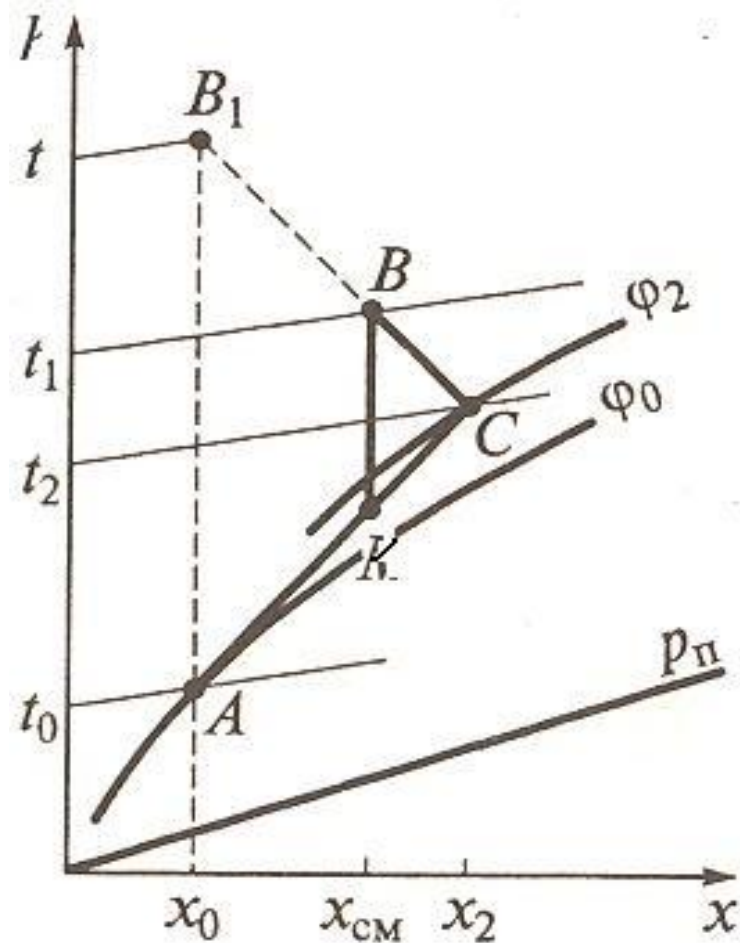
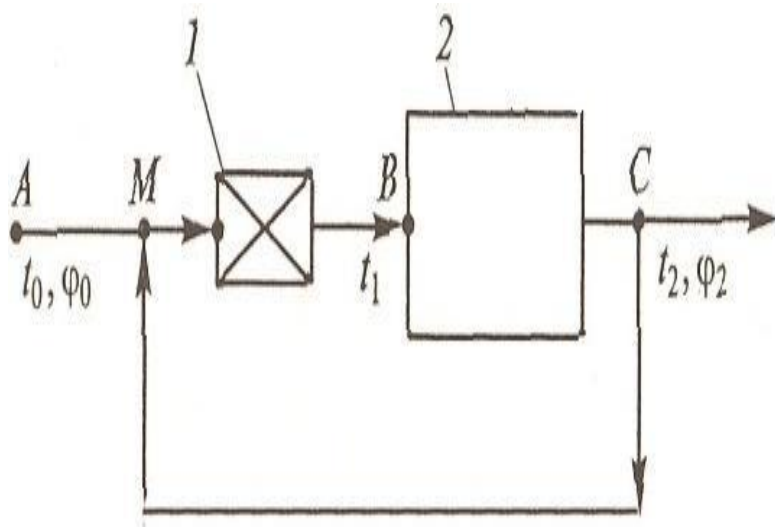
# С дополнительным подогревом



# С промежуточным подогревом



# С рециркуляцией отработанного воздуха



# Схема с замкнутой циркуляцией воздуха

