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:

$$M_{вл} = M_c + W$$

- Относительная влажность

$$u = \frac{W}{M_{вл}} 100, \%$$

- Абсолютная влажность

$$u' = \frac{W}{M_c} 100, \%$$

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 микрокапиляры, макро-капиляры тела, вследствие сил капилярного 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: $p_м = p_{пв}$

Равновесная влажность

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

Гигроскопическая точка

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

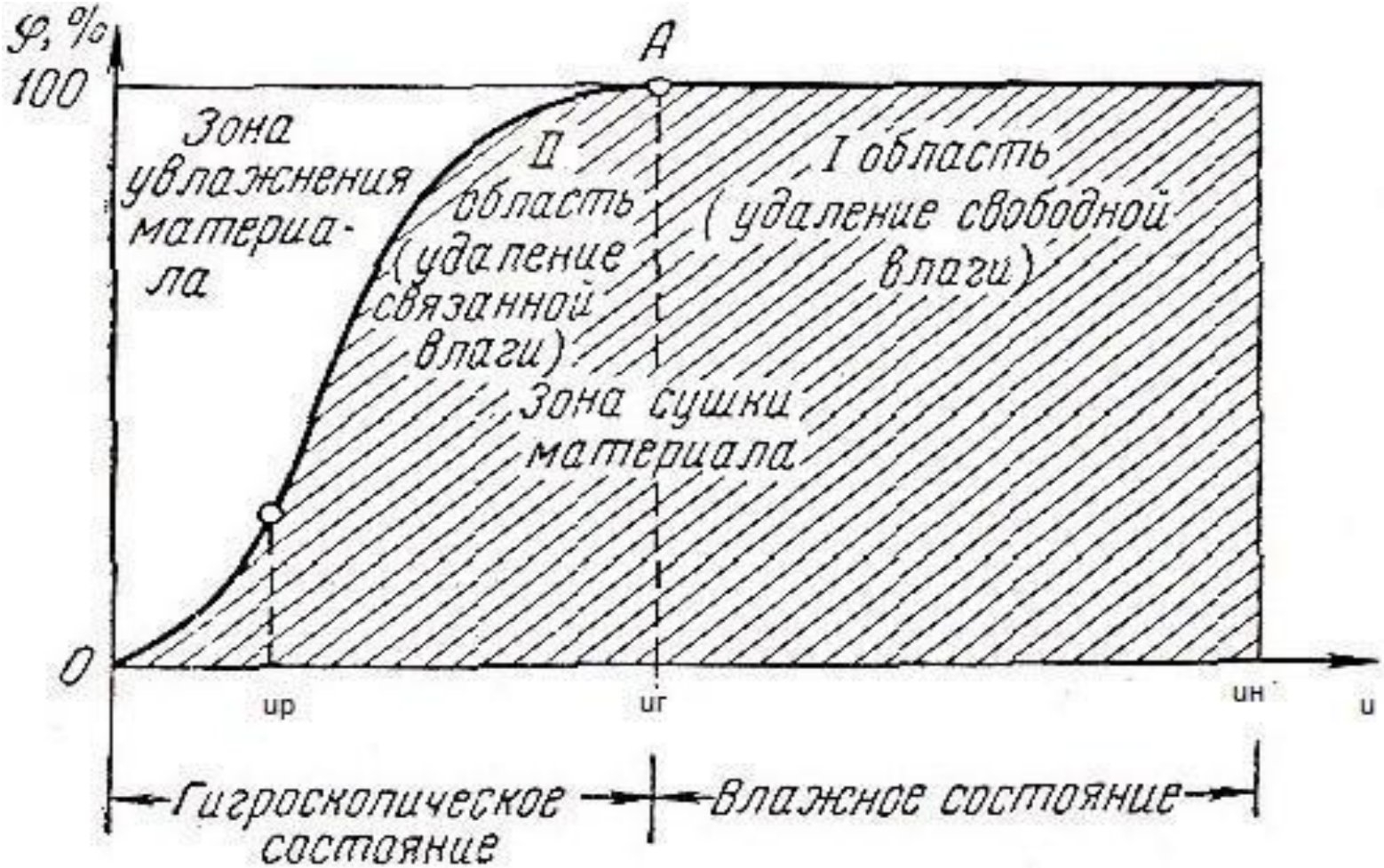
Состояние материала

- Если влажность материала больше влажности гигроскопической точки – материал находится во **влажном состоянии:** $p_м = p_{нас}$
- 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:** $p_м < p_{нас}$
- 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 сорбирует 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:

$$W = KF(p_{\text{м}}^{*} - p_{\text{пв}})$$

Влияние температуры

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

Тепловая сушка

- Контактная сушка;
- Воздушная или газовая сушка;
- Терморадиационная 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 $t_г > \Theta_м$:

$$Q_1 = \alpha F (t_г - \Theta_м)$$

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.

$$Q_2 = Wr$$

$$Q_1 = \alpha F(t_{\text{г}} - \Theta_{\text{м}})$$

- 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:

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

где k – коэффициент влагопроводности, м2/с;

Кинетика процесса сушки

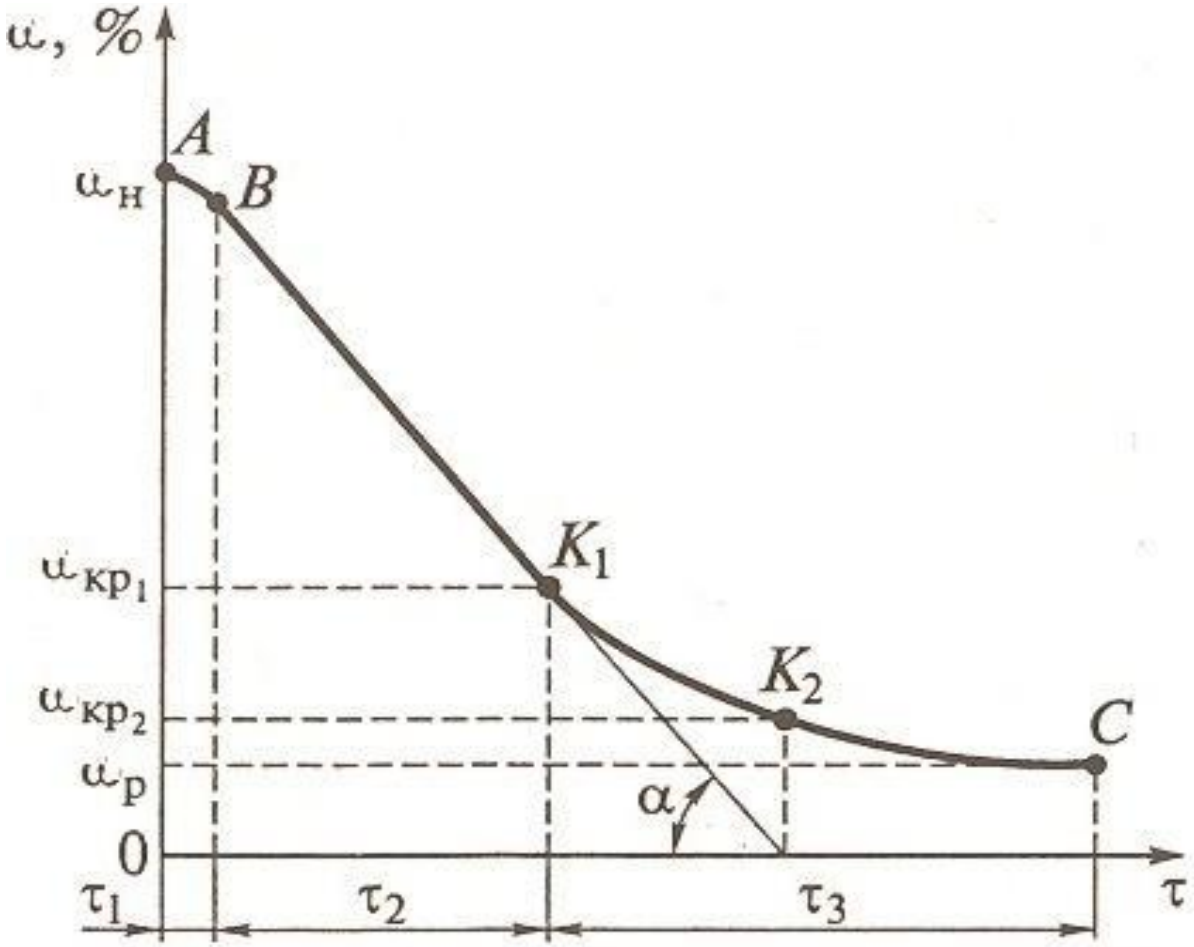
- С поверхности материала влага в виде пара передается в ядро газового потока за счет конвективной диффузии:

$$\frac{u - u_p}{u_н - u_p} = f(Bi_д; Fo_д; \frac{z}{\delta})$$

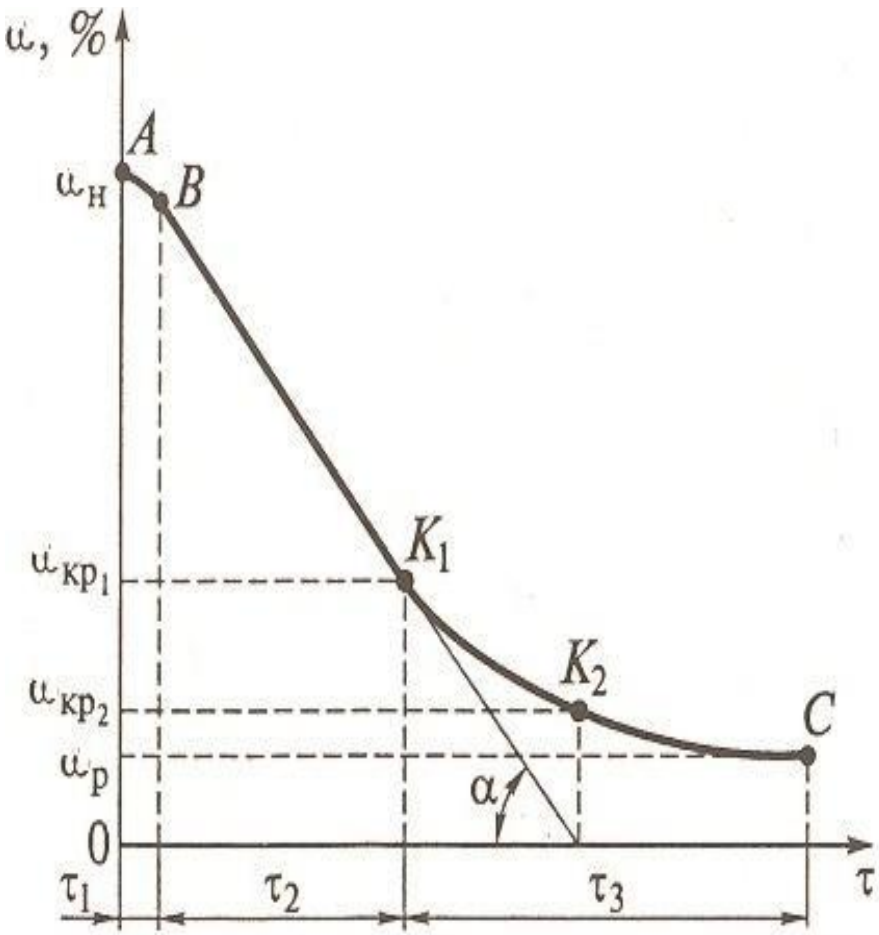
где

$$Bi_д = \frac{\beta l}{k}$$ - критерий Био

Кривая сушки



Первый период сушки



- Кинетический закон

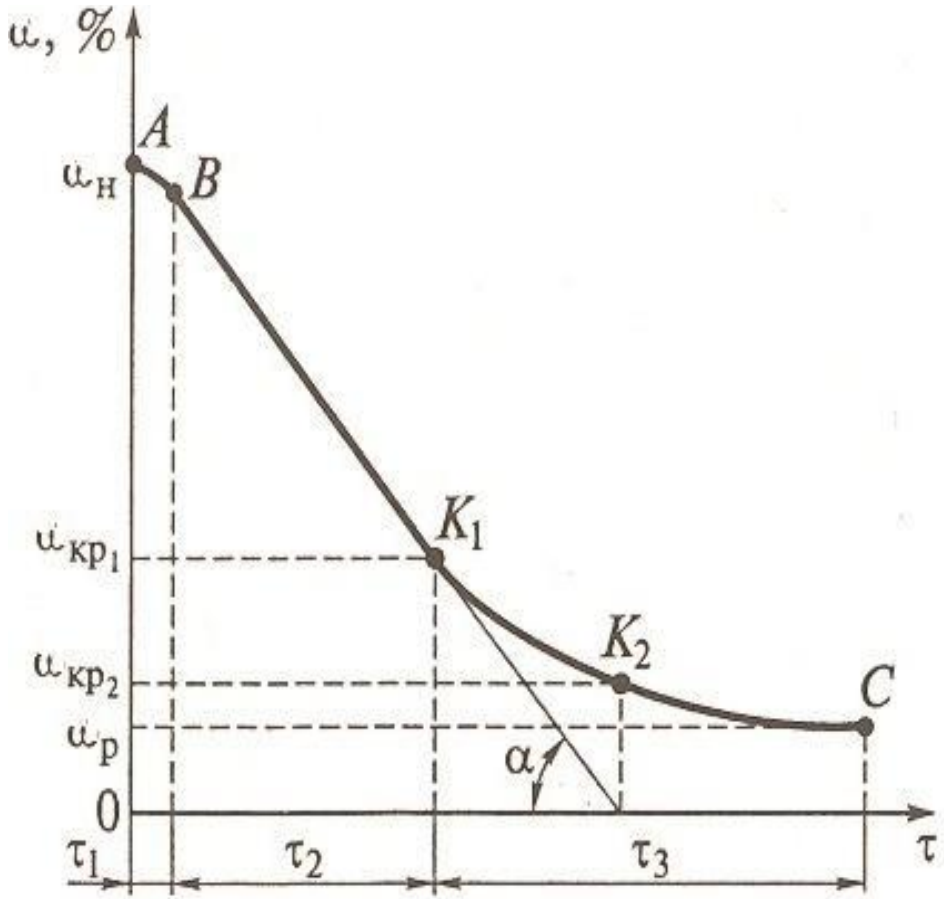
$$W = \beta_x F(x_{нас} - x) = \beta_p F(p_{нас} - p)$$

- Скорость процесса

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

- Температура материала $\Theta_м = t_м$

Второй период сушки

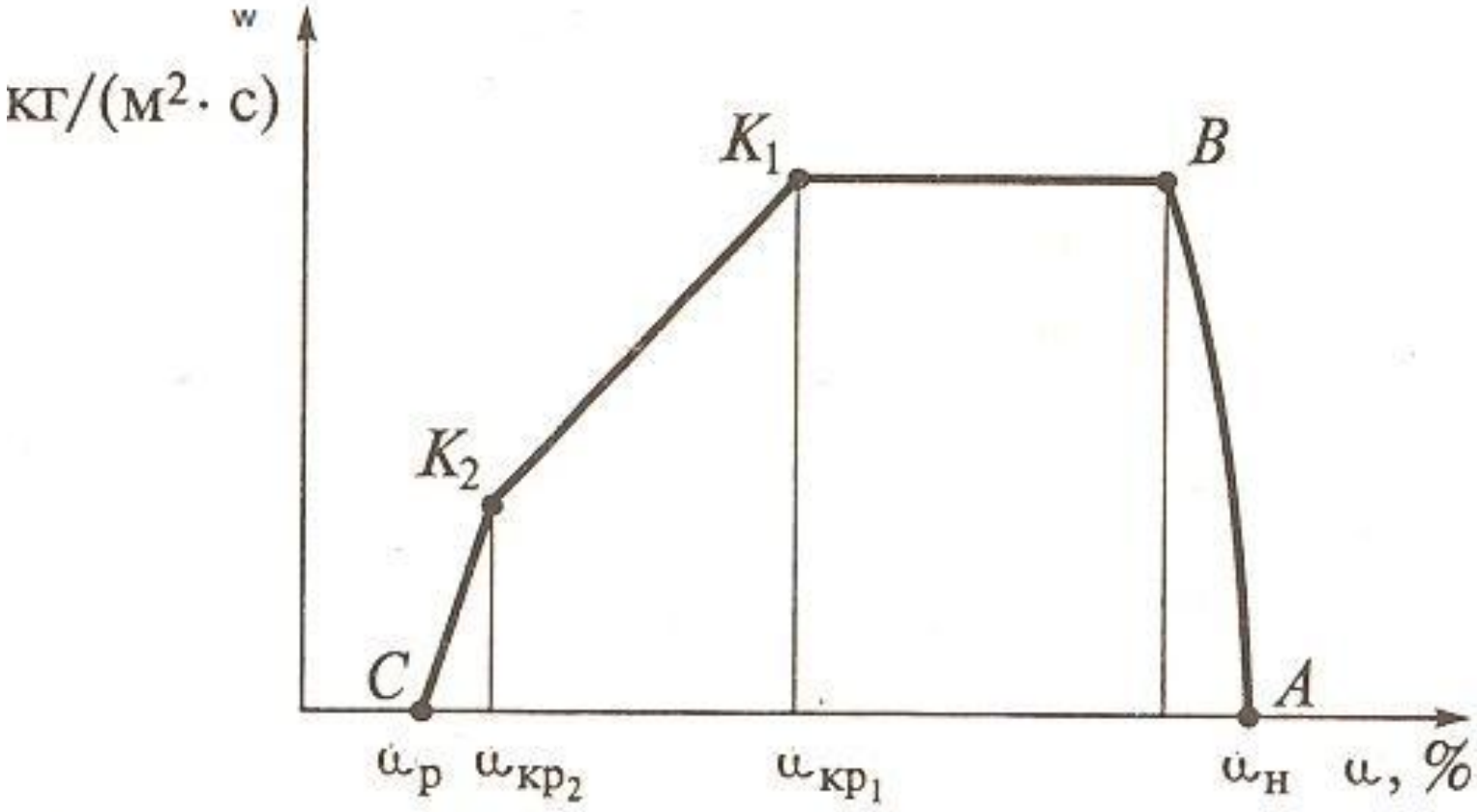


- Кинетический закон

  $$W = KF(u - u_p)$$

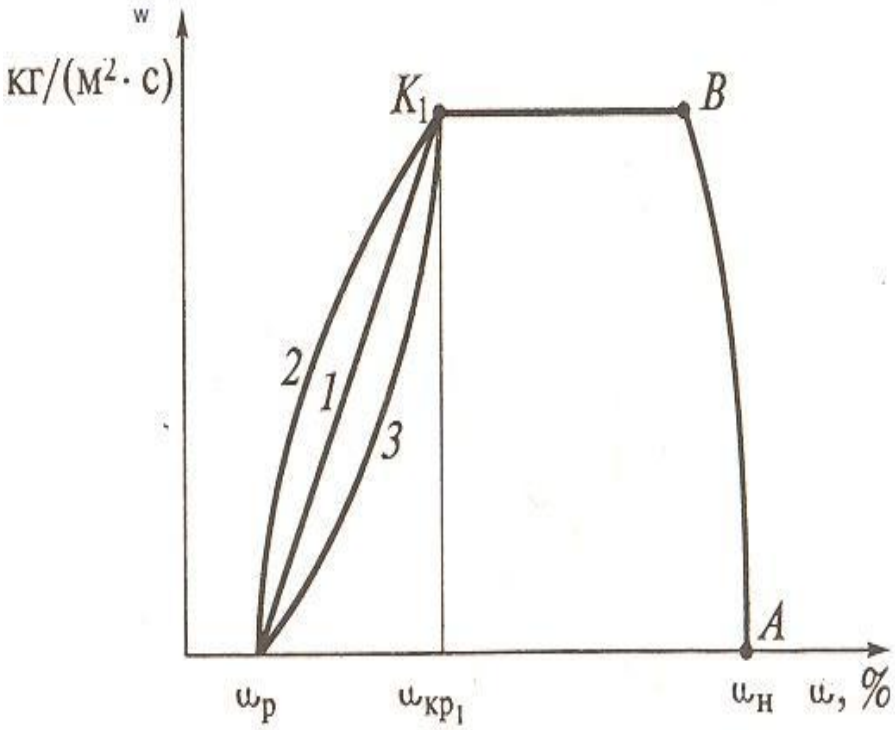
- Скорость процесса – равномерно падающая и неравномерно падающая
- Температура материала повышается до $t_в$

Кривая скорости сушки

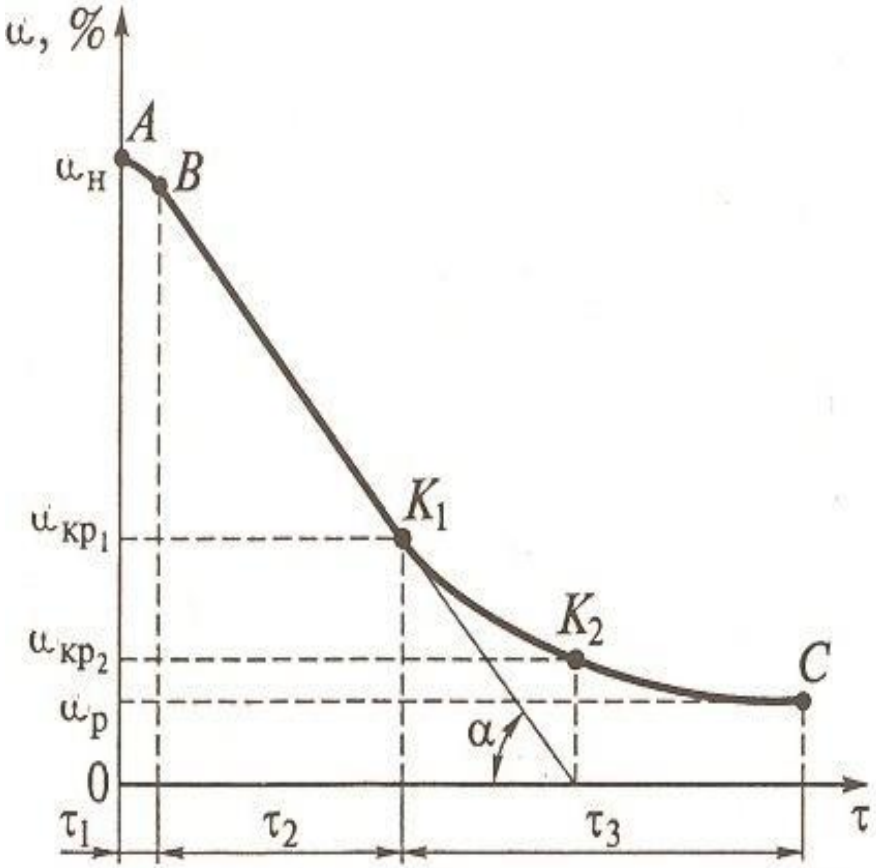


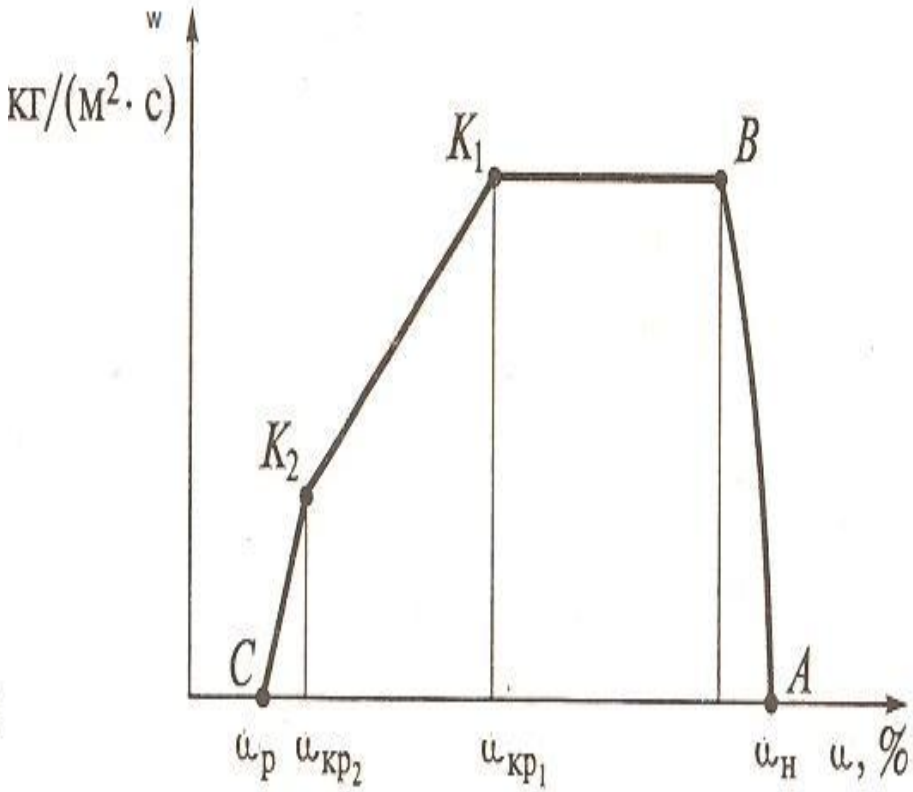
Кривая скорости сушки

- 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

$$M_н = M_к + W$$

- По абсолютно сухому веществу

$$M_н(1 - u_н) = M_к(1 - u_к)$$

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:

$$\Delta Q_{суш} = L_0(I_2 - I_0) + M_к c_к(\Theta_к - \Theta_н) - W c_{вод}\Theta_н + \Delta Q_{тр} + \Delta Q_{пот}$$

- Затраты тепла в калорифере

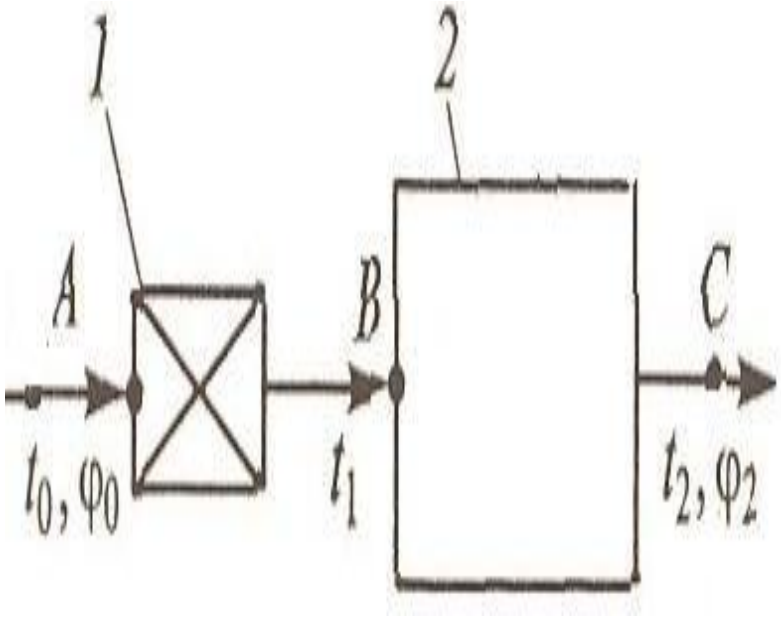
$$\Delta Q_{суш} = \Delta Q_{кал}$$

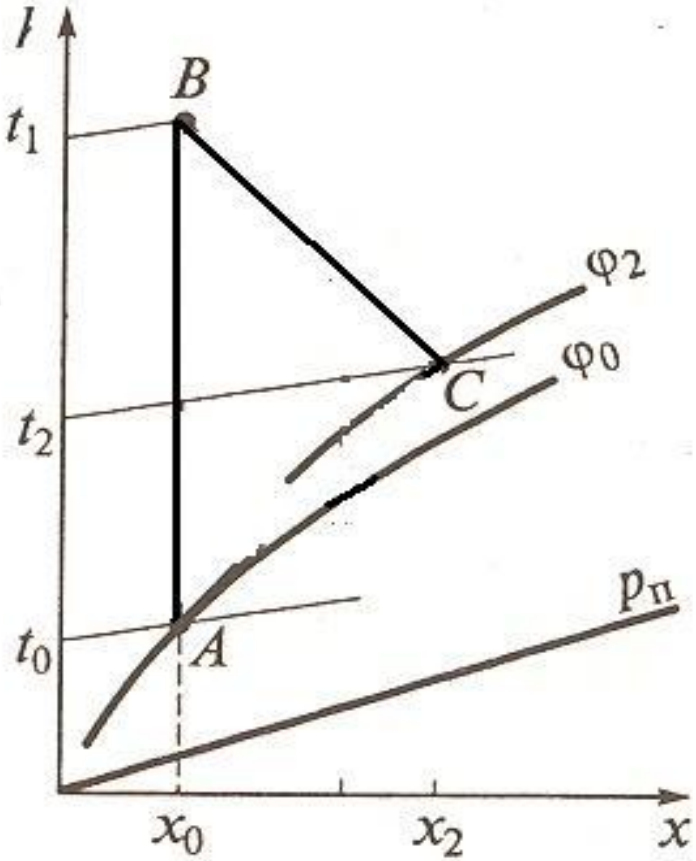
$$\Delta Q_{кал} = L_0(I_1 - I_0) = Dr$$

Схемы сушки

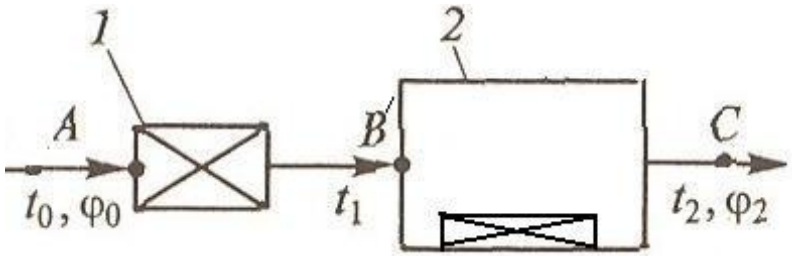
- Простая схема;
- С дополнительным подогревом;
- С промежуточным подогревом;
- С рециркуляцией отработанного воздуха;
- С замкнутой циркуляцией сушильного агента.

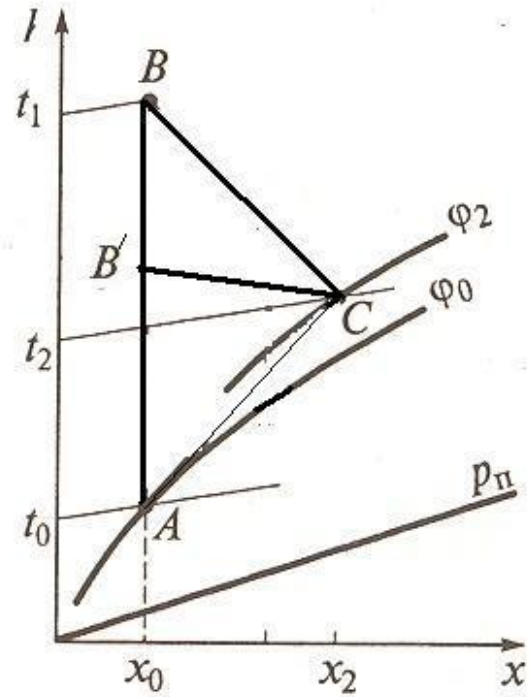
Простая схема



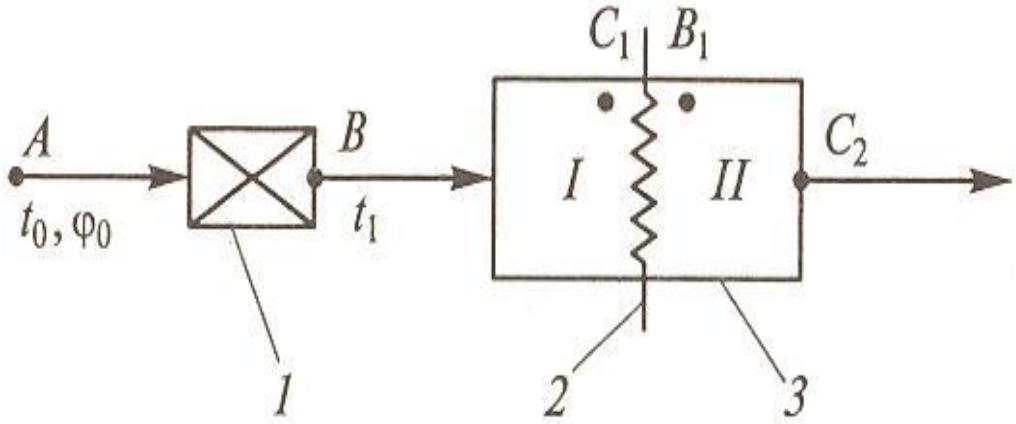


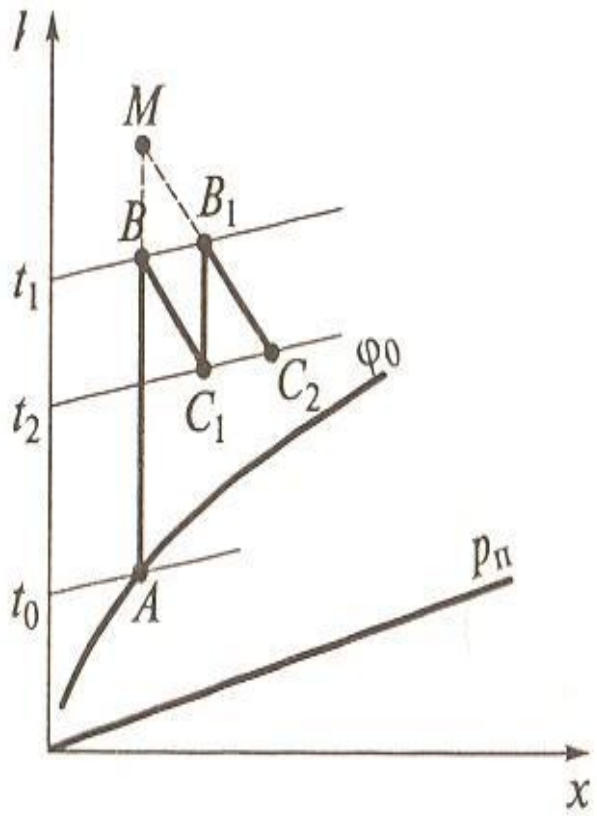
С дополнительным подогревом



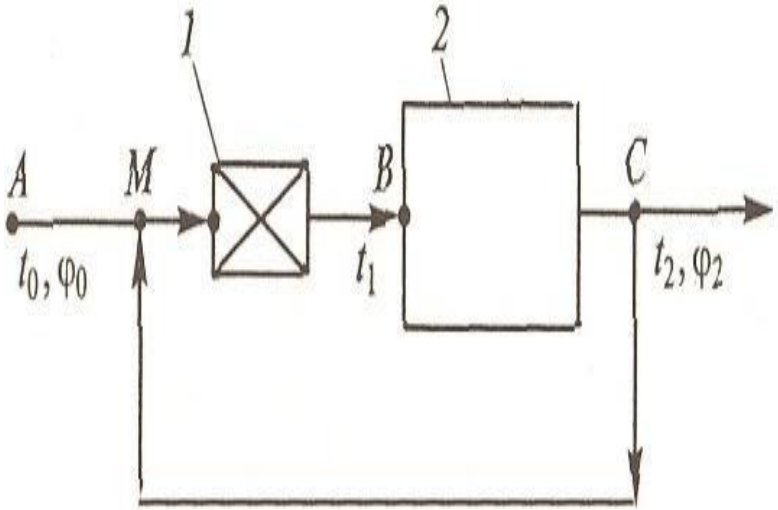


С промежуточным подогревом





С рециркуляцией отработанного воздуха



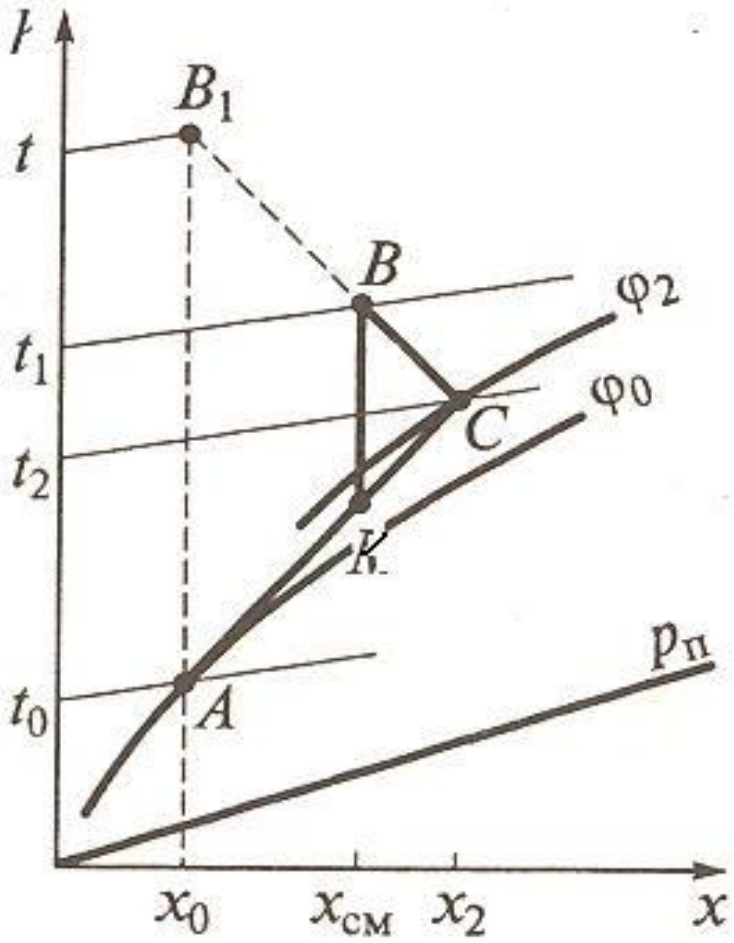
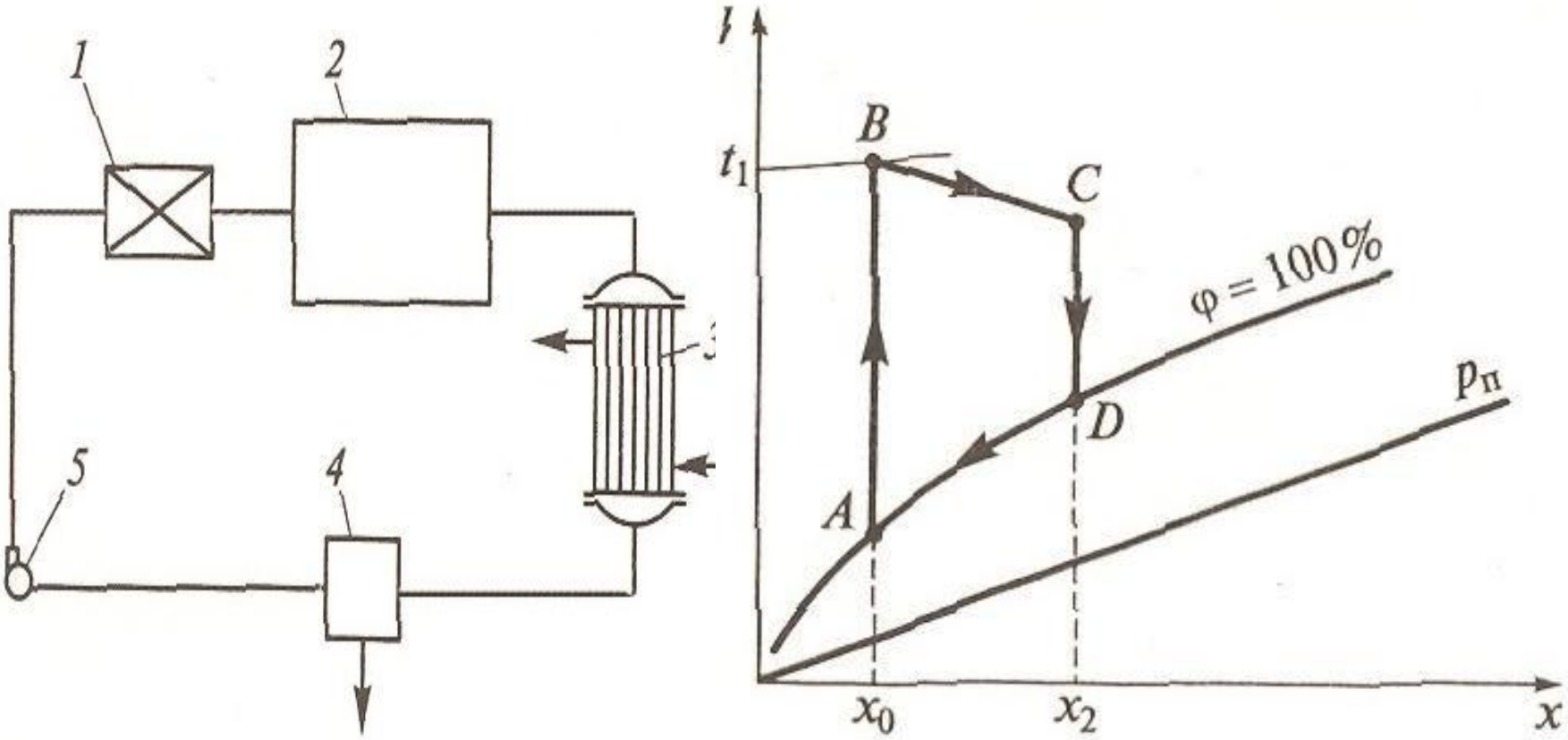



Схема с замкнутой циркуляцией воздуха