ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Кафедра промышленной теплоэнергетики

# ТМО процессы при получении кислорода

Выполнила: ст. группы М-ТЭ-18-1
Дитяткина Е.О.

Руководитель: к.т.н., доцент
Крамченков Е.М.

Липецк 2019

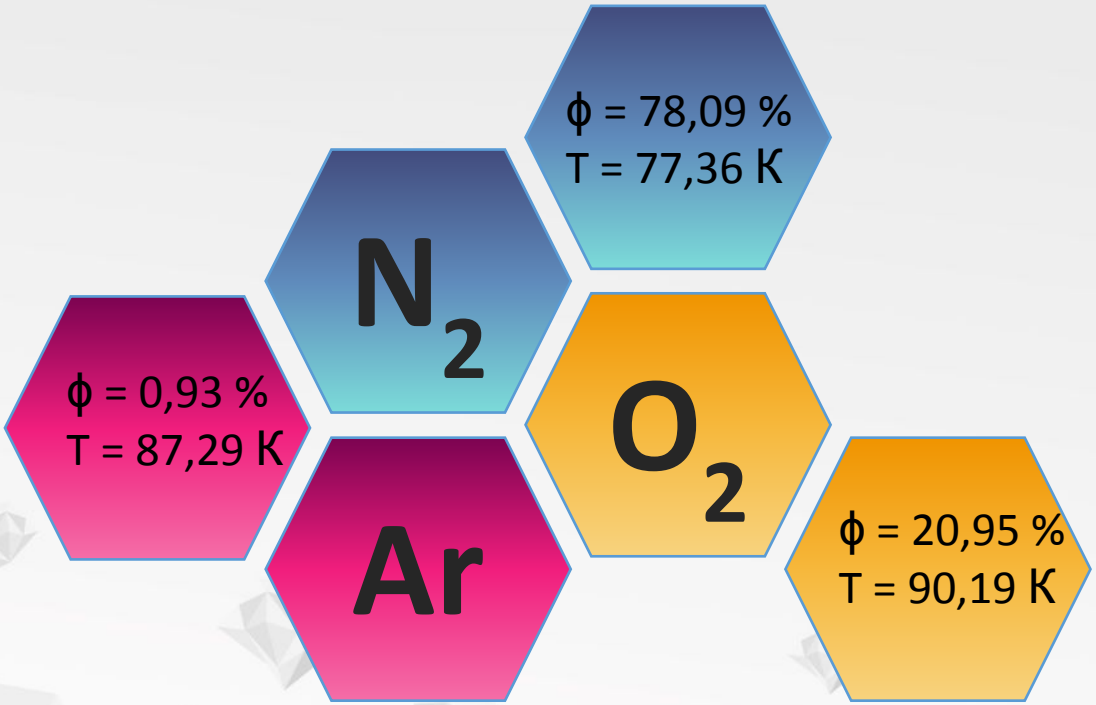
# Отрасли применение кислорода

- Цветная и черная металлургия
- Химическая промышленность
- Сварка и резка металлов
- Пищевая промышленность
- Сельское хозяйство
- Газификация твердого топлива
- Нефтеперерабатывающая промышленность
- Медицина

# Способы получения кислорода

- Криогенный (метод глубокого охлаждения)
- Мембранный
- Адсорбционный
- Электролиз воды
- Химические способы (разложение перманганата калия, бертолетовой соли или перекиси водорода в присутствии катализатора)

Ректификация - (от лат. rectus — прямой и facio — делаю) — это процесс разделения двойных или многокомпонентных смесей за счёт противоточного массо- и теплообмена между паром и жидкостью.



# Классификация воздухоразделительных установок

- Способ получения холода (холодильный цикл)

  - Цикл с дросселированием воздуха
  - Цикл с дросселированием и предварительным охлаждением
  - Цикл с расширением воздуха в детандере

- Схема ректификации

  - Однократная ректификация
  - Двукратная ректификация

- Способ очистки воздуха от углекислоты и влаги

  - Химический способ
  - Физический способ

# Основные этапы технологического процесса разделения воздуха

Очистка воздуха от пыли и механических примесей

Сжатие воздуха в компрессорах

Азотно-водяное охлаждение

Осушка воздуха

Очистка воздуха от углекислого газа

Очистка воздуха от углеводородов

Охлаждение воздуха в теплообменниках

Сжижение и ректификация воздуха для получения азота, кислорода и редких газов

Очистка редких газов

# Аппарат однократной ректификации

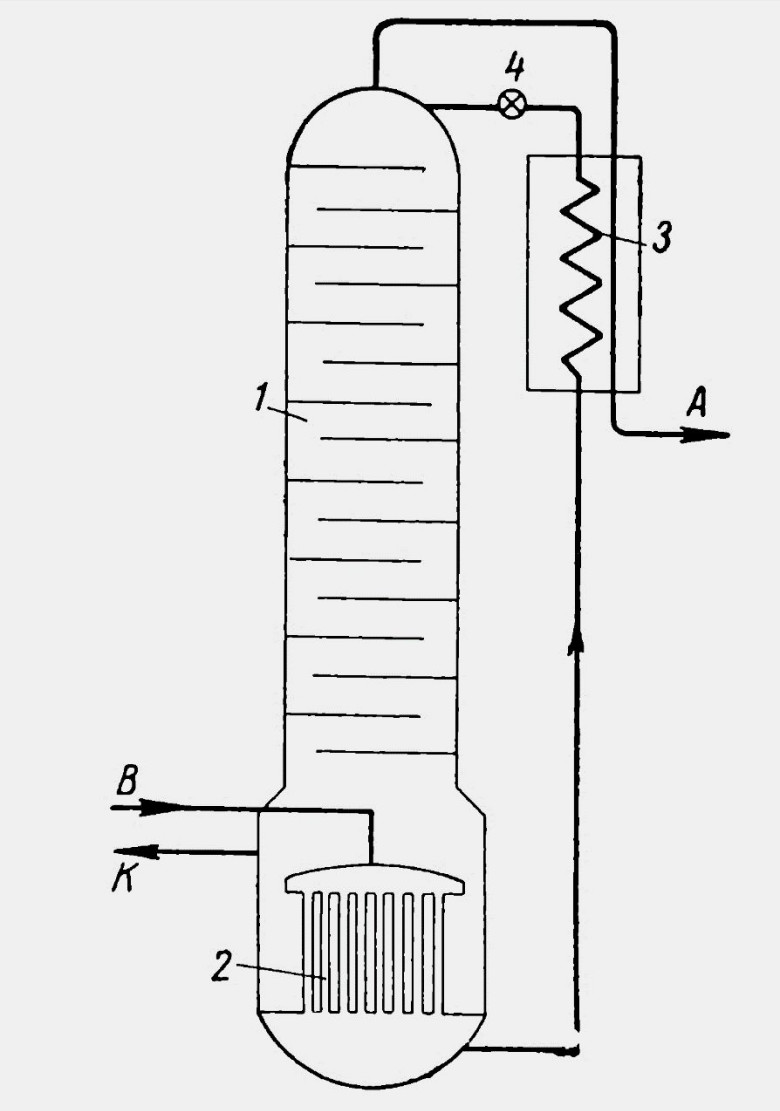



Рисунок 2. Схема разделительного аппарата однократной ректификации

1 – ректификационная колонна;

2 – конденсатор – испаритель;

3 – переохладитель флегмы;

4 – дроссельный вентиль;

В – воздух;

К – кислород;

А – азот;

# Аппараты двукратной ректификации

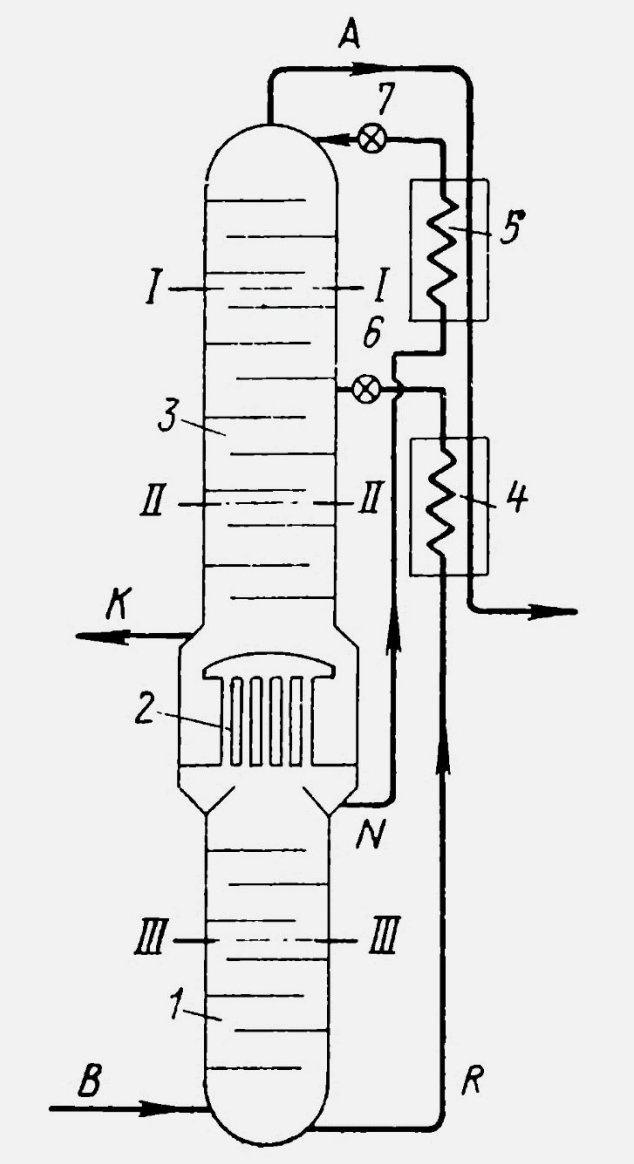



Рисунок 3. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с подачей воздуха непосредственно в куб колонны

1 – нижняя ректификационная колонна;
2 – конденсатор – испаритель;
3 – верхняя ректификационная колонна;
4 – переохладитель кубовой жидкости;
5 – переохладитель азотной флегмы;
6 – дроссельный вентиль кубовой жидкости;
7 – дроссельный вентиль азотной флегмы;
В – воздух;
К – кислород;
А – азот;
R – кубовая жидкость;
N – азотная флегма;

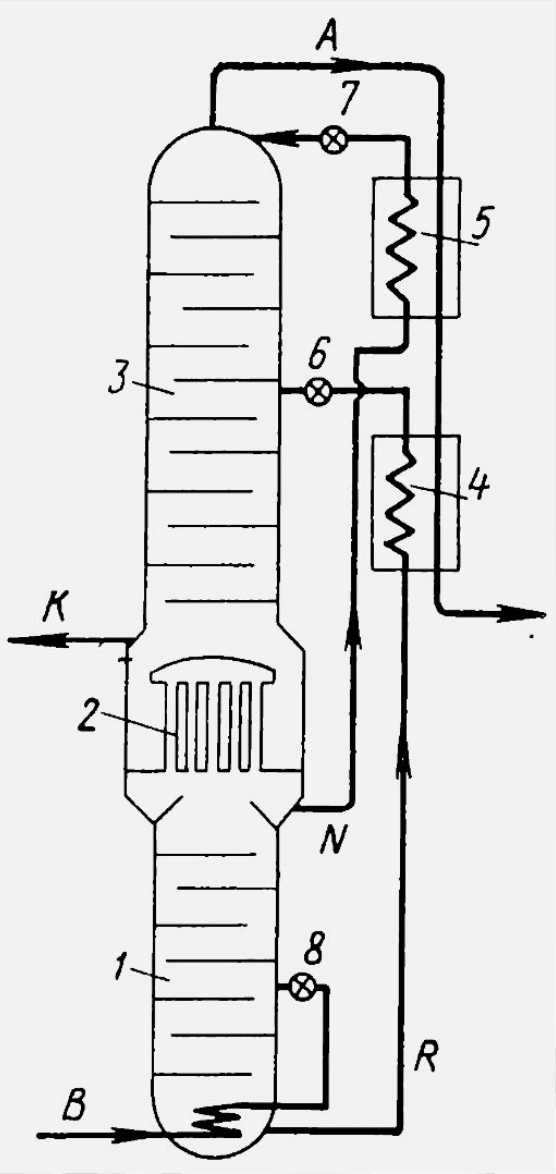



Рисунок 4. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с змеевиком

1 – нижняя ректификационная колонна;
2 – конденсатор – испаритель;
3 – верхняя ректификационная колонна;
4 – переохладитель кубовой жидкости;
5 – переохладитель азотной флегмы;
6 – дроссельный вентиль кубовой жидкости;
7 – дроссельный вентиль азотной флегмы;
8 – дроссельный вентиль воздуха высокого давления;
B – воздух;
K – кислород;
A – азот;
R – кубовая жидкость;
N – азотная флегма;

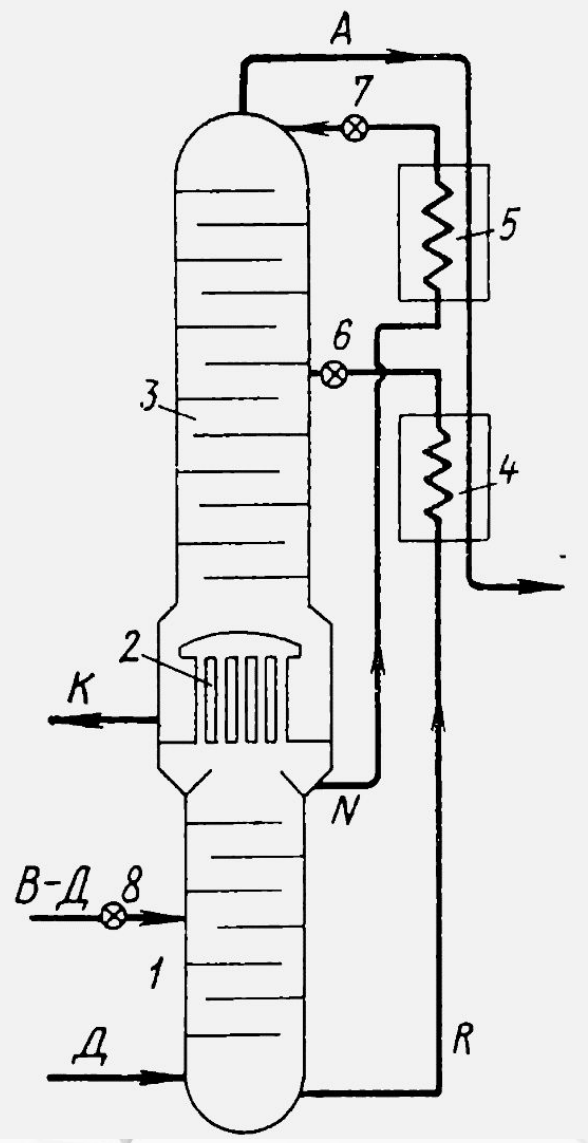



Рисунок 5. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с подачей воздуха в два потока в куб колонны

1 – нижняя ректификационная колонна;
2 – конденсатор – испаритель;
3 – верхняя ректификационная колонна;
4 – переохладитель кубовой жидкости;
5 – переохладитель азотной флегмы;
6 – дроссельный вентиль кубовой жидкости;
7 – дроссельный вентиль азотной флегмы;
8 – дроссельный вентиль воздуха высокого давления;
Д – газообразный воздух;
В – Д – жидкий воздух;
К – кислород;
А – азот;
R – кубовая жидкость;
N – азотная флегма;

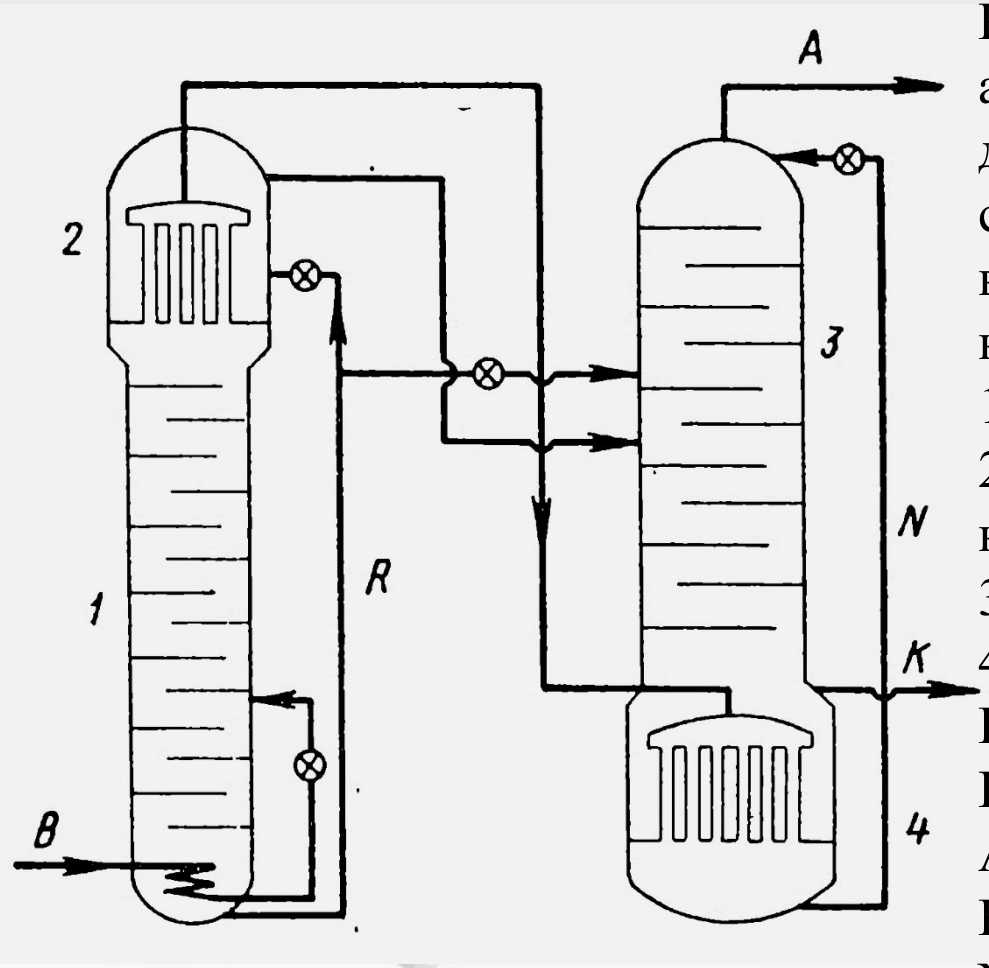



Рисунок 6. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с расположением верхней и нижней колонн на одном уровне

1 – нижняя ректификационная колонна;
2 – конденсатор – испаритель нижней колонны;
3 – верхняя ректификационная колонна;
4 – испаритель верхней колонны;
В – воздух;
К – кислород;
А – азот;
R – кубовая жидкость;
N – азотная флегма;

# Основные ТМО процессы протекающие в аппаратах низкотемпературной ректификации

| | | |
|---|---|---|
| Конденсация | Испарение | Ректификация |

# Теплоотдача при конденсации пара в аппаратах низкотемпературной ректификации

$$Nu = 0{,}925\left(\frac{Re'}{Ga}\right)^{-1/3}$$

где $Nu$ – число Нуссельта;

$Ga = \frac{ql^3}{\nu^2}$ – критерий Галилея;

$Re' = \frac{ql}{r\nu\rho_ж}$ – критерий Рейнольдса для стекающей пленки конденсата.

# Влияние твердых примесей на процесс конденсации

При малой интенсивности процесса на поверхности теплообмена высаживаются мельчайшие кристаллы твердых примесей ($H_2O$, $CO_2$, и др)

$$Re' \leq 8 \cdot 10^{-14} \frac{q}{\nu^2}$$

$$\alpha_{\text{конд}} = 1{,}06 \cdot 10^8 \lambda \left( \frac{Re'}{g/\nu^2} \right)^{\frac{7}{25}}$$

При больших тепловых нагрузках кристаллы смываются с поверхности теплообмена

$$Re' > 8 \cdot 10^{-14} \frac{g}{\nu^2}$$

$$Nu = C_1 \left( \frac{Re'}{Ga} \right)^{-1/3}$$

# Влияние неконденсируемых примесей на процесс конденсации

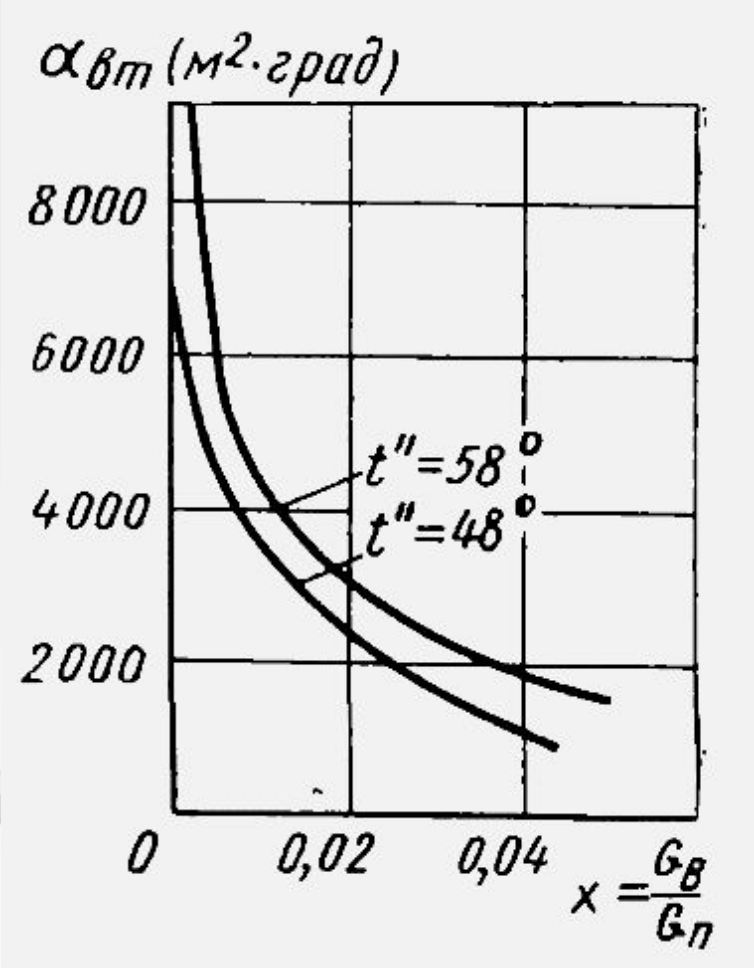



Рисунок 10. Опытные значения коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе в присутствии воздуха

# Теплоотдача при кипении в аппаратах низкотемпературной ректификации

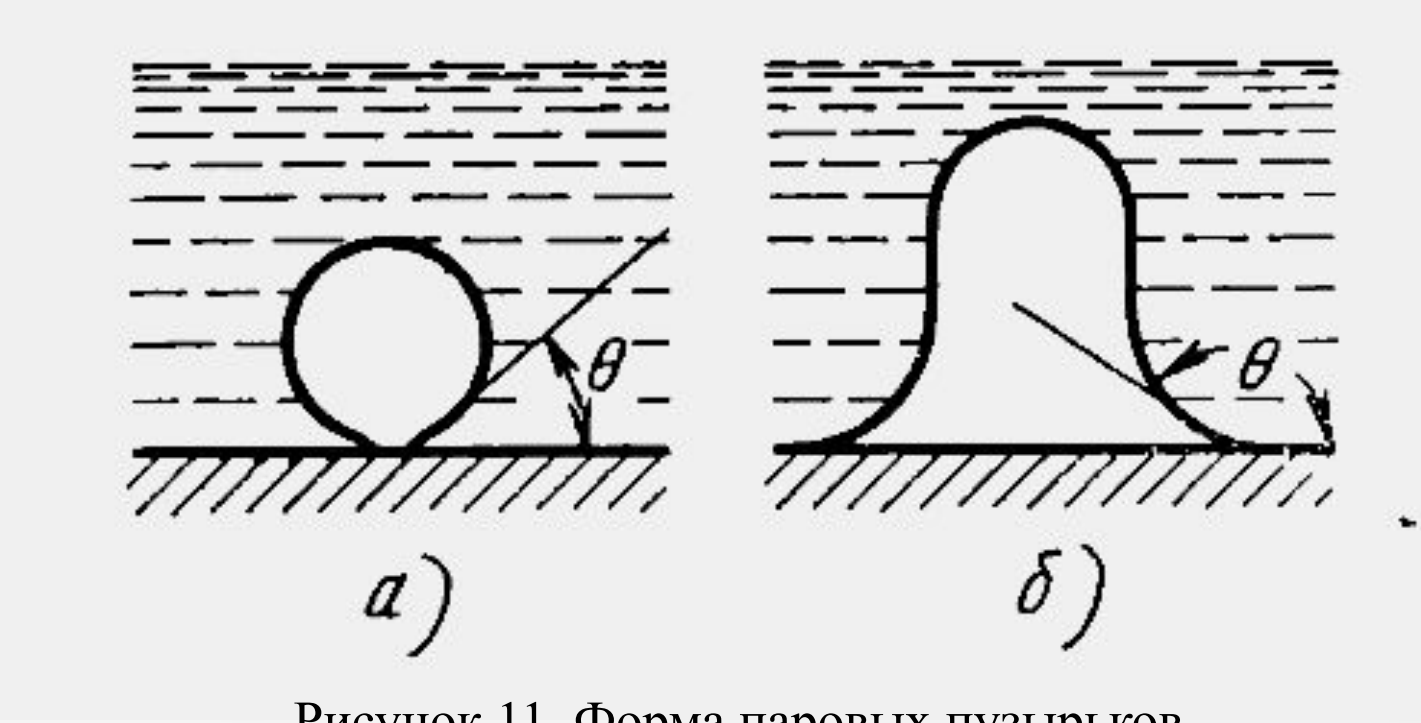



Рисунок 11. Форма паровых пузырьков из смачиваемой (а) и несмачиваемой (б) поверхности

# Расчетная формула для определения коэффициента теплоотдачи при давлении близком к атмосферному

$$Nu = 0{,}1\, Pr^{0{,}35} W^{0{,}7} H^{-m}$$

где $Nu = \frac{\alpha}{\lambda}\left(\frac{\sigma}{\rho_ж - \rho_п}\right)^{0{,}5}$ - число Нуссельта;

$W = \frac{4q\left(\frac{l}{d}\right)^{0{,}65}\left(\frac{\sigma}{\rho_ж - \rho_п}\right)^{0{,}5}}{r\nu\rho_п}$ - безразмерная величина (аналог критерия Re);

$H = \frac{h}{l}$ -относительный кажущийся уровень жидкости в трубах.

# Основное уравнение массообмена

$$j = \frac{1}{R_\mu}(\mu_ж - \mu_г) = K_\mu(\mu_ж - \mu_г)$$

где $j$ – удельный диффузионный поток данного компонента, перешедшего из одной фазы в другую через единицу поверхности контакта в единицу времени;

$R_\mu$ - сопротивление системы процессу массообмена;

$K_\mu$ - коэффициент скорости массопередачи данного компонента;

$\mu_ж$ и $\mu_г$ - химические потенциалы распределяемого компонента.

$$j = \beta_ж(x - x_{гр})$$

$$j = \beta_г(y_{гр} - y)$$

где $\beta_ж$ и $\beta_г$ - коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах;

$x_{гр}$ и $y_{гр}$ - концентрации жидкости и пара на границе раздела фаз.

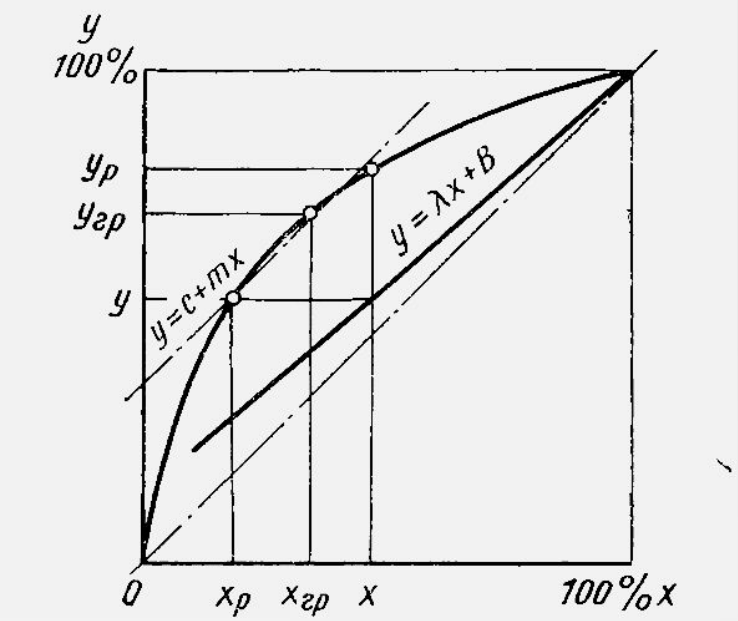



Рисунок 13. График для определения движущей силы процесса

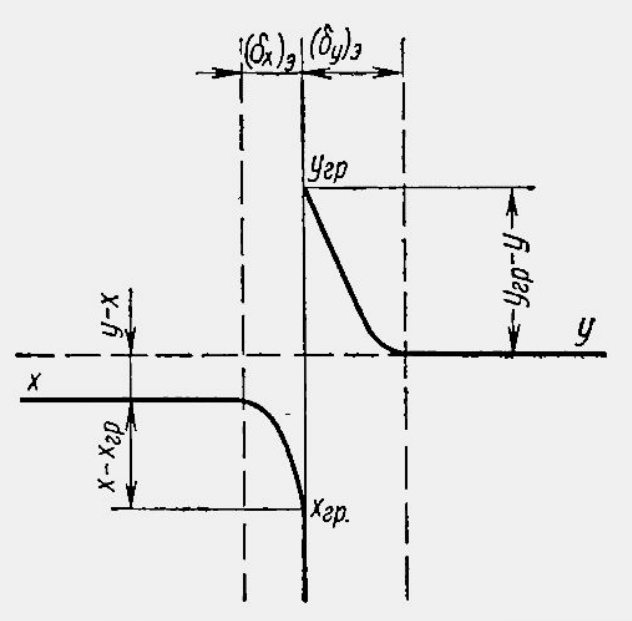



Рисунок 14. Схема распределения концентраций вблизи границы раздела фаз при их турбулентном течении

$$\beta = \frac{D}{\delta_э}$$

где $D$ – коэффициент диффузии данного компонента;
$\delta_э$- эффективная толщина диффузионного пограничного слоя.

$$\mathrm{M}dy = K_y(y_р - y)dF$$

$$Ldx = K_x(x - x_р)dF$$

где $L$ и M – расходы потоков жидкости и пара;
$dx$ и $dy$ – изменения концентрации данного компонента в соответствующих фазах;
$dF$ – поверхность контакта фаз на элементарном участке колонны $dH$;
$K_y$ и $K_x$ – общие коэффициенты массопередачи, отнесенные к концентрации газовой или жидкой фазы.

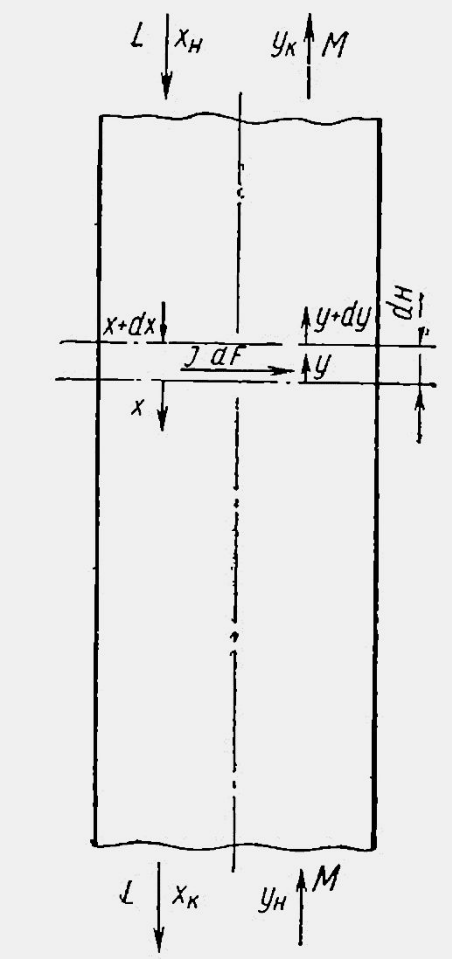



Рисунок 15. Схема участка колонны с противоточным непрерывным контактом фаз

$$(y_к - y_н) = \frac{K_y F}{M} \overrightarrow{\Delta y}$$

$$(x_н - x_к) = \frac{K_y F}{L} \overrightarrow{\Delta x}$$

где $\overrightarrow{\Delta x}$ и $\overrightarrow{\Delta y}$ – среднииe движущие силы процесса.