

ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Кафедра промышленной теплоэнергетики

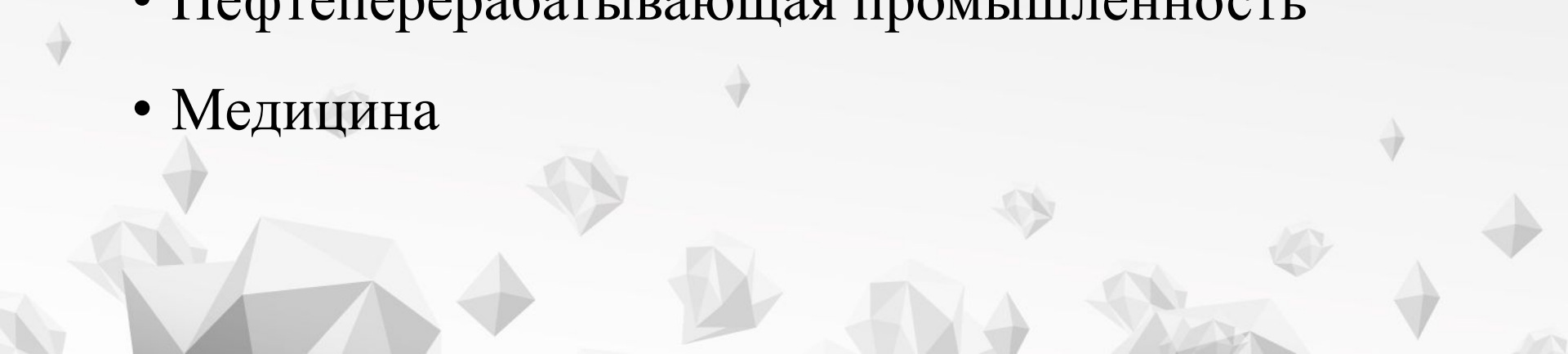
# ТМО процессы при получении кислорода

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

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

Липецк 2019

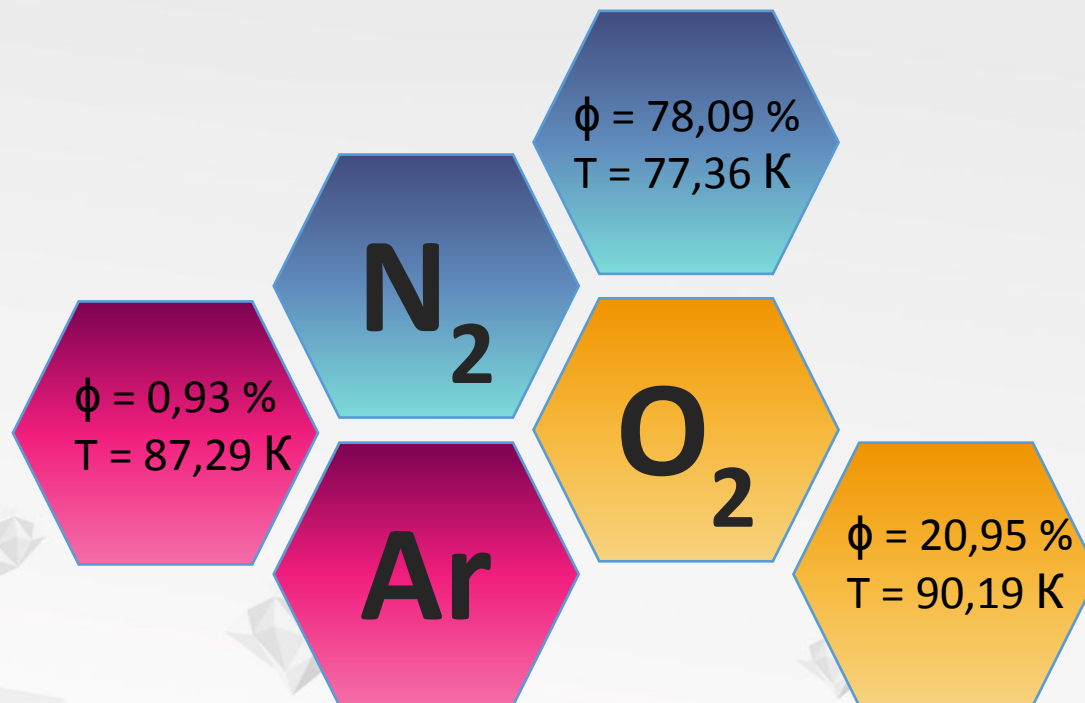
# Отрасли применение кислорода

- Цветная и черная металлургия
  - Химическая промышленность
  - Сварка и резка металлов
  - Пищевая промышленность
  - Сельское хозяйство
  - Газификация твердого топлива
  - Нефтеперерабатывающая промышленность
  - Медицина
- 
- The bottom of the slide features a decorative pattern of various-sized, semi-transparent, light gray geometric shapes, including triangles and polygons, scattered across the width of the page.

# 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

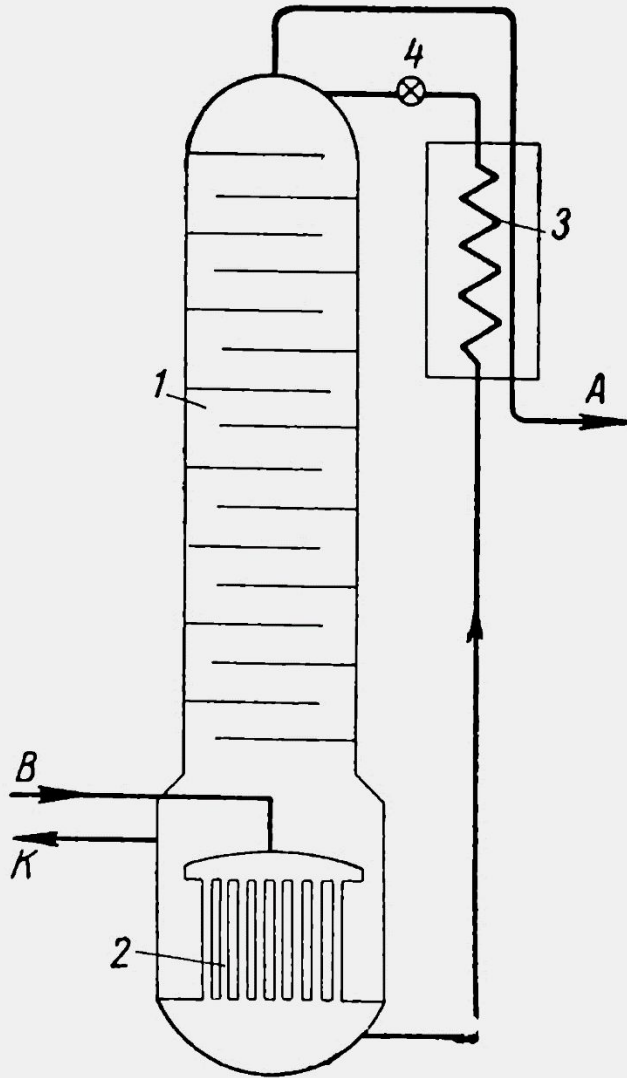


Рисунок 2. Схема  
разделительного аппарата  
однократной ректификации  
1 – ректификационная колонна;  
2 – конденсатор – испаритель;  
3 – переохладитель флегмы;  
4 – дроссельный вентиль;  
В – воздух;  
К – кислород;  
А – азот;





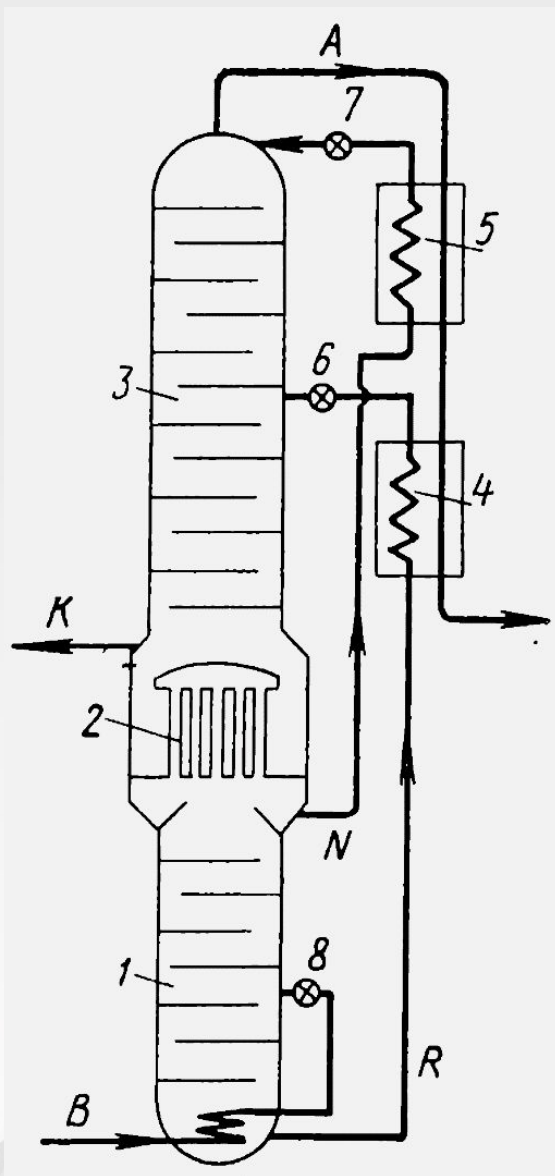


Рисунок 4. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с змеевиком

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;

В – воздух;

К – кислород;

А – азот;

Р – кубовая жидкость;

Н – азотная флегма;

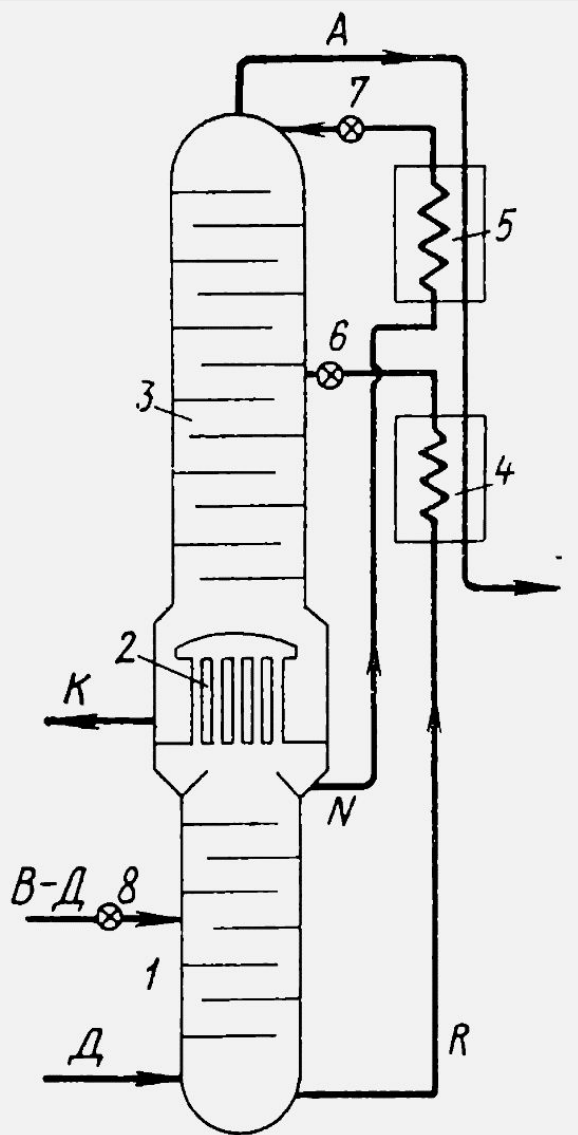


Рисунок 5. Схема разделительного аппарата двукратной ректификации с подачей воздуха в два потока в куб колонны

- 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;

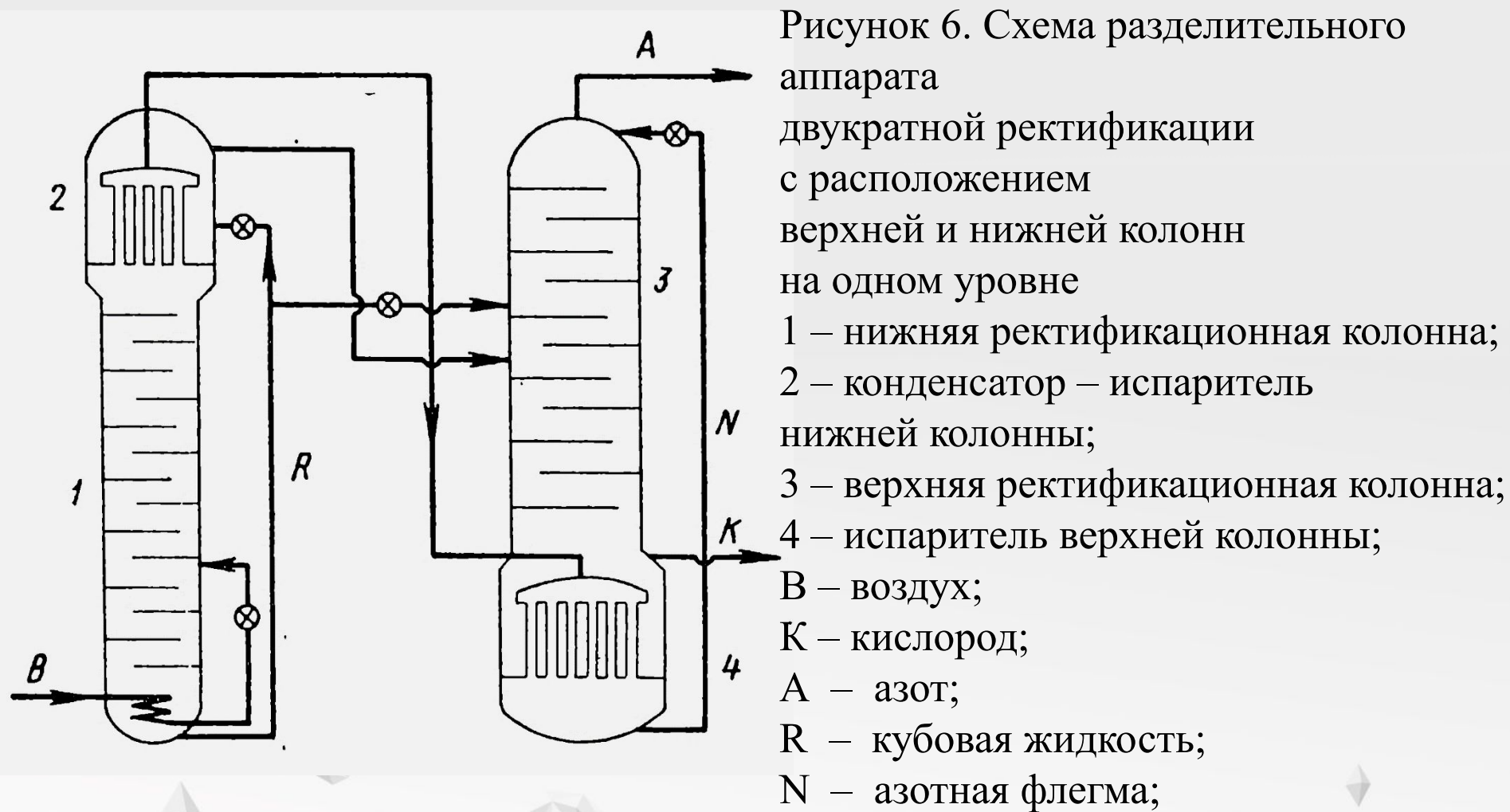
В – Д – жидкий воздух;

К – кислород;

А – азот;

Р – кубовая жидкость;

Н – 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)

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

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

При больших тепловых нагрузках кристаллы смываются с поверхности теплообмена

$$Re' > 8 \cdot 10^{-14} \frac{q}{v^2}$$

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

# Влияние неконденсируемых примесей на процесс конденсации

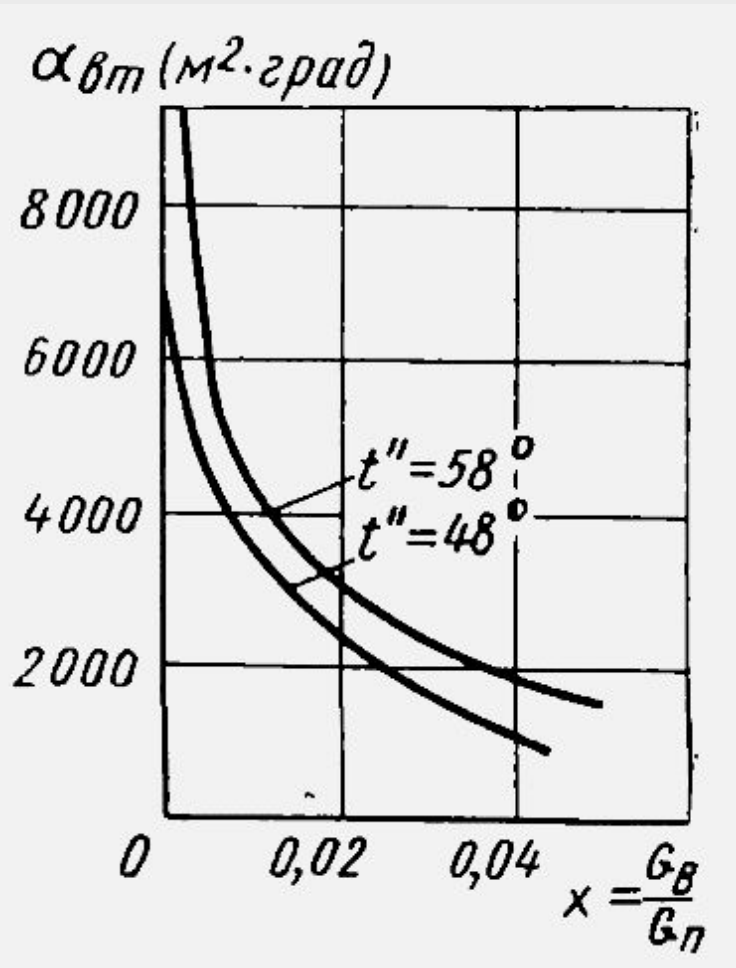


Рисунок 10. Опытные значения коэффициента теплоотдачи при конденсации водяного пара на горизонтальной трубе в присутствии воздуха

# Теплоотдача при кипении в аппаратах низкотемпературной ректификации

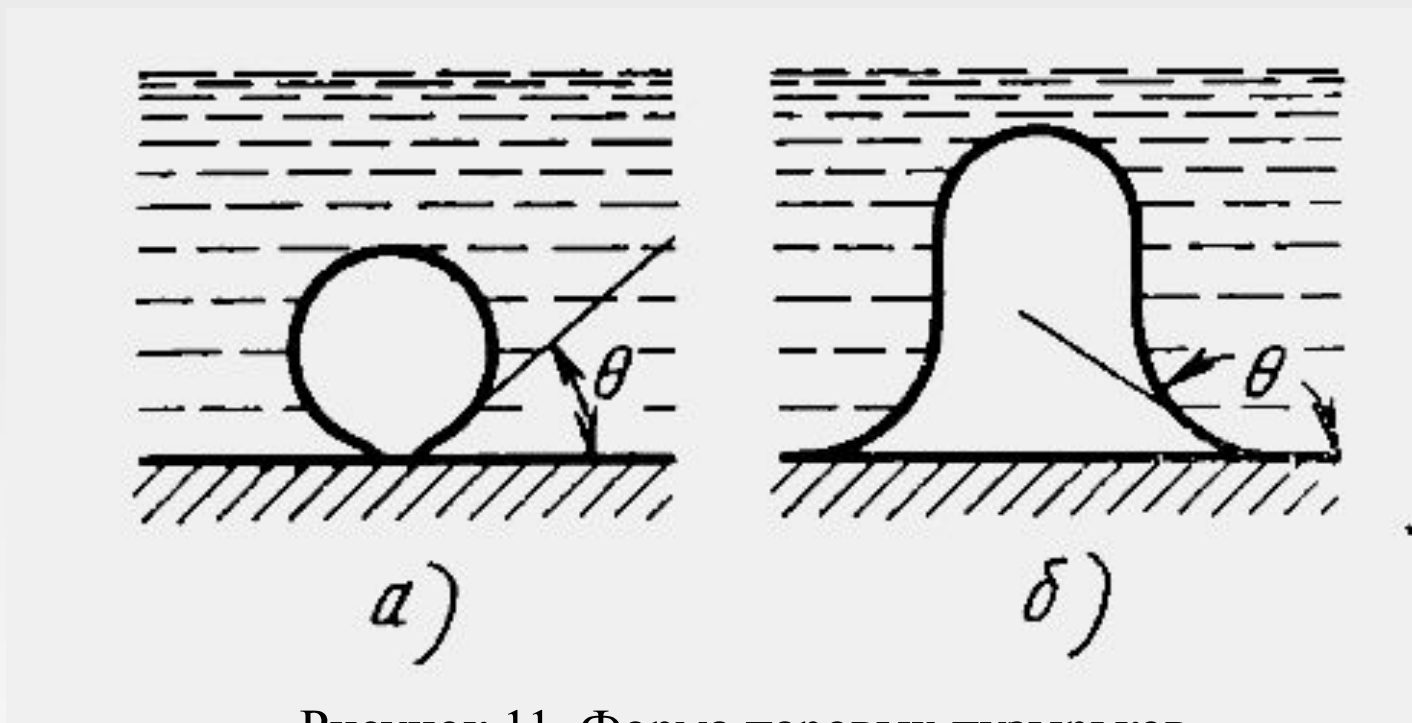


Рисунок 11. Форма паровых пузырьков  
из смачиваемой (а) и несмачиваемой (б)  
поверхности



# 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;

$W = \frac{4q \left( \frac{l}{d} \right)^{0,65} \left( \frac{\sigma}{\rho_{ж} - \rho_{п}} \right)^{0,5}}{rv\rho_{п}}$  - безразмерная величина

(аналог критерия Re);

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

## Основное уравнение массообмена

$$j = \frac{1}{R_{\mu}} (\mu_{\text{ж}} - \mu_{\text{г}}) = K_{\mu} (\mu_{\text{ж}} - \mu_{\text{г}})$$

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;

$\mu_{\text{ж}}$  и  $\mu_{\text{г}}$  - химические потенциалы распределяемого компонента.

$$j = \beta_{\text{ж}} (x - x_{\text{гр}})$$

$$j = \beta_{\text{г}} (y_{\text{гр}} - y)$$

где  $\beta_{\text{ж}}$  и  $\beta_{\text{г}}$  - коэффициенты массоотдачи в жидкой и газовой фазах;  
 $x_{\text{гр}}$  и  $y_{\text{гр}}$  - концентрации жидкости и пара на границе раздела фаз.

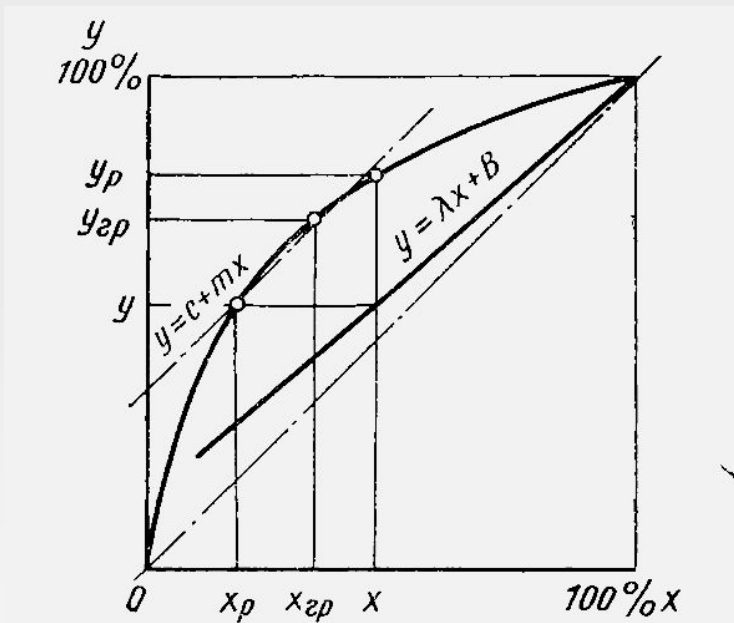


Рисунок 13. График для определения движущей силы процесса

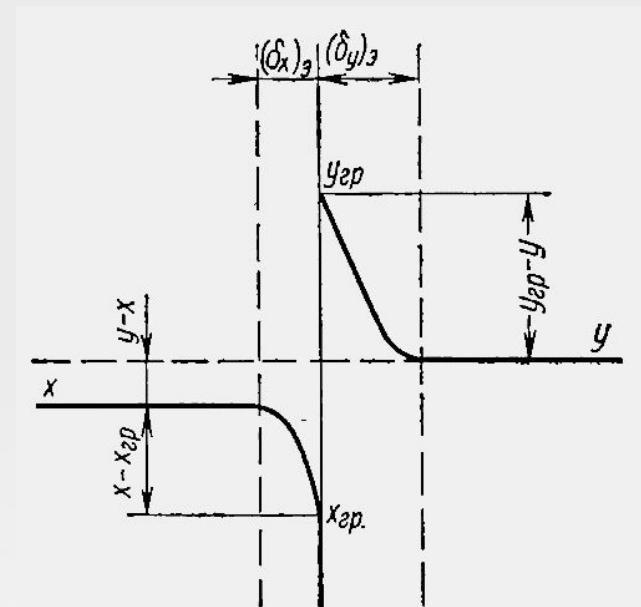


Рисунок 14. Схема распределения концентраций вблизи границы раздела фаз при их турбулентном течении

$$\beta = \frac{D}{\delta_3}$$

где  $D$  – коэффициент диффузии данного компонента;  
 $\delta_3$  - эффективная толщина диффузионного пограничного слоя.

$$Mdy = K_y(y_p - y)dF$$

$$Ldx = K_x(x - x_p)dF$$

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.

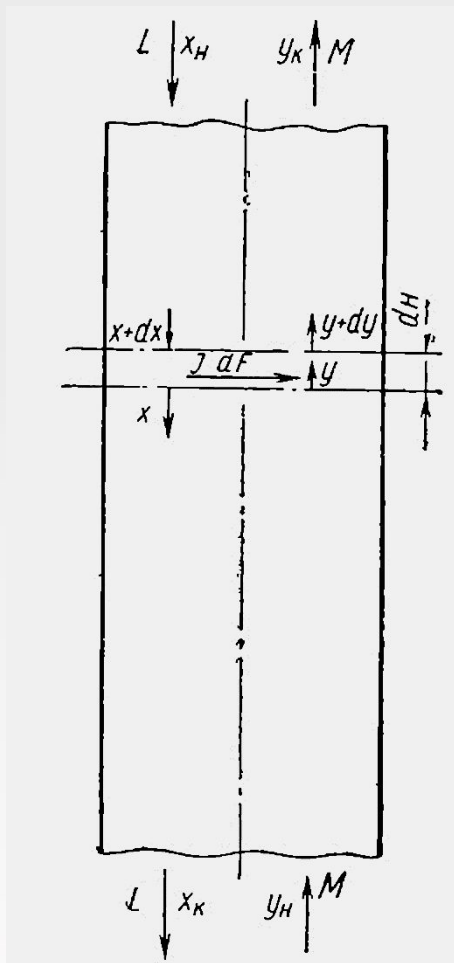


Рисунок 15. Схема участка колонны с противоточным непрерывным контактом фаз

$$(y_K - y_H) = \frac{K_y F}{M} \rightarrow_{\Delta y}$$

$$(x_H - x_K) = \frac{K_y F}{L} \rightarrow_{\Delta x}$$

где  $\rightarrow_{\Delta x}$  и  $\rightarrow_{\Delta y}$  – средние движущие силы процесса.