

Теплопередача, теплопередача при изменении агрегатного состояния вещества

доц. Прокопенко А.В.

<http://accel.ru>

27.04.2020

Сложный теплообмен

Способы теплопередачи: **конвекция, теплопроводность и излучение.**

Сложный теплообмен – несколько способов одновременно

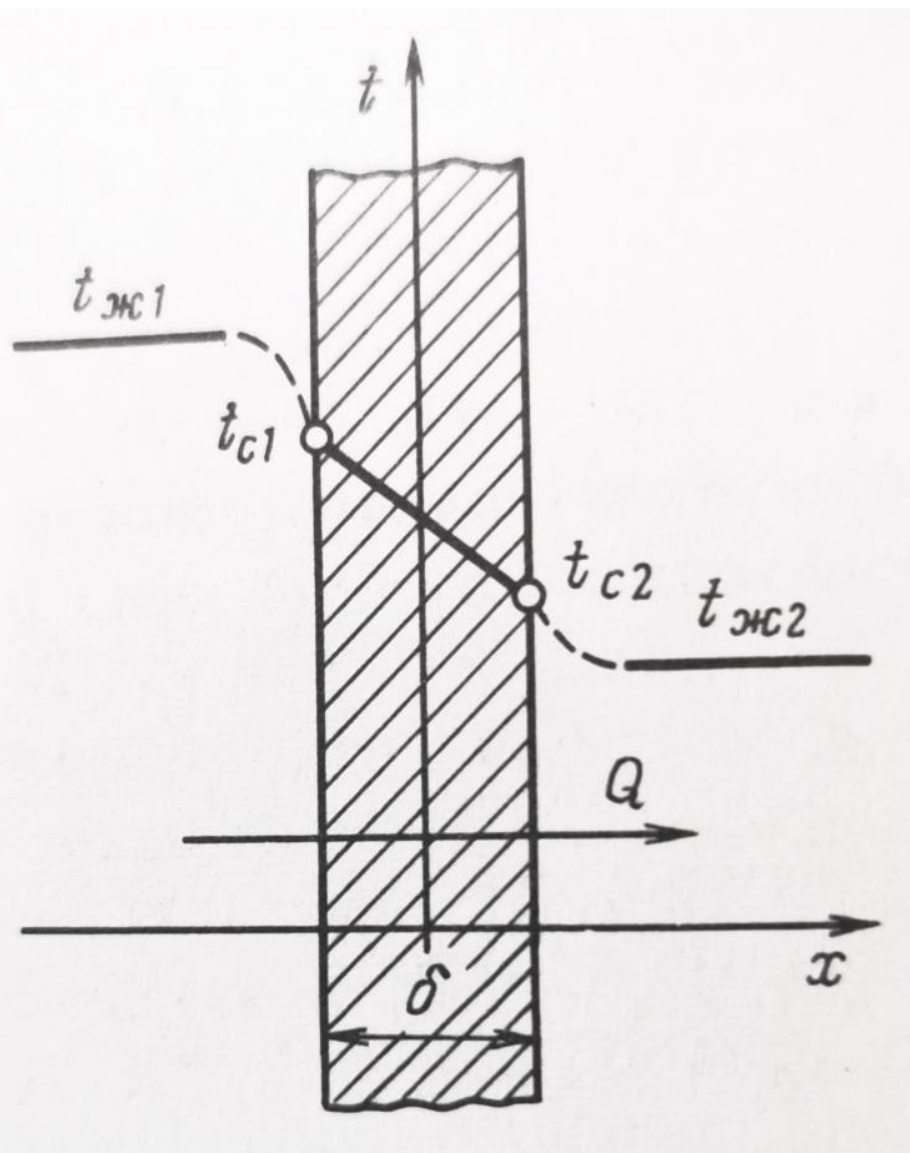
Суммарный коэффициент теплопередачи металлическая стенка и горячий газ.

$$\alpha = \alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{л}}$$

$$\alpha_{\text{л}} = q_{\text{л}} / (T_{\text{ст}} - T_{\text{газа}}) \quad [\text{Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})]$$

$$\text{при } T_{\text{газа}} > 1000 \text{ } ^\circ\text{C} \quad \alpha = \alpha_{\text{л}}$$

Теплопередача между двумя жидкостями через разделяющую стенку



1. между горячей жидкостью и поверхностью стенки
 $R_{\alpha} = 1/(\alpha F)$ – **термическое сопротивление теплопередачи**
закон Ньютона-Рихмана

$$T_{ж1} - T_{c1} = Q/(\alpha_1 F_1) = QR_{\alpha 1}$$

- 2 между поверхностями стенки

$$T_{c1} - T_{c2} = QR_{\lambda}$$

- 3 между второй поверхностью стенки и холодной жидкостью

$$T_{c2} - T_{ж2} = Q/(\alpha_2 F_2) = QR_{\alpha 2}$$

Просуммируем правые и левые части трех уравнений

$$T_{ж1} - T_{ж2} = Q(1/(\alpha_1 F_1) + R_\lambda + 1/(\alpha_2 F_2))$$

$$Q = (T_{ж1} - T_{ж2}) / (R_{\alpha1} + R_\lambda + R_{\alpha2}) = (T_{ж1} - T_{ж2}) / R_k$$

похоже на закон Ома

температура стенок $T_{c1} = T_{ж1} - QR_{\alpha1}$; $T_{c2} = T_{ж2} - QR_{\alpha2}$

$$F_1 = F_2 = F$$

$$Q = Q/F = (T_{ж1} - T_{ж2}) / [1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2]$$

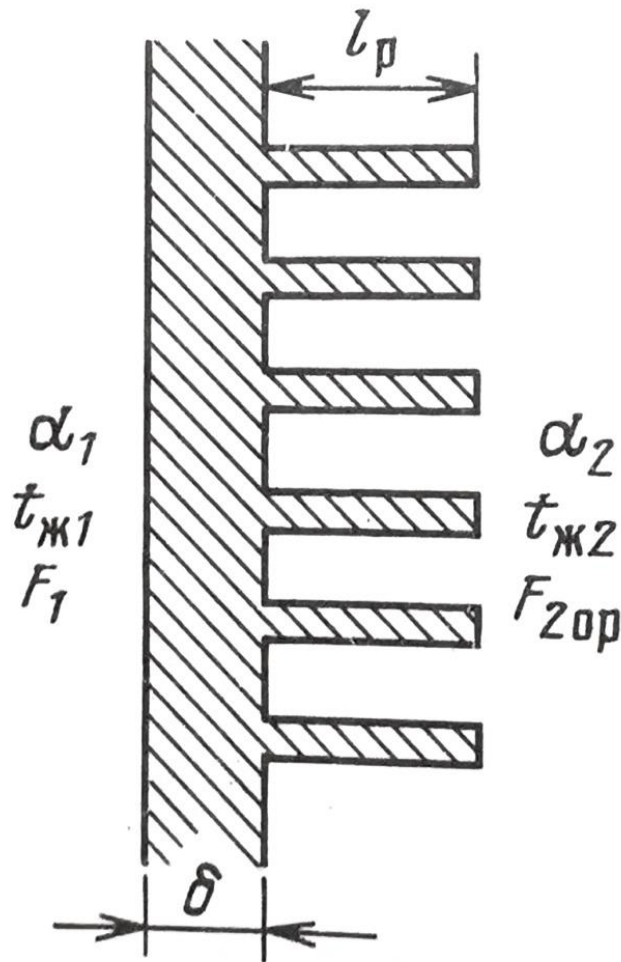
коэффициент теплопередачи $k = 1/[1/\alpha_1 + \delta/\lambda + 1/\alpha_2]$

$$k > \alpha_1, \alpha_2, \lambda/\delta$$

тонкие цилиндрические трубы

$$d_H/d_{BH} < 1,5 \text{ и } \alpha_1 \approx \alpha_2 \text{ то } d = 0,5(d_{BH} + d_H)$$

Интенсификация теплопередачи



способ интенсификации:

увеличить $(T_{ж1} - T_{ж2})$;

уменьшить R_k ($R_{\alpha 1}$; R_{λ} ; $R_{\alpha 2}$) турболизация потока и увеличение площади поверхности.

$$R_{\alpha 2} = 1/(\alpha_2 F_2)$$

Коэффициент оребрения $K_{or} = F_{or}/F_{gl}$

прямоугольное ребро с малым термическим сопротивлением

$$R_{\lambda or} = l_{reb}/(\lambda_{reb} S_{reb}) \ll R_{\alpha reb} = 1/(\alpha_2 F_{reb})$$

длина ребра ограничена т.к.

$$T_{reb} = T_{ж2}$$

Ребра: пластины,
стержни, радиаторы

Тепловая изоляция

Уменьшения потерь теплоты теплоизоляторами.

Теплоизоляционные материалы с теплопроводностью $\lambda < 0,2$ Вт/(м×К)

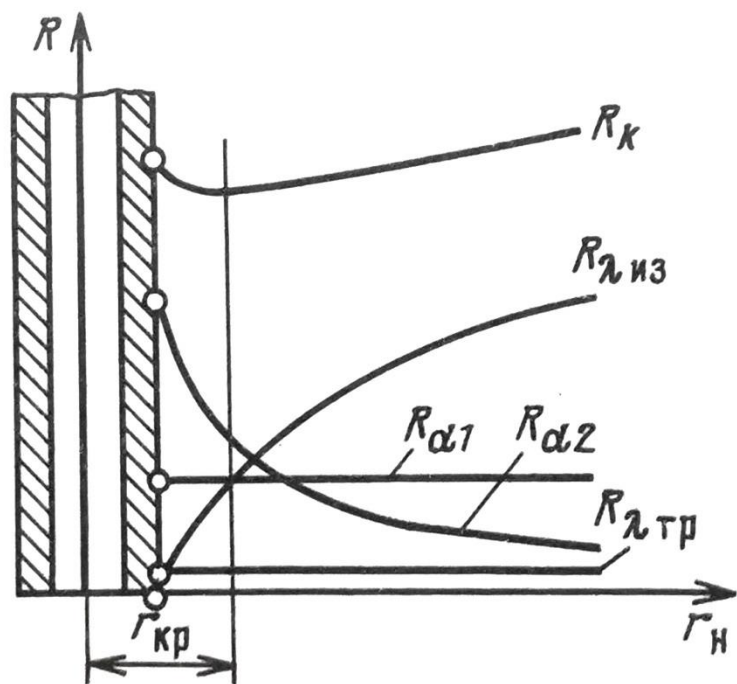
Волокнистые порошковые или **пористые** материалы с воздушным заполнением. Влажность увеличивает теплопроводность. Пенобетоны, вермикулит, миниральная вата, пенопласты.

Вакуумно-многослойные, вакуумно-порошковые материалы (сосуды Дюара) $\lambda_{эф} \approx 10^{-4}$ Вт/(м×К)

Выбор теплоизолятора: физикохимические свойства, температура $T_{предельная}$, экономичность.

Высокотемпературная изоляция - многослойная теплоизоляция

Выбор теплоизолятора для трубопроводов



Зависимость термических сопротивлений от внешнего радиуса теплоизоляции

R_λ растет и R_k растет

$R_{\alpha 2} = 1/(\alpha_2 F_2)$ из-за увеличения наружной поверхности $F_2 = \pi d_2 l$

Всё верно если $r_2 > R_{кр}$ – критическое значение

$$R_k = R_{\alpha 1} + R_{\lambda_{тр}} + R_{\lambda_{изол}} + R_{\alpha 2}$$

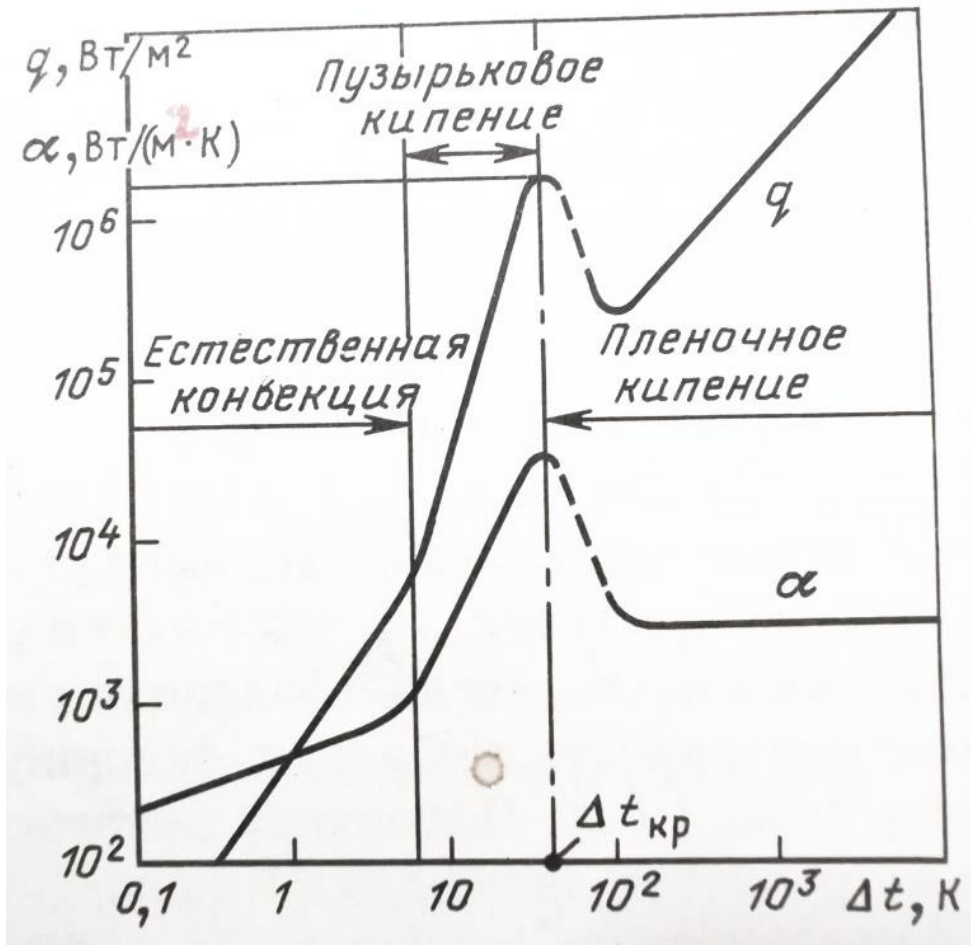
где $R_{\lambda_{тр}}$, $R_{\lambda_{изол}}$ термическое сопротивление трубы и изоляции

$$R_{кр} = \lambda_{изол} / \alpha_2$$

Пример: $\alpha_2 \approx 10 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \times \text{К})$; $\lambda_{изол} \approx 0,1 \text{ Вт}/(\text{м} \times \text{К})$

$$R_{кр} = 10 \text{ см}$$

Теплоотдача при кипении



Пузырьковое кипение

Кризис теплообмена

Пленочное кипение

Критическая плотность

теплового потока $q_{кр}$ не достигается в паровых котлах, ядерных реакторах, электронагревателях

при

$p=0,1 \text{ МПа}$ $q_{кр}=1,5 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$

при

$p=6,0 \text{ МПа}$ $q_{кр}=4 \times 10^6 \text{ Вт/м}^2$

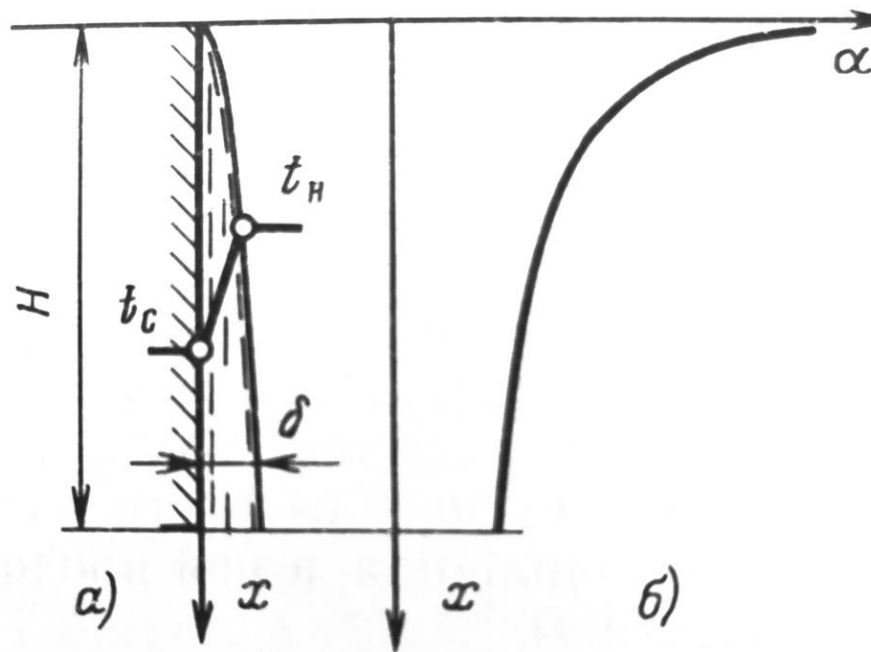
$0,1 < p < 3 \text{ МПа}$

$$\alpha = 0,38 q^{2/3} \times p^{1/5}$$

α - $[\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})]$; q - $[\text{Вт}/\text{м}^2]$; p - Па

Теплоотдача при конденсации

Капельная конденсация - Пленочная конденсация



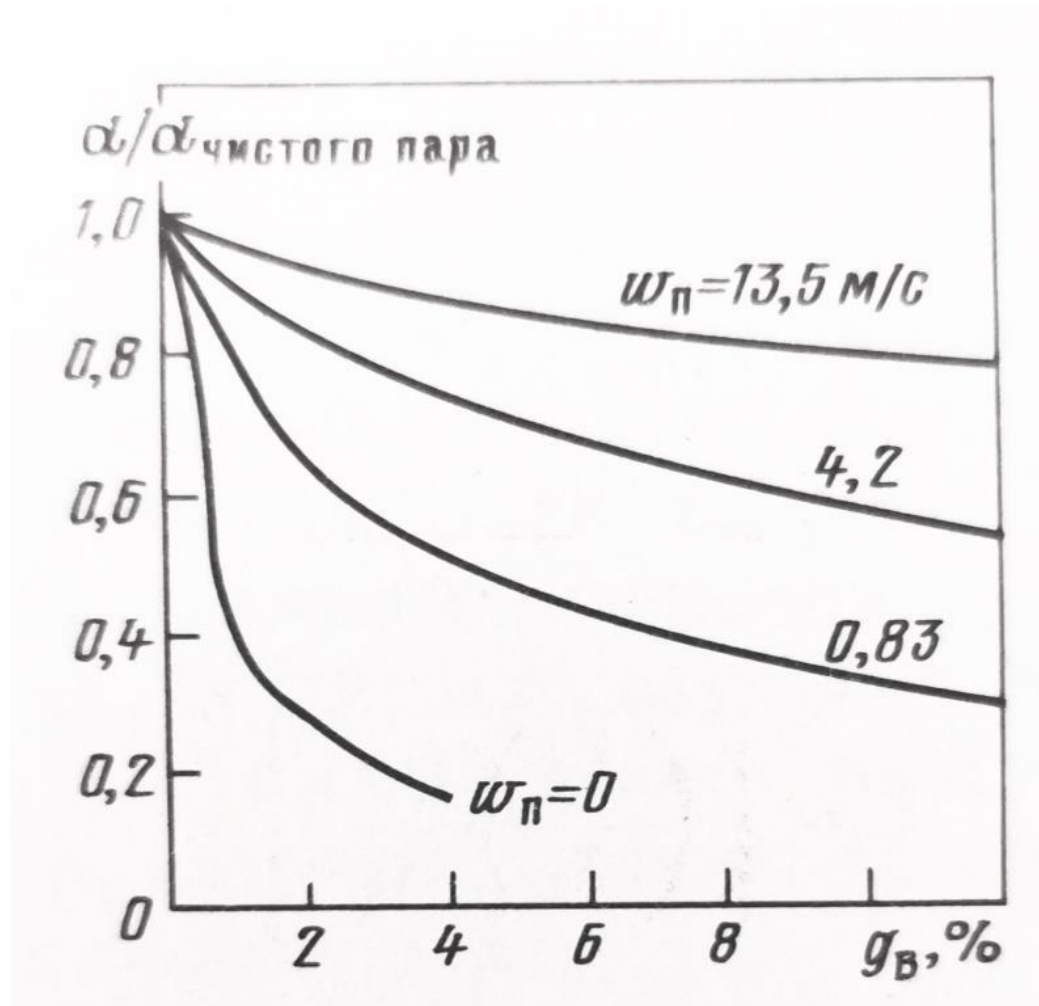
α T_c - температура поверхности; T_H - температура насыщения

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{r \rho^2 g \lambda^3}{4 \mu (T_H - T_c) x}}$$

r - скрытая теплота парообразования; μ - вязкость; g - ускорение свободного падения; ρ - плотность; x - высота поверхности.

Характер течения конденсата на вертикальной пластине и распределение коэффициента теплопередачи по высоте

$$\alpha_{\text{накл}} = \alpha_{\text{верт}} \sqrt[4]{\cos(\varphi)}$$



Изменение интенсивности теплоотдачи горизонтальной трубе в зависимости от массовой концентрации воздуха в паре при атмосферном давлении и различных скоростях обтекания

Ориентировочные значения коэффициентов теплопередачи

Свободная конвекция в газах, Вт/(м ² К)	5-30
Свободная конвекция воды	10 ² -10 ³
Вынужденная конвекция газов	10-500
Вынужденная конвекция воды	500-2×10 ⁴
Кипение воды	2×10 ³ -4×10 ⁴
Жидкие металлы	100-3×10 ⁴
Пленочная конденсация вод. пара	4×10 ³ -10 ⁴
Капельная конденсация вод пара	4×10 ⁴ -10 ⁵

Спасибо за внимание!