

# Особливості тепловіддачі при конденсації

- Процес конденсації полягає в тому, що при певних умовах пар може переходити як у рідкий так і в твердий стан. Конденсація починається біля різного роду включень у парі, біля пилинок, краплинок рідини і т.п.

## Конденсація

### Поверхнева

(відбувається на твердих поверхнях, температура яких нижча  $t$  насичення при даному тиску. Найбільш поширена).

### Об'ємна

(відбувається в об'ємі пари, може відбуватися самочинно, напр. при зростанні тиску)

### Крапельна

(відбувається на поверхнях, що погано змочуються конденсатом. Висока тепловіддача, обмежене застосування)

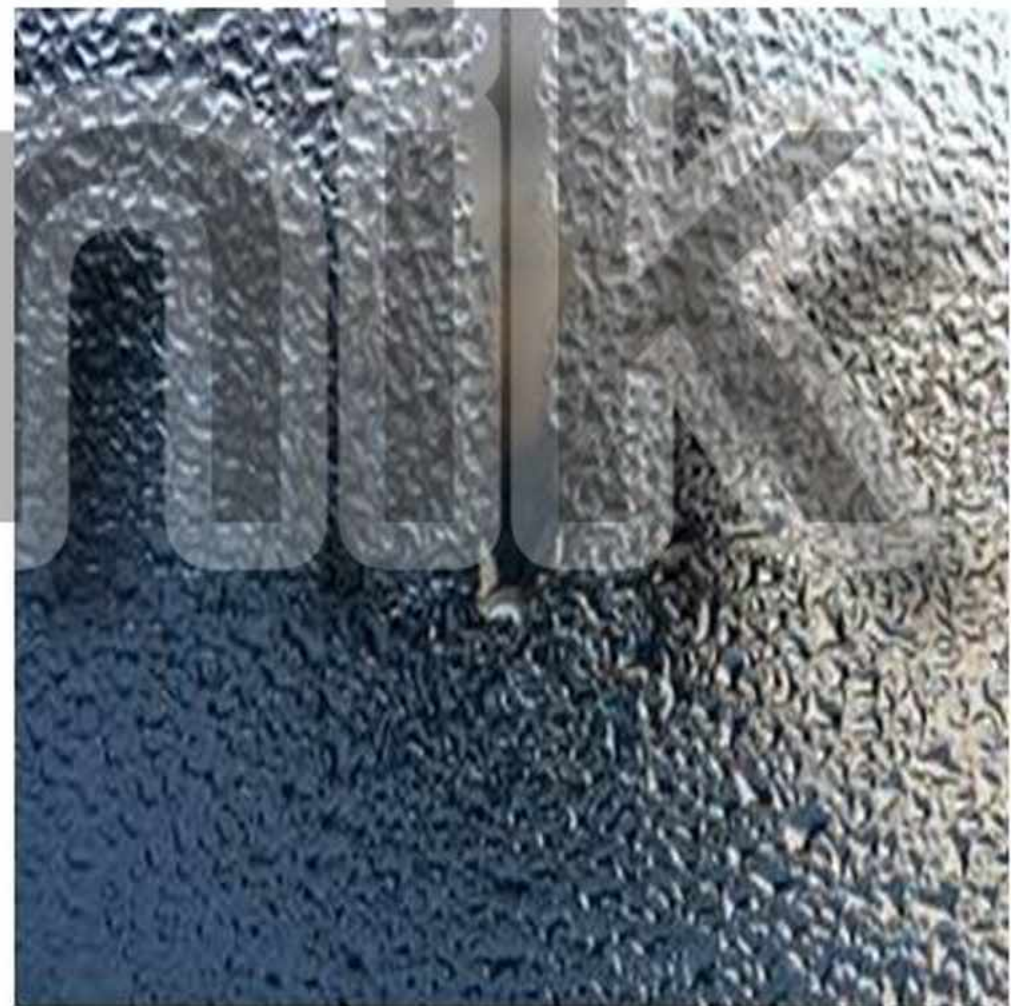
### Плівкова

(відбувається на поверхнях, що добре змочуються конденсатом. Гірша тепловіддача, але більш широке застосування)

# Крапельна конденсація та її “перехід” в плівкову (б).

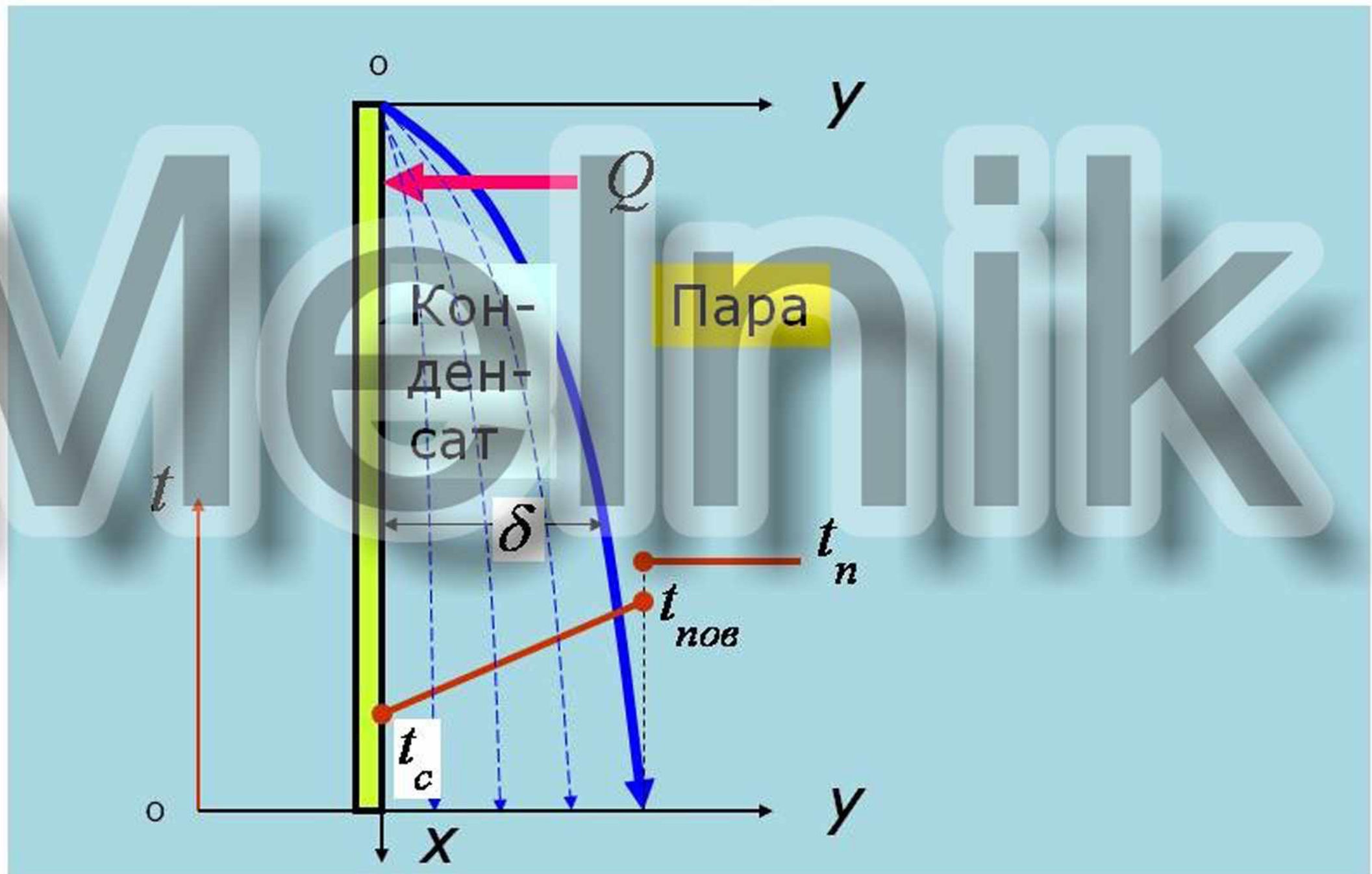


a)



б)

# Конденсація пари на вертикальній стінці



Зміна коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha$ ) та товщини плівки конденсату ( $\delta$ ) вздовж вертикальної стінки ( $x$ )



# Формула Нуссельта

$$\alpha_N = c^4 \sqrt{\frac{r \rho'^2 g \lambda'^3}{\mu' (t_n - t_c) \ell}}$$

Формула Нуссельта для конденсації нерухомої пари:

де  $c = 0,943$  константа, визначальний лінійний розмір  $\ell = H$  – висота поверхні (при конденсації на вертикальній поверхні) і  $c = 0,728$ ,  $\ell = d$  зовнішній діаметр (при конденсації на горизонтальних трубах);

$r$  – теплота пароутворення, Дж / кг;

$\rho'$  – густина рідини в стані насичення, кг/м<sup>3</sup>;

$g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – прискорення вільного падіння;

$\lambda'$  – теплопровідність рідини в стані насичення, Вт / мК;

$\mu'$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини в стані насичен., Нс/м<sup>2</sup>;

$t_n, t_c$  – температура насичення рідини та стінки, °С.

# Рівняння тепловіддачі при ламінарному русі плівки конденсату на вертикальних поверхнях

Формула Нуссельта дає достатню похибку, так як не враховує залежність фізичних властивостей конденсату від температури та по товщині плівки, а також зростання коефіцієнта тепловіддачі через хвильовий рух плівки, який виникає в результаті тертя на границі поділу фаз. Для уникнення цього Лабунцов запропонував ввести поправку на температуру  $\epsilon_t = (Pr_H / Pr_C)^{0,25}$ , а Капіца П.Л. – поправку на хвильовий режим руху плівки  $\epsilon_v = Re^{0,04}$ . (ця поправка збільшує коефіцієнт тепловіддачі порядку на 21%)

З урахуванням цих поправок середній коефіцієнт тепловіддачі становитиме:

$$\alpha = \alpha_N \epsilon_t \epsilon_v$$

Використовуючи теорію подібності та цю залежність, рівняння Нуссельта можна записати у вигляді критеріального рівняння:

$Re_N = 0,95 Z_N^{0,78} \epsilon_t$ , якщо вважати число Рейнольдса визначуваним числом подібності:

$$Re_N = \frac{\alpha \Delta t h}{r v' \rho'}$$

Де  $Z_N = Ga^{1/3} \frac{\lambda' \Delta t}{r v' \rho'}$ ; - т.з. приведена довжина.  $Ga = \frac{gh^3}{\nu_p^2}$  - число подібності Галілея.

Співставлення дослідних даних конденсації різних парів на вертикальних трубах з розрахунком по формулі (дані Д.А.  $Re_H = 0,95 Z_H^{0,78} \epsilon_t$ , при  $Re_H < 400$ )

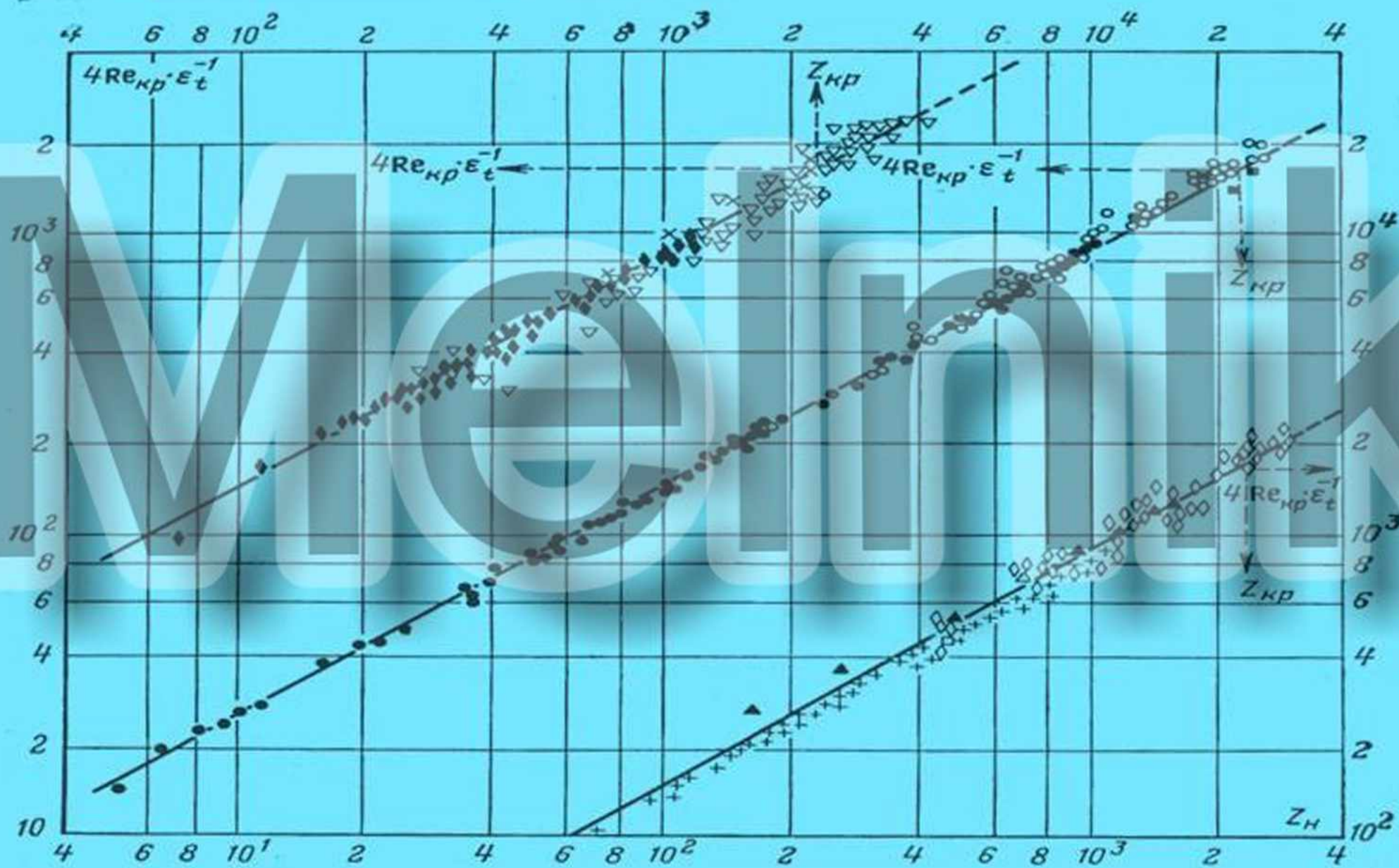


Рис. 3-8. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности при ламинарном течении пленки.

○ — вода, Геббард; ● — аммиак, Городинская; □ — этиловый спирт, Беккер; ■ — жидкий воздух, Головинский; △ — вода, Саликов; ▲ — ацетон, Беккер; ▽ — вода, Стробе; + — вода, Буров; × — бензол, Беккер; ◇ — вода, Майсенбург; ◆ — вода, Кутателадзе.

- Є другий спосіб визначення тепловіддачі при конденсації, за ламінарного руху плівки, в якому за визначальну температуру приймають температуру конденсації пари і цей спосіб є більш поширеним в інженерних розрахунках. Для цього способу розрахункові рівняння такі:

- А) для вертикальних стінок  $Nu = 0,42(Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0,28} \cdot (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$

- Б) для горизонтальних стінок  $Nu = 0,72(Ga \cdot Pr \cdot Ku)^{0,25} \cdot (Pr/Pr_{cm})^{0,25}$

(де  $Ku = r/(c \cdot \Delta t)$  - критерій Кутателадзе, який враховує переохолодження конденсату (критерій фазового переходу).

- Якщо конденсація водяної пари відбувається всередині горизонтальних труб, то тоді використовують зовсім інші критеріальні рівняння, які розглядаються в спецкурсах.

# Рівняння тепловіддачі при турбулентному русі плівки конденсату (чиста нерухома пара)

При  $(Re = wd/\nu) > 400$  рух плівки стає турбулентним (в верхній частині плівки де  $Re < 400$  рух залишається ламінарним. На стінці буде змішаний рух.  $Re_{кр} = 400$  відповідає  $Z_{кр} = 2300$ ).

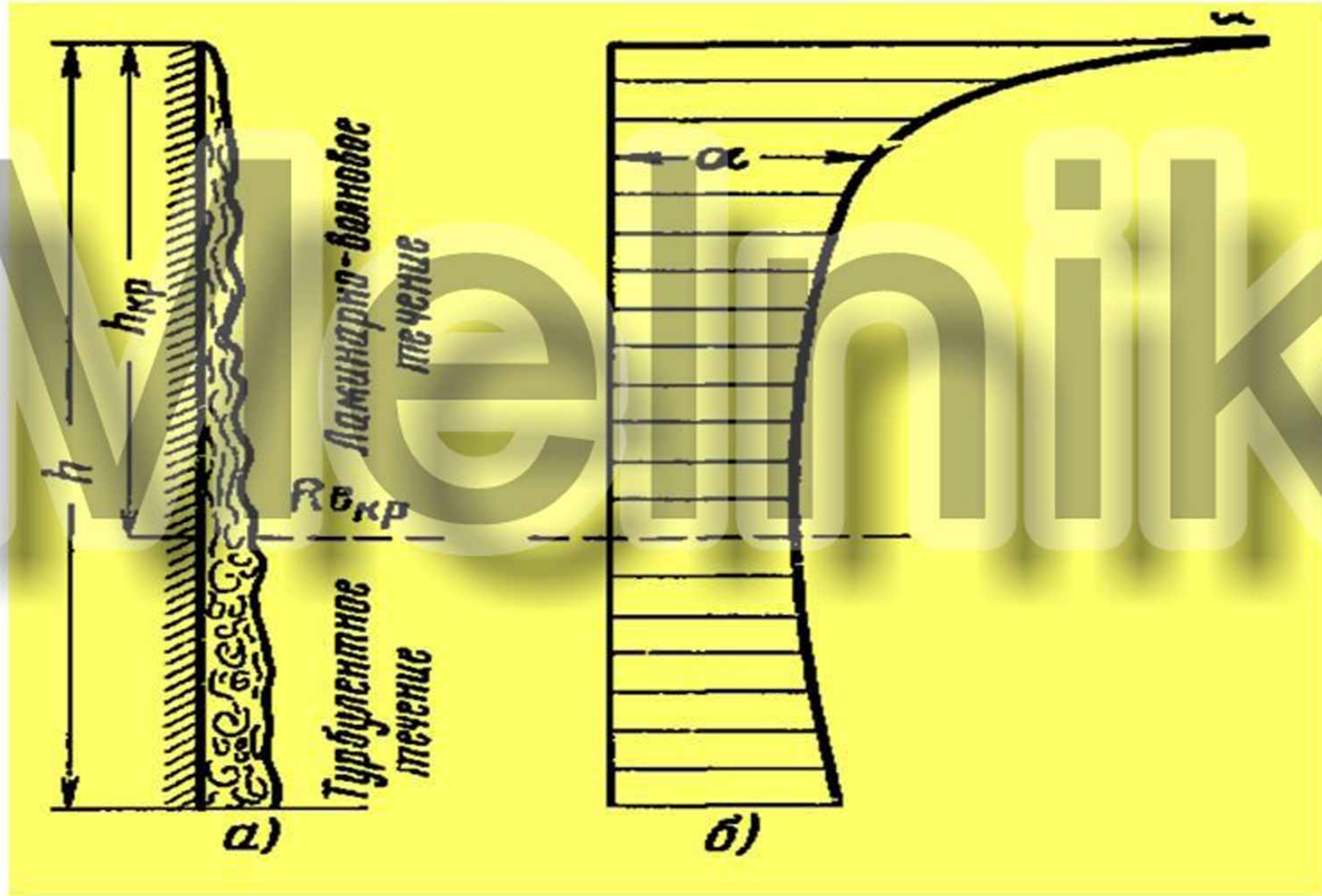
Тоді рівняння подібності для тепловіддачі чистої нерухомої пари при змішаному русі плівки на вертикальній поверхні прийме вид (за визначальну температуру приймають  $t_n$ ):

$$Re_H = [89 + 0,024 \left( \frac{Pr_H}{Pr_C} \right)^{0,25} Pr_H^{0,5} (Z_H - 2300)]^{4/3}$$

Ці рівняння є справедливими і для конденсації на горизонтальній трубі, якщо в критеріях подібності взяти за визначальний розмір  $d$  замість  $H$ .

При  $(K = r/c'_p) > 5$  і  $Pr_H > 1$  можна не враховувати інерційні сили та перенесення теплоти конвекцією. Якщо поверхня має нахил, то в початкове рівняння необхідно ввести поправку  $g_x = g \cdot \cos\varphi$ .

Характер зміни течії плівки конденсату та коефіцієнта тепловіддачі від висоти вертикальної поверхні великої висоти (при  $h_{кр}$  рух плівки конденсату – турбулентний)



Співставлення дослідних даних конденсації різних парів на вертикальних трубах з розрахунком по формулі для змішаного режиму (дані Д.А.Лабунцова при  $Re_n > 400$ )

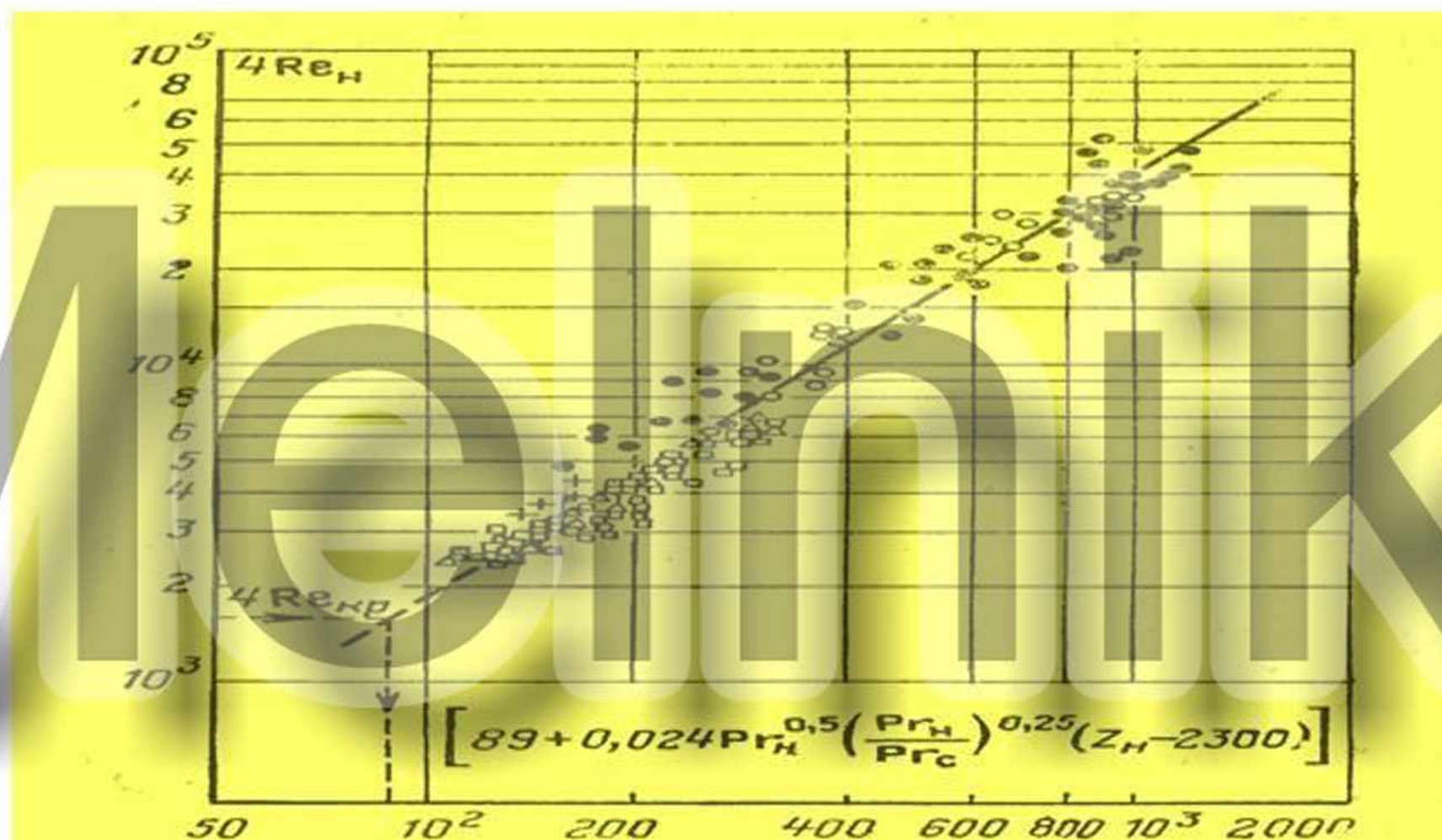


Рис. 3-11. Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности при смешанном (ламинарном и турбулентном) течении пленки конденсата;  $Re_{кр} = 400$ .

+ — вода,  $H = 3,66$  м. Майсенбург; □ — вода,  $H = 6,1$  м. Стробе; ○ — вода,  $H = 2,9$  м. Саликов; △ — вода,  $H = 3,66$  м. Геббард; ● — дифенил. Баджер.

# “Стікання” плівки конденсаду з горизонтальних труб

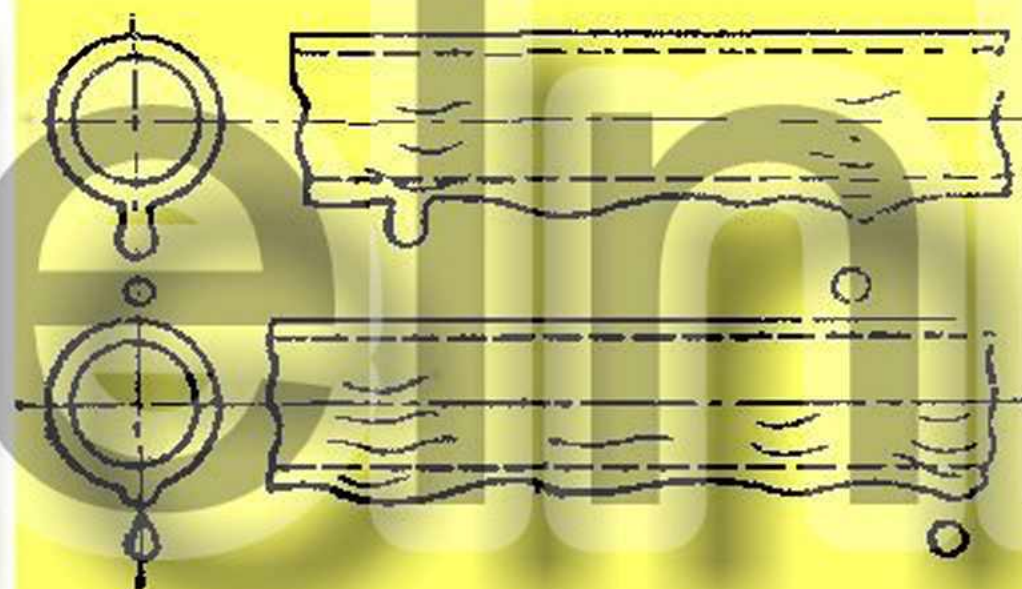


Рис. 12-12. Течення конденсаду в пучке горизонтальних труб.

# Конденсація рухомої пари на горизонтальній трубі

Експериментальні дослідження показали, що при  $Re_{дн} > 5000$  інтенсивність тепловіддачі на вертикальних і горизонтальних трубах була однаковою, що свідчить про домінування впливу динамічної дії пари в порівнянні з силою тяжіння.

Рівняння Нусельта годиться для визначення тепловіддачі при конденсації нерухомої пари. На практиці, як правило, приходиться мати справу з конденсацією рухомої пари.

В досліджах Бермана насичена рухома пара за умов :  
 $p_{п} = 0,032 - 0,98$  бар;  $w_{п} = 0,26 - 17,6$  м/с; та  $\Delta t = 0,6 - 12$  К;  $Re_{п} = 46 - 864$ , обтікала горизонтальну трубу зверху вниз. В результаті цих досліджень були отримані результати, наведені на наступному слайді.

# Рівняння подібності Бермана для рухомої пари.

По результатам дослідів Берман отримав наступне рівняння подібності:

$$Nu = 0,72 B Re_n^{0,16} Re_*^{0,125} Ga^{0,045} \left( \frac{\mu''}{\mu'} \right)^{0,08}$$

де  $Nu = \frac{\alpha d}{\lambda'}$ ;  $Re_n = \frac{w_n d}{\nu''}$ ;  $Re_* = \frac{\lambda' \Delta t}{r \rho' \nu'}$ ;  $Ga = \frac{g d^3}{\nu'^2}$ ;  $B = 42$

Це рівняння справедливе для чистої пари (без домішок повітря).

При конденсації пари на горизонтальному пучку труб тепло-віддача на другому та послідуєчих рядах зменшується через зменшення швидкості пари, яке викликана частковою конденсацією пари на попередніх рядах труб та збільшенням товщини плівки конденсату за рахунок його стікання з верхніх рядів.

# Конденсація пари на горизонтальних пучках труб

Якщо вважати, що температурний напір на пучку труб не змінює-

ється, то для середнього по пучку коефіцієнта тепловіддачі

Берман запропонував

рівняння:

$\alpha_N$

$$\frac{\alpha_n}{\alpha_N} = \frac{\alpha_1}{\alpha_N} \frac{0,84\varepsilon}{[1 - (1 - \varepsilon)^{0,84}] n^{0,07}}$$

де  $\alpha_N$  - коефіцієнт тепловіддачі на горизонтальній трубі, розрахований по формулі Нусельта (1), при цьому відносний коефіцієнт тепловіддачі 1-го ряду:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_N} = B \left( \frac{\rho'' w_n^2}{\rho' g d} \right)^{0,08} \left( \frac{\rho' g r d^3}{\lambda' \nu' \Delta t} \right)^{-0,125},$$

$$\varepsilon = (G_{вх} - G_{вых}) / G_{вх}$$

$$G_{вх}; G_{вых}$$

- степінь конденсації пари;

- масові витрати пари на вході та виході з

пучка;  $n$  - число рядів у пучку по висоті коридорного пучка або половина рядів по висоті шахового пучка.

# Вплив різних факторів на інтенсивність

## тепловіддачі при конденсації.

- 1. Якщо рух пари співпадає по напрямку з рухом плівки конденсату, то її товщина падає, а значення  $\alpha$  зростає. При зворотньому русі – навпаки. Однак при високій швидкості пари проходить "відрив" плівки від поверхні і тоді  $\alpha$  значно зростає.

- 2. При конденсації перегрітої пари температура її у стінки поступово знижується і фактично конденсується уже насичена пара. Значить, конденсуючись, перегрітий пар передає конденсату теплоту пароутворення і теплоту перегріву:

$$r''' = r + c_{pm}''' (t''' - t_x)$$
, де  $c_{pm}'''$  - середня теплоємність ПП при даному тиску, а  $t'''$  - температура ПП. Тому коефіцієнт тепловіддачі при конденсації ПП можна вирахувати по тим же формулам, що і для насиченої пари, але замість теплоти пароутворення  $r$  необхідно підставляти значення  $r'''$ . За різницю температур знову ж таки береться  $(t''' - t_x)$ .

- Це пояснюється тим, що якщо  $t_x > t_c$ , то пара конденсується в плівці конденсату і на межі розділу фаз завжди встановлюється температура  $t_x$ .

- 3. Стан поверхні конденсатора також відіграє важливу роль. Так, на трубах, що покриті іржею, з великою шорсткістю, товщина плівки конденсату значно зростає, що викликає зменшення коефіцієнта тепловіддачі більш чим на 30% у порівнянні з чистою гладкою поверхнею.
- 4. Наявність різних газів, що не конденсуються при даних умовах, у парі також помітно знижує коефіцієнт тепловіддачі. Це викликано тим, що при конденсації пари такі гази адсорбуються на холодній стінці у вигляді шару, через який молекули пари проникають до стінки лише шляхом дифузії, що призводить до збільшення термічного опору плівки. Наявність такого газу навіть у кількості 1% зменшує значення  $\alpha$  на 60%.
- 5. Велике значення для отримання високих коефіцієнтів тепловіддачі при конденсації пари має правильне розміщення труб конденсатора. Наприклад, вертикальні труби, як правило, через кожні 10 см комплектуються ковпач-

- ками для відведення конденсату від стінки, тим самим збільшуючи тепловіддачу у 2-3 рази. При горизонтальному розміщенні труб відчутний ефект отримують тоді, коли струмінь конденсату з верхньої труби стікає на невелику частину нижньої труби. Ще більший ефект досягається тоді, якщо пару подають у вигляді тонких струменів з великою швидкістю. При ударі таких струменів у стінку на якій конденсується пара, проходить руйнація плівки конденсату і його розбризкування. Термічний опір при цьому падає в 3-10 разів.
- Однак, задача інтенсифікації тепловіддачі при конденсації не являється дуже актуальною, так як при конденсації тепловіддача і так досить висока. Тому, при проектуванні конденсаторів велику увагу слід приділяти профілактичним мірам проти зниження тепловіддачі внаслідок, наприклад: наявності повітря, неправильного відведення конденсату і подачі пари в конденсатор, відкладення на поверхні теплообмінника солей, олив і інших забруднень. Бо саме ці причини можуть стати основою незадовільної роботи конденсаторів.