

Лекція. Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі при кипінні.
Пароутворення при вимушеній конвекції. Кризи
тепловіддачі при кипінні в трубах.

Зрозуміло, що при всій складності процесів, які відбуваються при кипінні (а в подальшому як ми побачимо і при конденсації) знайти достовірні значення коефіцієнта тепловіддачі при таких процесах аналітичним шляхом практично нереально. Тому така задача вирішується, як правило, з використанням теорії подібності або емпіричних формул, які отримані в результаті конкретних експериментальних даних.

За визначальний розмір при розвиненому бульбашковому кипінні, яке має місце в багатьох технологічних (і не тільки) апаратах, часто беруть мінімальний радіус бульбашки або величини, що їй пропорційні, наприклад – σ капілярну сталу, так як відривний діаметр бульбашки їй пропорційний капілярній сталій.

За визначальну температуру в такому випадку беруть температуру насичення.

При використанні теорії подібності за число гідродинамічної подібності звичайно беруть модифіковані числа $Re_{\kappa} = w_{\kappa} \delta^{-1}$

Чи $Pe_{\kappa} = Re_{\kappa} \cdot Pr$, де $w_{\kappa} = q(r\rho'')^{-1}$ умовна швидкість [м\с].

Режими руху потоку при кипінні рідини у вертикальній трубі

Труба являє собою обмежену систему, в якій при русі киплячої рідини відбувається безперервне збільшення об'єму парової фази та зменшення об'єму рідкої фази.

Відповідно з цим змінюється гідродинамічна структура потоку як по довжині, так і в поперечному перерізі труби.

При цьому виділяються **три основні області**:

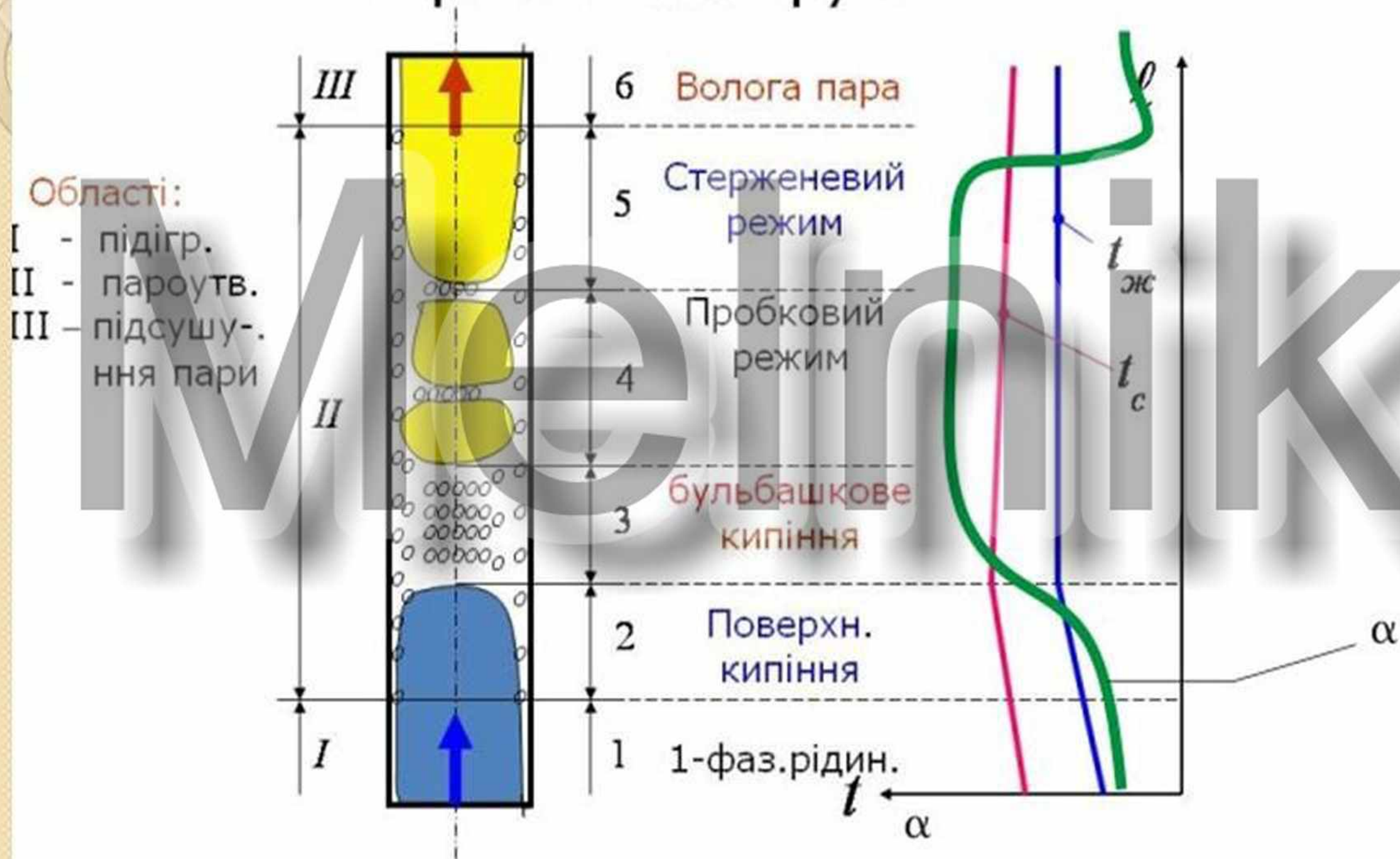
I – недогрітої до температури насичення t_n рідини;

II – кипіння рідини при $t_n = \text{Const}$;

III – підсушування вологої пари. **Арабськими цифрами**

позначені зони: 1 – недогрітої до температури насичення рідини; 2 – поверхневого кипіння; 3 – бульбашкове кипіння; 4 – пробкового режиму; 5 – стержневого режиму по парі; 6 – вологої пари.

Структура потоку при кипінні рідини у вертикальній трубі



- На базі даних про кипіння води та різних розчинів у вертикальних трубах випарників учені Кичигін та Тобілевич запропонували формулу, що годиться для інших апаратів: $Nu = 3,25 \cdot 10^{-4} \cdot Pe_x^{0,6} \cdot Kp^{0,7} \cdot Ga^{0,125}$, де $Kp = (p\delta)/\sigma$ число подібності тиску, яке враховує вплив тиску P на властивості рідини та механізм пароутворення.

Однак, рівняння подібності дають досить велику похибку $\approx \pm 30\%$. Тому на практиці, для розрахунку процесів кипіння конкретних рідин використовують більш прості, хоч і не такі універсальні формули, які отримані безпосередньо з дослідних даних, або на основі узагальнених критеріальних рівнянь і які враховують той факт, що при розвинутomu бульбашковому кипінні коефіцієнт тепловіддачі залежить в основному тільки від теплового навантаження, тиску та температурного напору:

$\alpha = A \cdot q^{0,7} \cdot p^{0,15}$; $\alpha = B \Delta t^{2,33} \cdot p^{0,5}$, де A і B беруть з таблиць чи номограм (для води вони у діапазоні тисків від 100 до 4000 кПа становлять $A=3,00$; $B=38,7$ – по даним Міхеєва та Рассохіна), тиск беруть у барах, а густину теплового потоку у Вт/м².

Для води розрахункова формула по визначенню коефіцієнта тепловіддачі при бульбашковому кипінні може бути представлена і як:

$$\alpha = \frac{3,3 p_n^{0,18}}{1 - 0,0045 p_n} \cdot q^{2/3}$$

де P_n – в бар, q - Вт/м².

(ф-ла справедлива для $P=1-200$ бар).

Розрахунок коефіцієнта тепловіддачі бульбашкового кипіння у великому об'ємі по методиці Лабунцова Д.А. для випадку залежності критерія Нусельта від Δt

- При розвинутому бульбашковому кипінні довільних рідин орієнтація тіл на яких відбувається кипіння не впливає на теплообмін. У цьому випадку можна використувувати узагальнену формулу: $Nu_* = c Re_*^n Pr_p^{0,33}$

- Де $Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda_p}$, $Re_* = \frac{w_* l_*}{\nu_p}$, $w_* = \frac{q}{r \rho''}$

- (в даному випадку - визначальна температура – температура насичення!!!)
- Тоді при

$$Re_* < 0,01 - c = 0,0625, n = 0,5, \text{ при } Re_* > 0,01 - c = 0,125, n = 0,65$$

- Ця формула справедлива для

$$Re_* = 10^{-5} \dots 10^4, w_* < 7 \text{ м/с}, Pr_p = 0,86 \dots 7,6$$
$$\beta \leq 70\% (\text{паровміст})$$

Якщо величина теплового потоку невідома, але відома температура поверхні кипіння, то вище приведені критеріальні рівняння можуть бути приведені до виду.

- Для цього спочатку знаходимо комплекс $\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} Pr^{0.33}$, і якщо він $> 1,6$, то рівняння:

$$\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} Pr^{0.33}, \text{ і}$$

$$Nu_* = 2,63 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} \right)^{1,86} \times Pr^{0,952}$$

- Якщо він $< 1,6$

$$Nu_* = 3,91 \times 10^{-3} \left(\frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} \right) \times Pr^{0,666}$$

Ці формули справедливі для $0,05 < \frac{\lambda \Delta t}{r \rho'' v} Pr^{0.33} < 200$

(Для води комплекс $\frac{\lambda}{r \rho'' v}$ та визначальний розмір -

$I_*(Nu = \alpha_* / \lambda)$ табличні. Значення усіх теплофізичних параметрів беруть при температурі насичення).

Режими руху потоку при кипінні рідини в горизонтальній трубі

При русі киплячої рідини в горизонтальних трубах має місце розшарування потоку, що рухається, по периметру труби.

Якщо швидкість циркуляції та вміст пари у потоці невисокі, **двохфазний потік розшаровується** на парову фазу у верхній частині труби і рідину – в нижній.

При збільшенні швидкості циркуляції та паровмісту гребені хвиль рідини починають діставати верхню частину труби в результаті чого течія переходить спочатку в пробкоподібний режим, а потім - **стержневий режим** з несиметричним розподіленням рідинної та парової фаз.

Структура потоку при кипінні рідини в горизонтальній трубі

