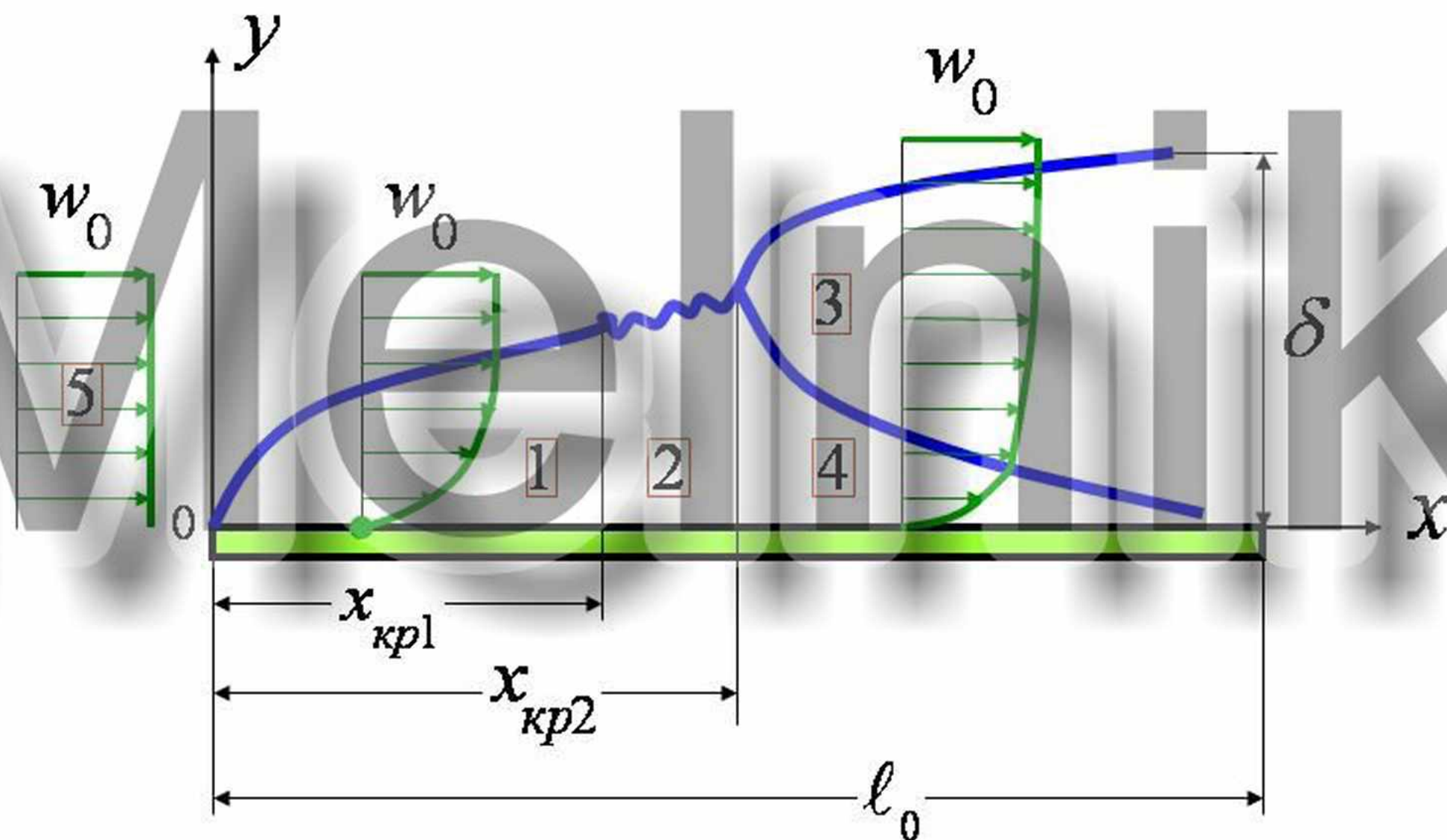




**Особливості тепловіддачі при
обтіканні пластини потоком
нестисливої рідини.**

Поздовжнє обтікання плоскої поверхні (пластини)



Тепловіддача при поздовжньому обтіканні горизонтальної поверхні

1 – ламінарний граничний шар; 2 – перехідний режим;
3 – турбулентний граничний шар; 4 – ламінарний підшар; 5 – незбурена рідина.

Як правило, для простоти приймають - $x_{кр1} = x_{кр2} = x_{кр}$.

Тоді критичне значення числа Рейнольдса для переходу від ламінарного граничного шару до турбулентного:

$$Re_{кр} = \frac{w_0 x_{кр}}{\nu}. \quad (1)$$

В ламінарному граничному шарі швидкість рідини змінюється по степеневому закону

(кубічна парабола):

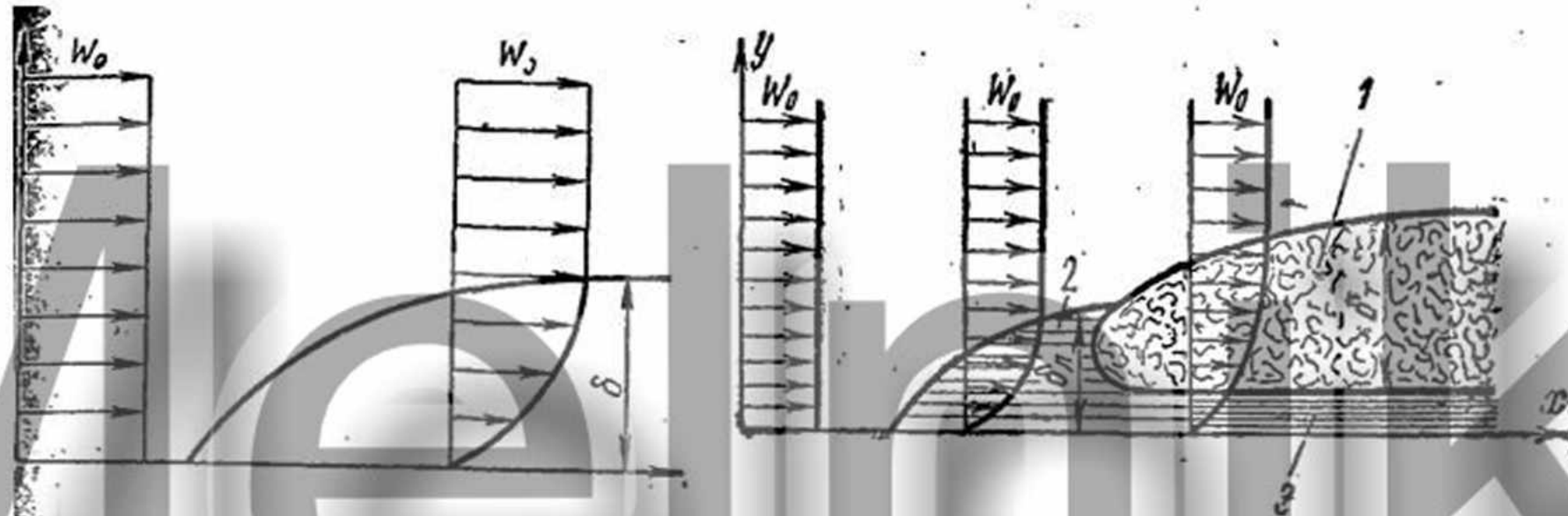
$$\frac{w_x}{w_0} = 1,5\left(\frac{y}{\delta}\right) - 0,5\left(\frac{y}{\delta}\right)^3, \quad (2)$$

де $\delta \rightarrow$ товщина гідродинамічного граничного шару:

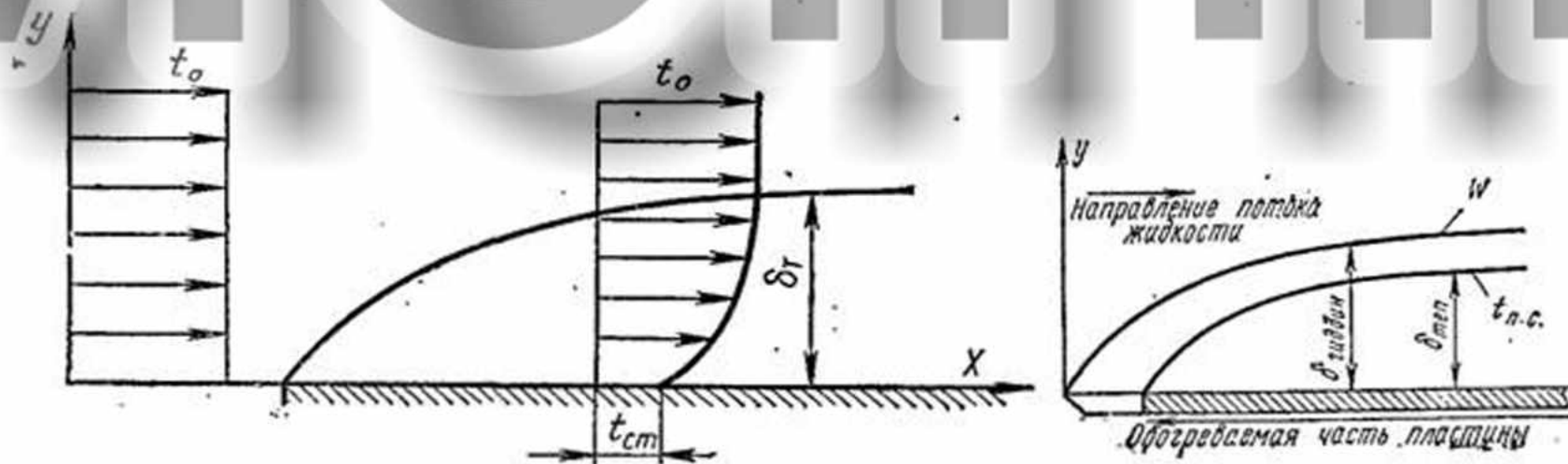
$$\frac{\delta}{x} = \frac{4,64}{Re_x}. \quad (3)$$

Утворення граничних шарів при обтіканні тіла за різних режимів руху

А)



Б)



А) динамічний граничний шар; Б) тепловий граничний шар

Дані А.Жукаускаса про розподіл швидкості та температури в граничному шарі при нагріванні та охолодженні

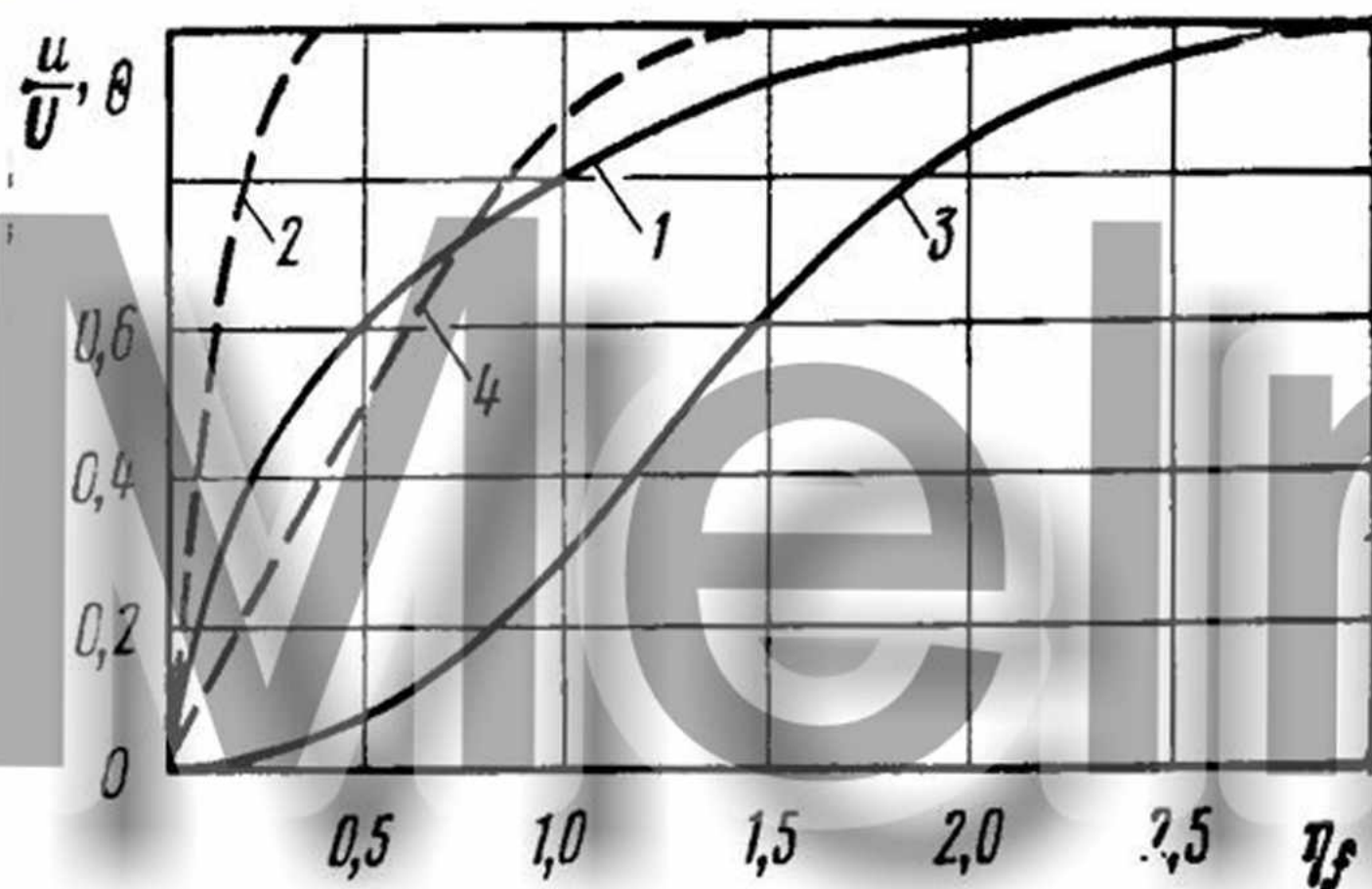


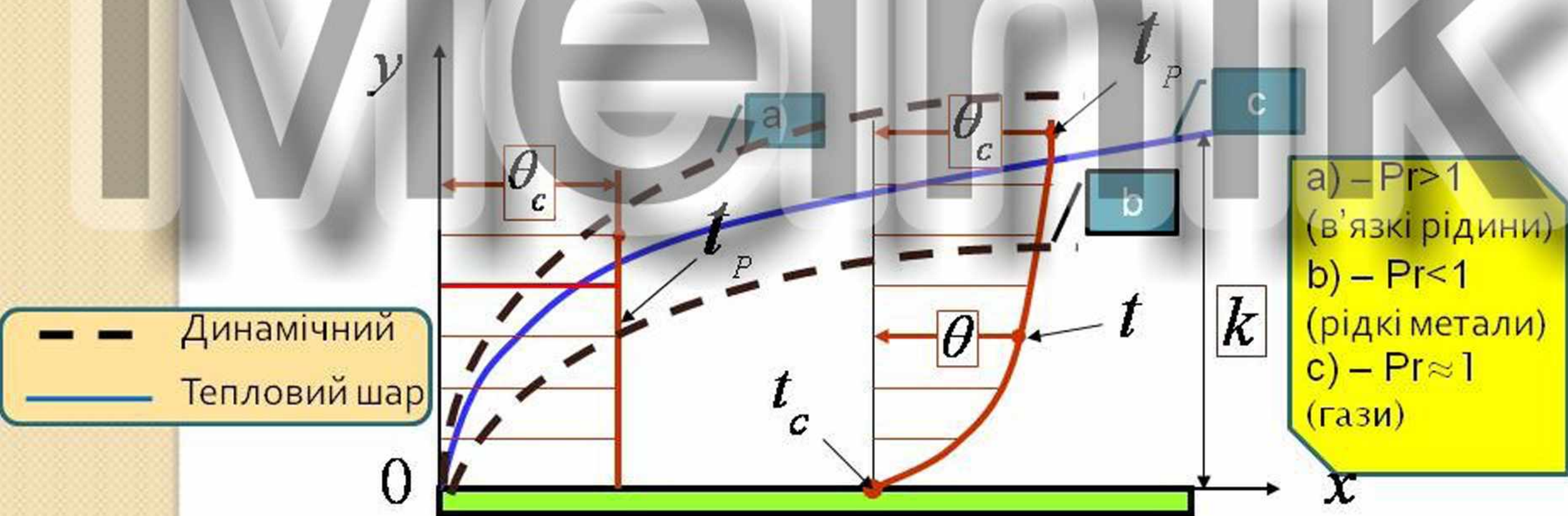
РИС. 6.6. Влияние направления теплового потока на распределение скорости (сплошные линии) и температуры (пунктир) в пограничных слоях в потоке капельной жидкости

1, 2 — при переменной вязкости на обогреваемой пластине ($Pr_f = 100$, $\nu_u/\nu_f = 1/8$), 3, 4 — то же, на охлаждаемой пластине ($Pr_f = 12,5$, $\nu_u/\nu_f = 8$)

При нагріванні оливи ($T_c > T_p$) профілі температури та в'язкості (1 і 2) більш випуклі, ніж при охолодженні ($T_c < T_p$, криві 3 і 4), що пояснюється тим, що при нагріванні тепловий граничний шар тонший ніж при охолодженні. А при інших рівних умовах, чим тонший тепловий граничний шар, тим більший температурний градієнт і відповідно більша тепловіддача: $\alpha_{нагр} > \alpha_{охол}$. І ця різниця зростає з ростом температурного напору.

Тепловий граничний шар

По аналогії з гідродинамічним граничним шаром Круглилін ввів поняття **теплогового граничного шару**- це шар рідини біля поверхні теплообміну, в якому температура змінюється від температури поверхні до температури рідини, яка знаходиться відносно далеко від самої поверхні. В загальному випадку товщини цих шарів не співпадають, хоча співставимі.



Співвідношення між товщинами граничних шарів

Всередині ламінарного граничного шару рух рідини пошаровий, без перемішування, тому теплота передається тільки теплопровідністю. В такому випадку і розподіл температури в тепловому граничному шарі буде підкорятися закону, аналогічному для зміни швидкості у пристінному шарі:

$$\frac{\theta}{\theta_0} = 1,5\left(\frac{y}{k}\right) - 0,5\left(\frac{y}{k}\right)^3, \quad (4)$$

де k – товщина теплового граничного шару: $\frac{k}{\delta} = \frac{1}{\sqrt[3]{Pr}}$ (5)

Для газів $Pr \approx 1$, тому $k = \delta$.

Підставивши δ з (3) в (5), отримаємо товщину теплового граничного шару для газів:

$$k = \frac{4,64x}{\sqrt{Re_x} \sqrt[3]{Pr}} \quad (6)$$

При постійній температурі пластини локальний коефіцієнт тепловіддачі можна знайти з **рівняння подібності Міхеєва**:

Рівняння подібності для розрахунку локального коефіцієнта тепловіддачі в ламінарному граничному шарі

$$Nu_{p,x} = 0,33 Re_{p,x}^{0,5} Pr_p^{0,33} \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}, \quad (7)$$

де $t_p \rightarrow$ середня температура рідини; $Re_{p,x} = \frac{wl}{\nu} \cdot \frac{x}{l} = Re_{pl} \cdot X$
 x – характерний лінійний розмір.

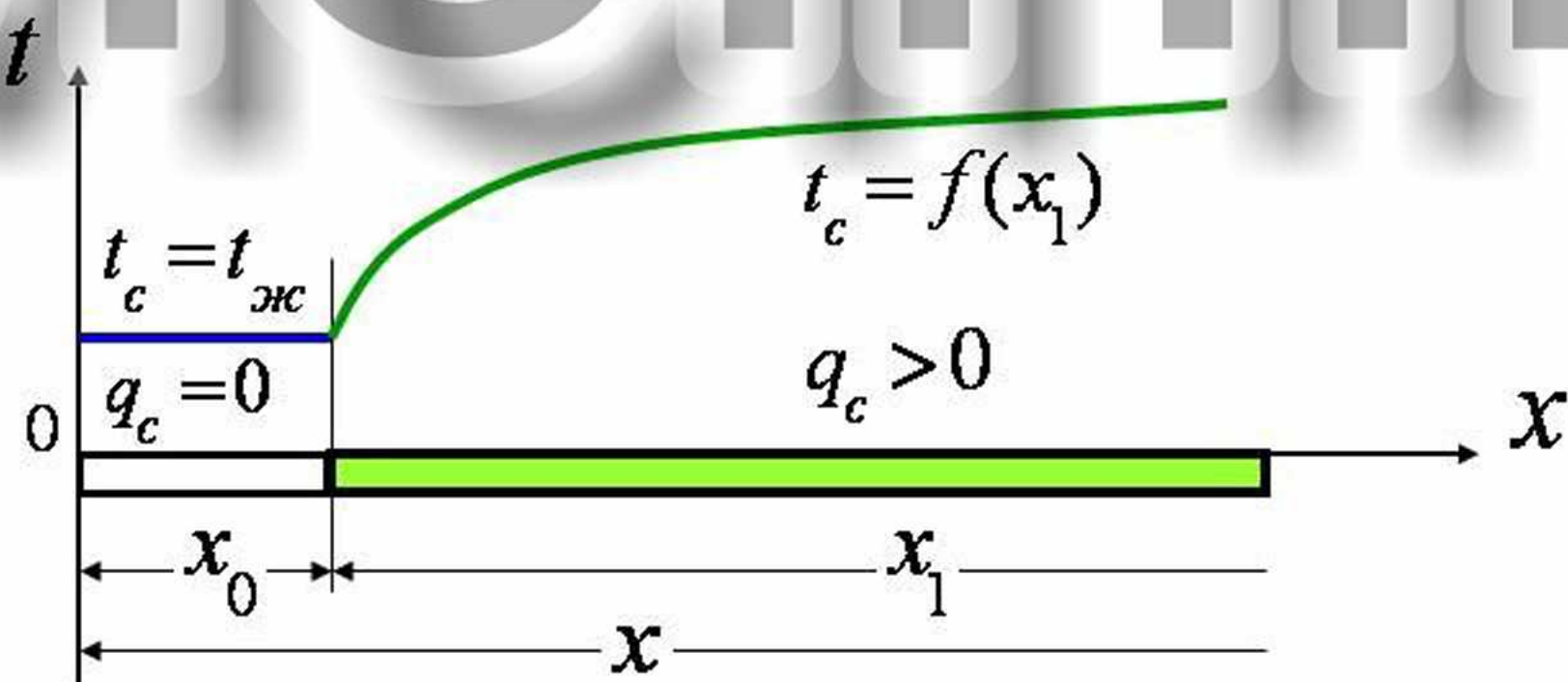
Якщо температура поверхні змінна (як правило, це степенева залежність виду $\theta_c = Ax^m$, (8) де A і m – постійні – незалежні від x), то для цього випадку справедливе наступне критеріальне рівняння:

$$Nu_{p,x} = 0,33 \varepsilon Re_{p,x}^{0,5} Pr_p^{0,33} \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (9)$$

Поправки ε на змінну температуру поверхні приведено на наступному слайді.

Поправки ε на температуру стінки та початкову ділянку, що не обігрівається

m	-0,25	0 $t_c = \text{Const}$	0,1	0,2	0,3
ε	0,655	1	1,09	1,17	1,25
m	0,4	0,5 $q_c = \text{Const}$	0,8	1,0	2,0
ε	1,30	1,36	1,52	1,60	1,98



Вплив ділянки, що не обігрівається, на тепловіддачу пластини

- Якщо на початку платини є ділянка, яка не обігрівається, то виникає затримка у формуванні теплового граничного шару, тобто виникає дисбаланс в утворенні динамічного та теплового граничних шарів, що впливає на коефіцієнт тепловіддачі. Обширні дослідження таких випадків були виконані А.А. Жукаускасом, які в подальшому були зведені до рівняння подібності:

$$Nu_{p,x_q} = 0,33 \varepsilon Re_{p,x_1}^{0,5} Pr_p^{0,33} \left(\frac{x_1}{x} \right)^{0,2} \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25} \quad (10)$$

- де в числах подібності підставляється координата $x_1 = x - x_0$, яка відраховується від початку пластини. За визначальну температури приймають температуру набігаючого потоку.
- При $m=0$ ($t_c = \text{const}$) середній коефіцієнт тепловіддачі $\bar{\alpha} = 2\alpha$ де α локальний коефіцієнт при $x=1$;
- При $m=0,5$ ($q = \text{const}$) : $\bar{\alpha} = 1,5\alpha$ (див. таблицю для ε).

Визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі при ламінарному граничному шарі

- Про режим руху в ламінарному шарі також судять по значенню критерія Рейнольдса. Так, ламінарний режим руху в граничному має місце в ізотермічних потоках при $Re_{p,l} < 5 \cdot 10^5$, а в неізотермічних при $Re_{p,l} < 4 \cdot 10^4$.
- При чому, руйнування ламінарного шару залежить від степені турбулентності набігаючого потоку.
- Для визначення середнього коефіцієнта тепловіддачі пластини, яка омивається поздовжнім потоком рідини, для ламінарного режиму руху використовують наближені формули, наприклад, $Re_{p,l} < 4 \cdot 10^4$ для значень формулу А.А.Жукаускаса:

$$\bar{Nu}_{p,l} = 0,66 Re_{p,l}^{0,5} Pr^{0,43} \left(Pr_p / Pr_c \right)^{0,25} \quad (11)$$

- в якій за визначальну температуру приймають температуру набігаючого потоку, за визначальну швидкість – швидкість набігаючого потоку та за визначальний розмір – довжину пластини у напрямку потоку. Вплив вільної конвекції у цій формулі не враховують, однак це питання ще потребує подальших досліджень.

Загальне рівняння подібності для тепловіддачі при поздовжньому обтіканні пластини

Якщо на початку пластини є ділянка, яка не обігривається, довжиною x_0 то рівняння подібності в такому випадку має вид:

$$Nu_{p,x} = 0,33 \varepsilon \left(\frac{x_1}{x} \right)^{0,2} Re_{p,x}^{0,5} Pr_p^{0,33} \left(\frac{Pr_p}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (12)$$

При $x_0 = 0 \rightarrow \frac{x_1}{x} = 1$, формула (10) перетворюється в (9), а при $t_c = Const$ - в (7).

Для турбулентного граничного шару (локальне значення коефіцієнта Тепловіддачі) використовують рівняння подібності Міхеєва-Петухова:

$$Nu_{жс,x} = 0,0296 Re_{жс,x}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}. \quad (13)$$

Тепловіддача при перехідному режимі

- Перехід ламінарного руху в турбулентний відбувається на певній ділянці, рух на якій має нестабільний характер, в результаті чого він і носить назву перехідний (змішаний). Так як закони тепловіддачі при ламінарному і турбулентному режимах руху різні, то знання їхніх границь має важливе значення. Перехід з одного режиму руху в інший оцінюють за допомогою критерія Рейнольдса, тому в загальному можна говорити про два критерії: $Re_{1кр} = (w_0 x_{кр1}) / \nu$ характеризує перехід з ламінарного в перехідний (більш конкретний) та $Re_{2кр} = (w_0 x_{кр2}) / \nu$ - перехідного в турбулентний (більш широкі границі змін).
- Координати $x_{кр1}$ та $x_{кр2}$ залежать від багатьох факторів, а саме: інтенсивність турбулентності, частота пульсацій, інтенсивність теплообміну, шорсткість та хвилястість поверхні, її обтічність і т.п.
- Велика кількість факторів, які впливають на інтенсивність тепловіддачі утруднюють точне визначення зон переходу режимів руху. Тому, на практиці відрізок $\Delta x = x_{кр2} - x_{кр1}$ часто заміняють точкою, а критичне значення критерія Рейнольдса визначають по даним дослідів. При достатньо зручній для обтікання пластини передній кромці можна знехтувати перехідним режимом, прийнявши, що:

$$Re_{1кр} \approx Re_{2кр} \approx Re_{кр} \approx 10^5$$

Тепловіддача при турбулентному граничному шарі.

- При обтіканні плоскої поверхні рідиною в турбулентному режимі на самій поверхні утворюється тонкий шар ламінарно рухомої рідини, який називають ламінарним підшаром, в якому відбувається основні зміни температури та швидкості потоку. Тобто, такий ламінарний підшар являє собою основний гідродинамічний та термічний опір. Як і для чисто ламінарного руху, для турбулентного значення **середнього коефіцієнта тепловіддачі** знаходять по експериментальним формулам, наприклад для значень $Re_{p,l} > 4 \cdot 10^4$ використовують формулу Міхеєва:

$$\bar{Nu}_{p,l} = 0,037 Re_{p,l}^{0,8} Pr^{0,43} \left(Pr_p / Pr_c \right)^{0,25} \quad (14)$$

За визначальну температуру приймають температуру набігаючого потоку, за визначальну швидкість – швидкість набігаючого потоку та за визначальний розмір – довжину пластини у напрямку потоку. Багаточисельні проведені досліді свідчать, що при розвиненому турбулентному русі рідини впливом вільної конвекції на інтенсивність тепловіддачі можна нехтувати.

- Значення локального коефіцієнта тепловіддачі за умови турбулентного режиму можна знайти, використовуючи рівняння:

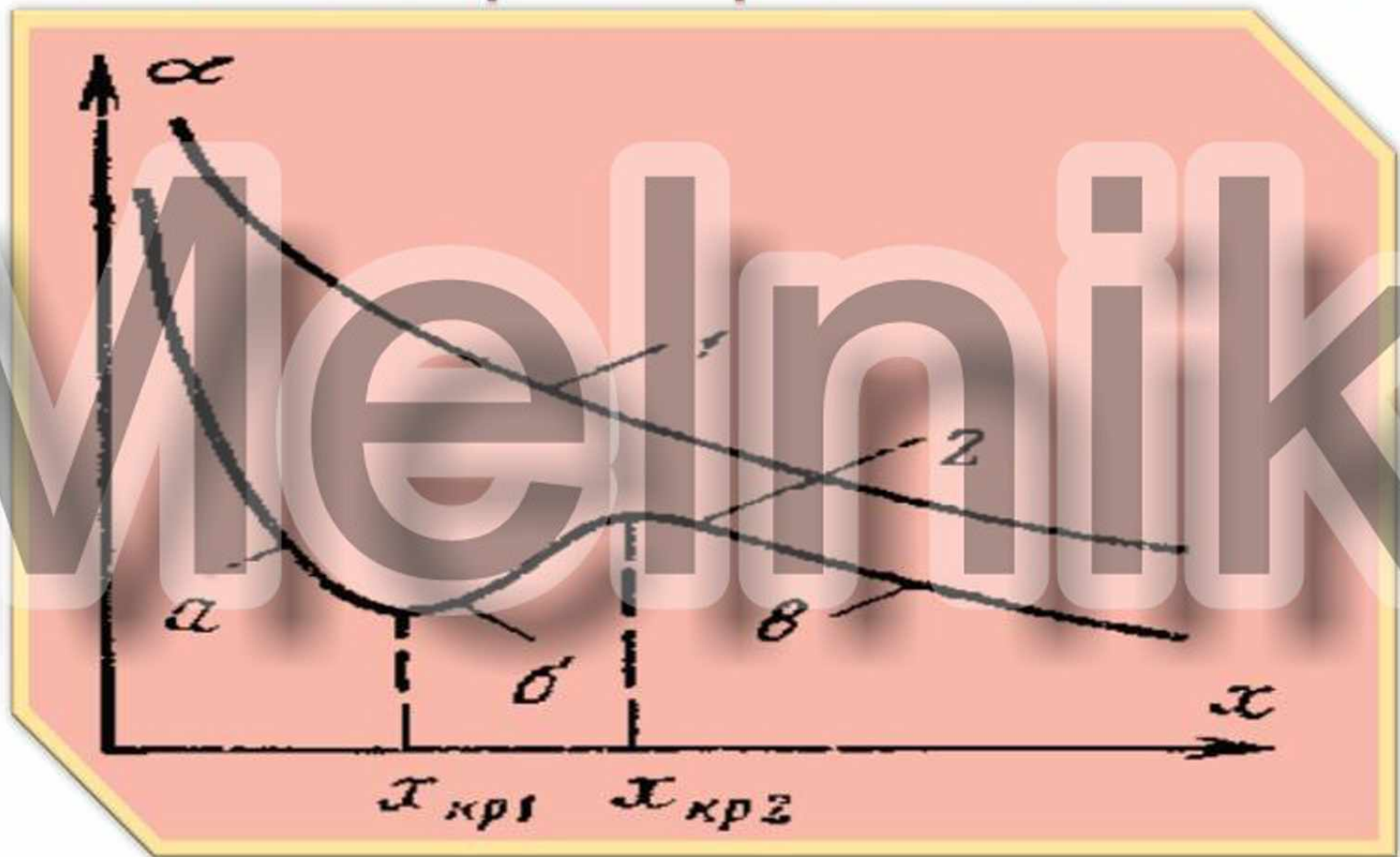
$$Nu_{p,x} = 0,0298 Re_{p,x}^{0,8} Pr^{0,43} \left(Pr_p / Pr_c \right)^{0,25}.$$

- За визначальну температуру тут беруть температуру незбуреного потоку (вдалині від поверхні), а за визначальний розмір x - відстань від початку ділянки теплообміну до місця визначення локального коефіцієнта тепловіддачі. При цьому середньо інтегральне значення коефіцієнта тепловіддачі зв'язане з локальним через співвідношення:

$$\bar{\alpha} = 1,25 \alpha_{x=l}$$

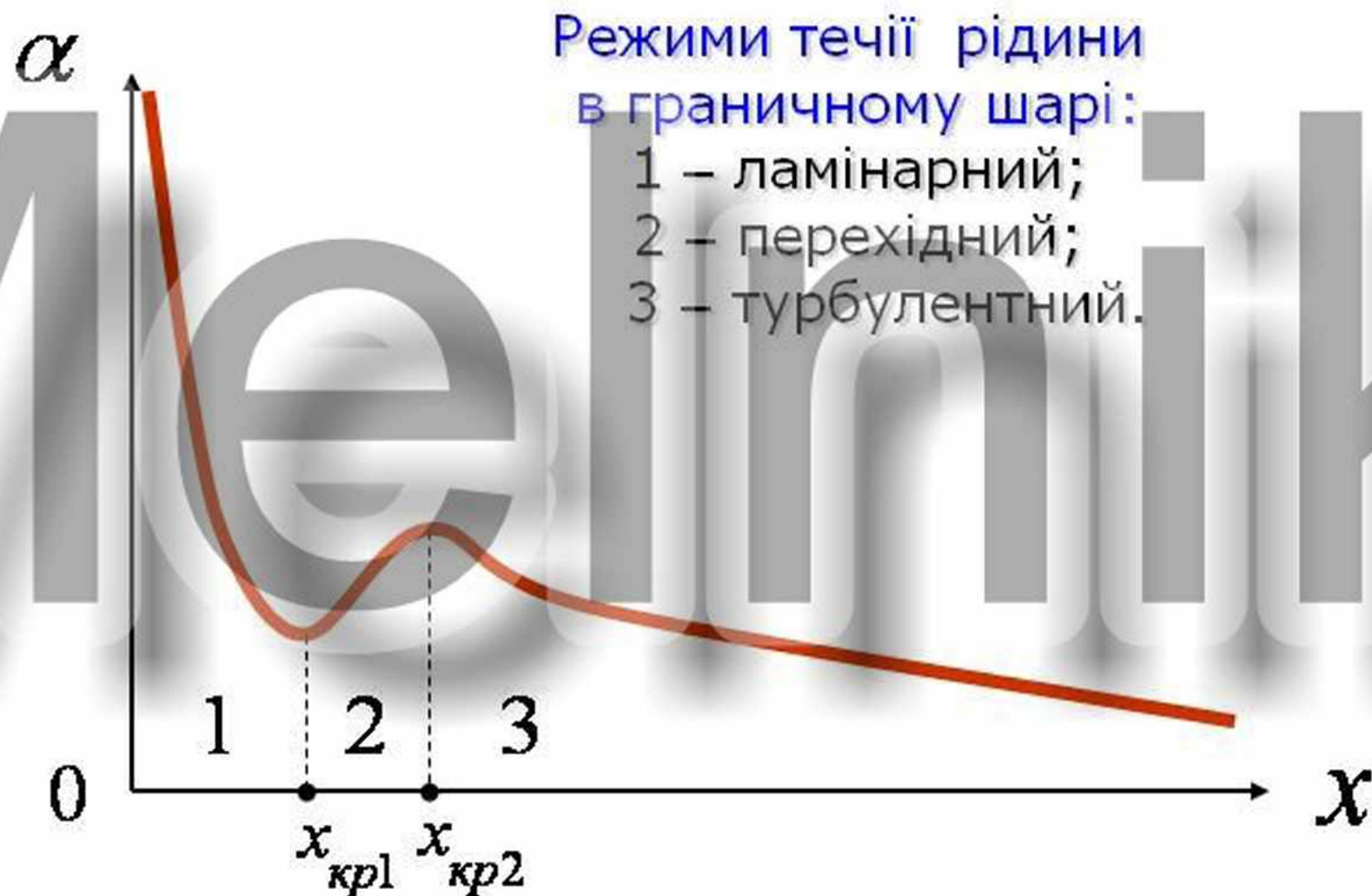
- Якщо вся пластина покрита турбулентним шаром (висока ступінь турбулізації набігаючого потоку, відповідний профіль початкової кромки), то зміна коефіцієнта тепловіддачі зображується кривою 1 і вище приведене співвідношення справедливе. Якщо ж на передній частині пластини існує зона з ламінарним рухом, то зміна коефіцієнта тепловіддачі вздовж пластини матиме більш складний вид (крива 2) і у цьому випадку середній коефіцієнт тепловіддачі необхідно розраховувати для кожної зони окремо. Так як область перехідного режиму не завжди може бути точно визначена ($\Delta x = x_{\text{кр}2} - x_{\text{кр}1}$), то в багатьох практичних розрахунках приймають що перехід з ламінарного режиму в турбулентний відбувається при певному значенні x (тобто, замінюють ділянку Δx точкою).

Зміна коефіцієнта тепловіддачі вздовж пластини за різних режимів обтікання

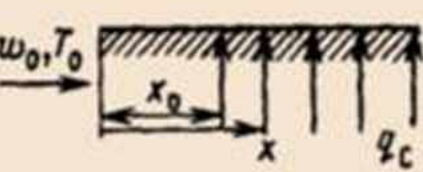


- 1- повністю турбулентний рух в пристінному шарі на усій довжині пластини;
2- змішаний рух (а – ламінарний, б- перехідний; в- турбулентний).

Характер зміни локального коефіцієнта тепловіддачі вздовж пластини



Узагальнена таблиця розрахункових формул для вимушеної конвекції

Обтекаемое тело	Расчетная формула	Определяющий размер	Пределы применимости формулы	Примечания
Плоская стенка: ламинарный пограничный слой 	$Nu = 0,332 Re^{0,5} Pr^{0,33} (Pr/Pr_c)^{0,25}$ $\bar{Nu} = 0,664 Re^{0,5} Pr^{0,33} (Pr/Pr_c)^{0,25}$	x l	$\begin{cases} Re < Re_{кр} \\ 0,6 < Pr < 15 \end{cases}$	Среднее значение $Re_{кр} \approx \frac{w_0 x_{кр}}{\nu} = 5 \cdot 10^5$
Турбулентный пограничный слой 	$Nu = 0,0296 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_c)^{0,25}$ $\bar{Nu} = 0,037 Re^{0,8} Pr^{0,43} (Pr/Pr_c)^{0,25}$	x l	—	При высокой начальной турбулентности набегающего потока или при неудобообтекаемой турбулизирующей входной кромке [55]
Смешанный режим течения 	$\bar{Nu} = [0,664 Re_{кр}^{0,5} Pr^{0,33} + 0,037 (Re^{0,8} - Re_{кр}^{0,8}) Pr^{0,43}] (Pr/Pr_c)^{0,25}$	l	—	На начальном участке ламинарный пограничный слой, на остальной части пластины – турбулентный [21]
Пластина с необогреваемым начальным участком. Ламинарный пограничный слой 	$Nu = 0,33 Re^{0,5} Pr^{0,33} (1 - x_0/x)^{0,2} \times (Pr/Pr_0)^{0,25}$	$\lambda - x_0$	$\begin{cases} 3 < Re < 3 \cdot 10^4 \\ 0,7 < Pr < 500 \end{cases}$	[21]
Шар 	$\bar{Nu} = 2 + 0,03 Re^{0,54} Pr^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Pr^{0,36}$	d	$\begin{cases} Re < 3 \cdot 10^5 \\ 0,6 < Pr < 8 \cdot 10^3 \end{cases}$	[31]