Лекція . Пароутворення – види та механізм. Режими кипіння. Крива кипіння. Кипіння в умовах вільної конвекції.

Тепловіддача при кипінні рідин на поверхнях нагріву твердих тіл має дуже важливе значення в сучасній енергетиці і знаходить широке застосування в різноманітних теплообмінних апаратах харчової, хімічної, нафтопереробної промисловості та інших галузях народного господарства.

Кипіння- це пароутворення всередині рідкої фази. Воно можливе в усьому температурному інтервалі між потрійною точкою речовини та її критичною точкою. В процесі фазового перетворення "поглинається" теплота пароутворення. Тому, процес кипіння, як правило, пов'язаний з підведенням теплоти до киплячої рідини. Причому не просто теплоти, а для його початку завжди треба мати деякий перегрів рідини, тобто, щоб температура рідини була більшою за температуру насичення при даному тиску, а температура поверхні теплообміну більша за температуру киплячої рідини.

Тобто, для виникнення кипіння необхідні наступні фактори:

ПЕРЕГРІВ РІДИНИ ВІДНОСНО ТЕМПЕРАТУРИ НАСИЧЕННЯ ПРИ ДАНОМУ Р,

НАЯВНІСТЬ ЦЕНТРІВ ПАРОУТВОРЕННЯ, якими можуть "служити" мікронерівності на поверхні, розчинені гази, частинки накипу і т.п.

ВИДИ КИПІННЯ

Поверхневе

(тепловіддача при кипіні на твердих поверхнях нагріву)

- Поверхневе-рідина "недогріта" $\Delta t<5^{o}C$ (малоефективний режим)
- Розвинене бульбашкове-$5^{o}<\Delta t<25-30^{o}C$ (найбільше значення коефіцієнта Тепловіддачі)
- Перехідне
- Плівкове-$\Delta t>100^{o}C$ (недопустимий режим)

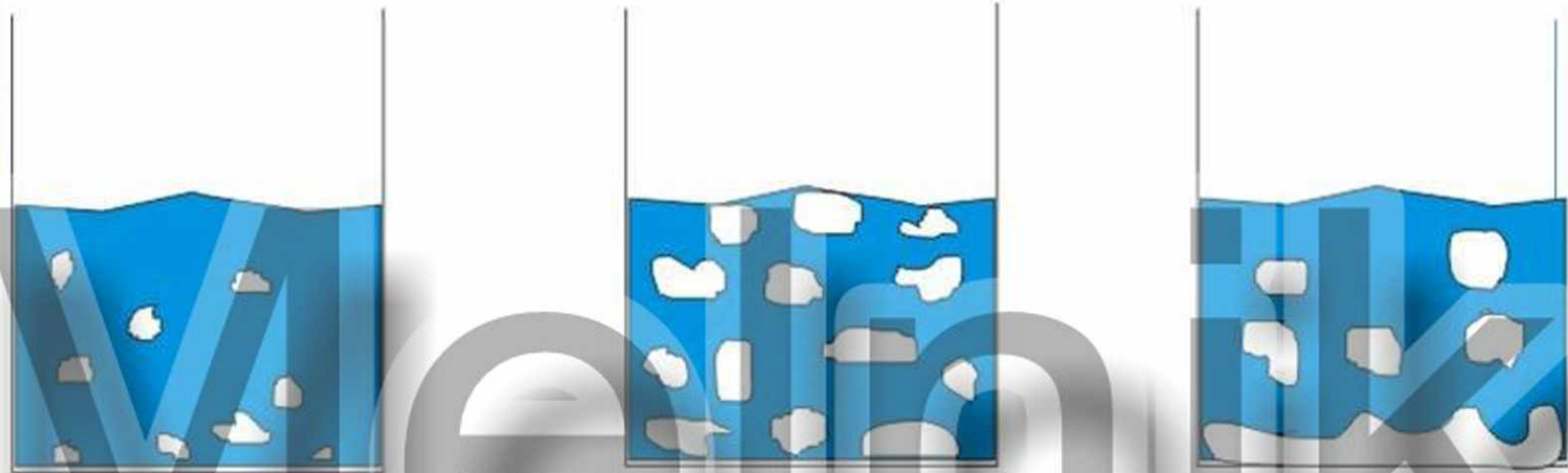
Об'ємне

Може відбуватися не тільки при перегріві рідини, але й при "скиданні" тиску

*__Значення Δt наведені для води при атмосферному тиску__

(де Δt перегрів рідини у **пристінному** шарі!!!).

Види кипіння рідини



Поверхневе-процес кипіння обмежується тонким пристінним шаром. Тепло-віддача низька. Має обмежене застосування.

Розвинене бульбашкове кипіння - найбільш ефективне. Теплота відводиться у формі теплоти пароутворення та у вигляді надлишкової ентальпії пристінної рідини.

Плівкове кипіння- недопустимий вид кипіння. Тепловіддача різко зменшується – температура поверхні нагрівання різко зростає, що може призвести до руйнування поверхні нагріву.

Види кипіння

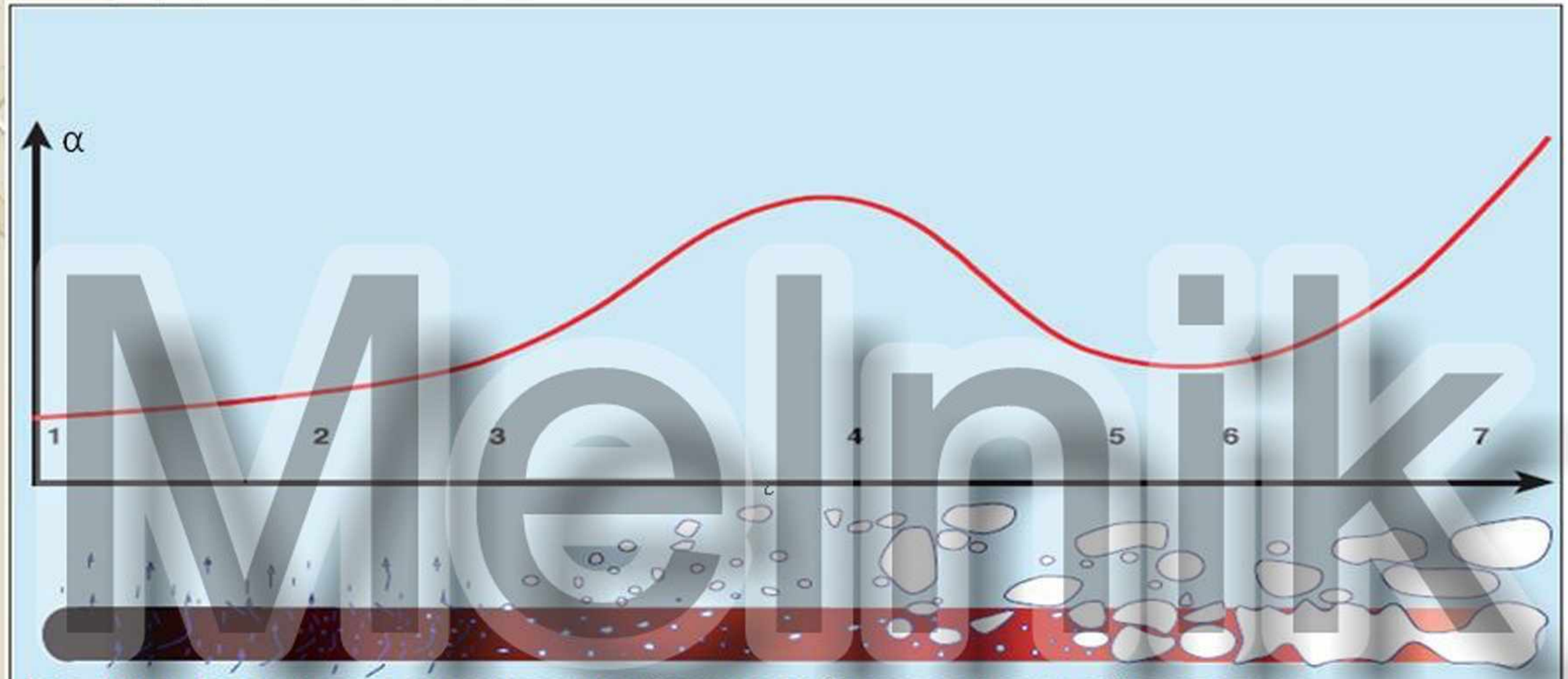


Рис. 01 А. Теплоотдача при кипении в большом объеме на нагретой проволоке

1 - 2. Свободная конвекция. В этой зоне пузырьки не образуются.

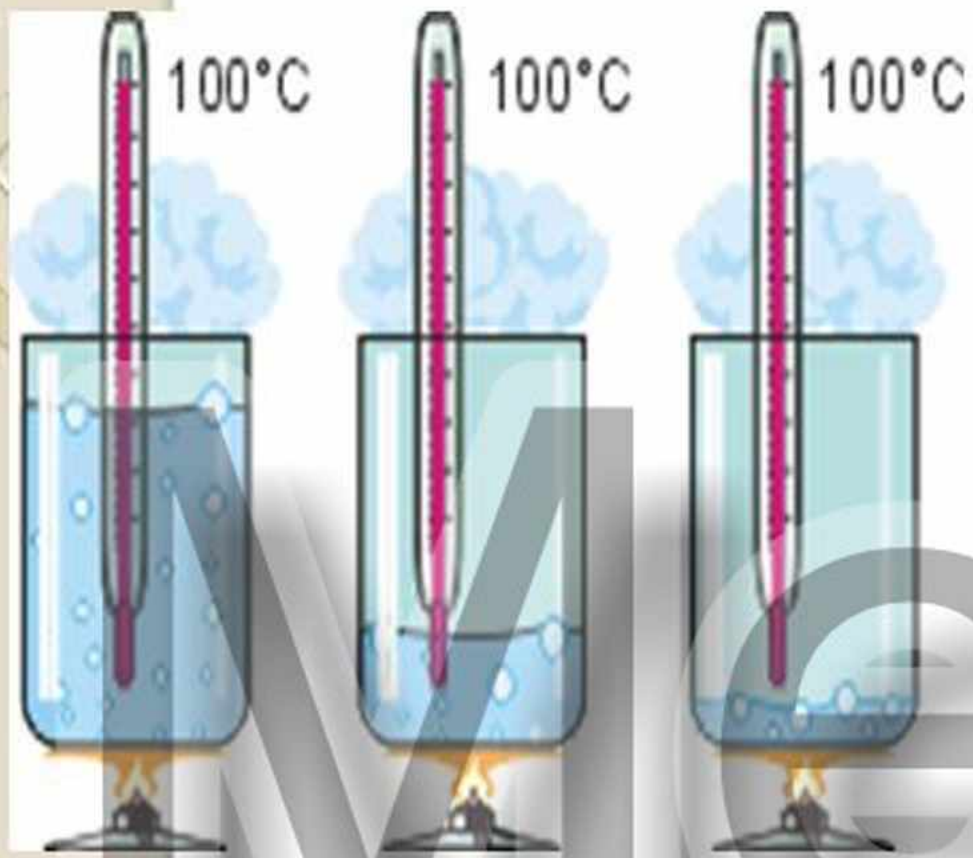
2 - 3. Кипение в фазе переохлаждения. На поверхности проволоки образуются пузырьки, но с перемещением в более холодный слой жидкости они захлопываются. Коэффициент теплопередачи быстро растет на этом этапе, так как к естественной конвекции, обеспечивающей сравнительно низкую теплоотдачу, добавляется пузырьковое кипение.

3 - 4. Пузырьковое кипение в фазе насыщения. На проволоке происходит образование пара. Коэффициент теплоотдачи в этой зоне имеет максимальное значение (кризис кипения).

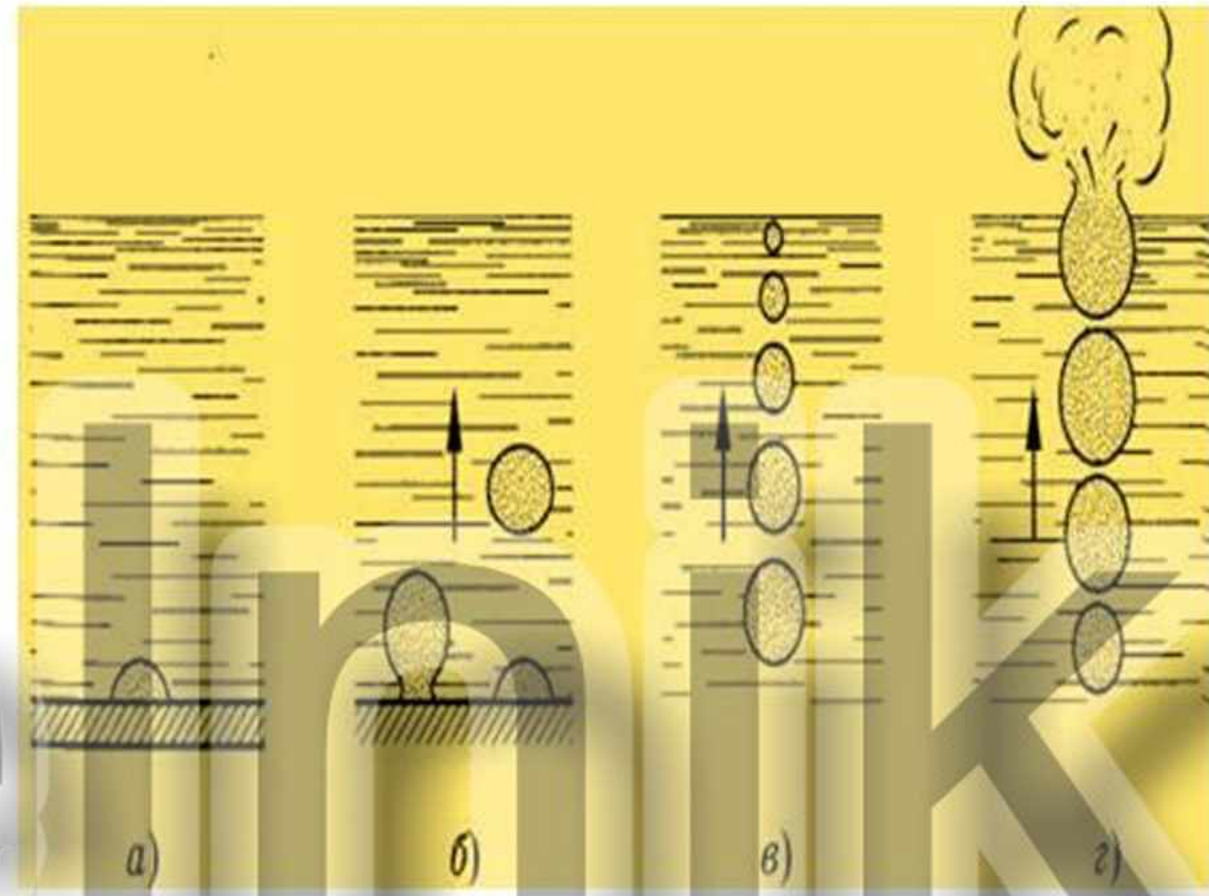
4 - 5. Частичное пленочное кипение. Тепловой поток достаточно велик, чтобы часть поверхности была покрыта паром. Однако это ведет к снижению коэффициента теплоотдачи вследствие теплоизолирующих свойств газа.

5 - 6. Устойчивое пленочное кипение. Вся поверхность покрыта пленкой пара. В этой зоне коэффициент теплоотдачи минимальный.

6 - 7. Устойчивое пленочное кипение с тепловым излучением. Разность температур достаточно велика, чтобы тепловое излучение составляло все более важную часть общего теплового потока.

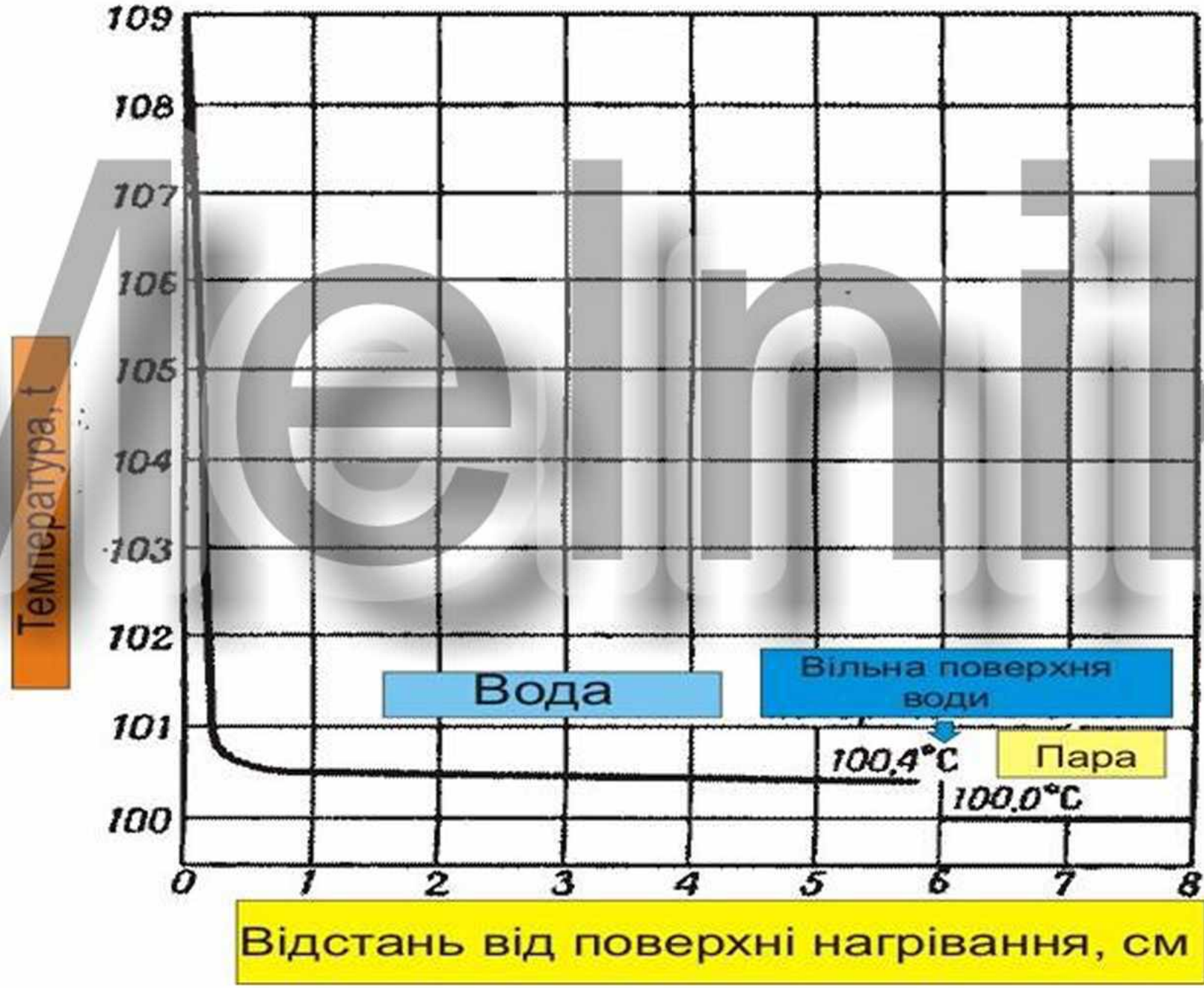


При кипінні рідини при незмінному тиску температура залишається постійною, тобто, кипіння: ізобарно-ізотермічний процес.



Різні види утворення бульбашок:
а) процес зародження бульбашки;
б) процес "відриву" бульбашки;
в) поверхневе кипіння (бульбашки ввідриваються, але не "ростуть" в об'ємі, а по мірі "піднімання" – зменшуються, попадаючи в недогр. рідину;
г) розвинене бульбашкове кипіння.

Крива розподілу температури в киплячій рідині над горизонтальною поверхнею нагріву (по Якобу та Лінке)



Залежність радіуса бульбашки від перепаду тиску та тиску пари в бульбашці

Значения Δp и $p_п \cdot 10^5$, Па, для воды

R, мм	Δp	$p_п$	R, мм	Δp	$p_п$
1,0	0,0012	1,0012	0,01	0,12	1,12
0,1	0,012	1,012	0,001	1,2	2,2

Melnik

Критичний радіус бульбашки

Висока інтенсивність тепловіддачі при бульбашковому кипінні пояснюється руйнуванням граничного шару на поверхні нагріву паровими бульбашками.

Умови існування бульбашки визначаються рівнянням Лапласа:

$$\Delta p = p_1 - p = \frac{2\sigma}{R_к} \quad (1),$$

згідно якому тиск пари всередині бульбашки p_1 повинен бути більшим тиску рідини та сили поверхневого натягу.

При $\Delta p > (2\sigma / R_к)$ парова бульбашка росте,

а при $\Delta p < (2\sigma / R_к)$ - вона зконденсується.

Критичний радіус бульбашки можна обчислити по формулі:

$$R_к = \frac{2\sigma T_н}{r\rho''(T_c - T_н)}. \quad (2)$$

Форми парових бульбашок (рис.1) і меніска (рис.2) та крайовий кут змочування Θ на змочуваній (а) та незмочуваній (б) поверхнях

Рис. 1

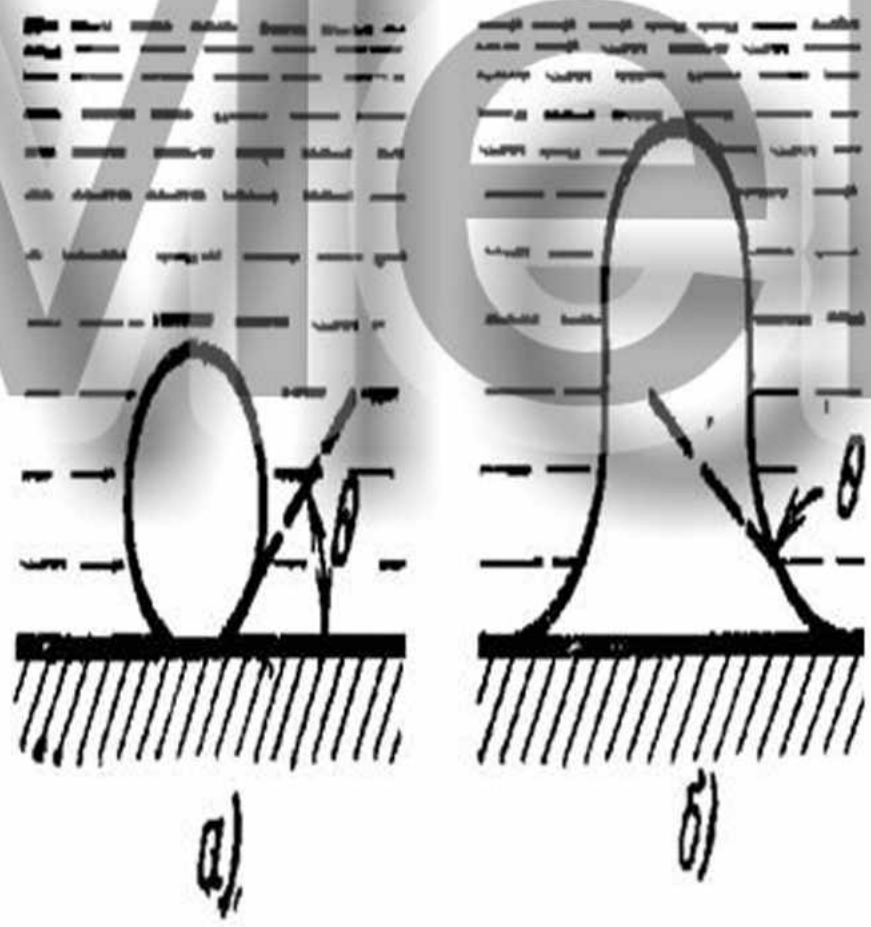
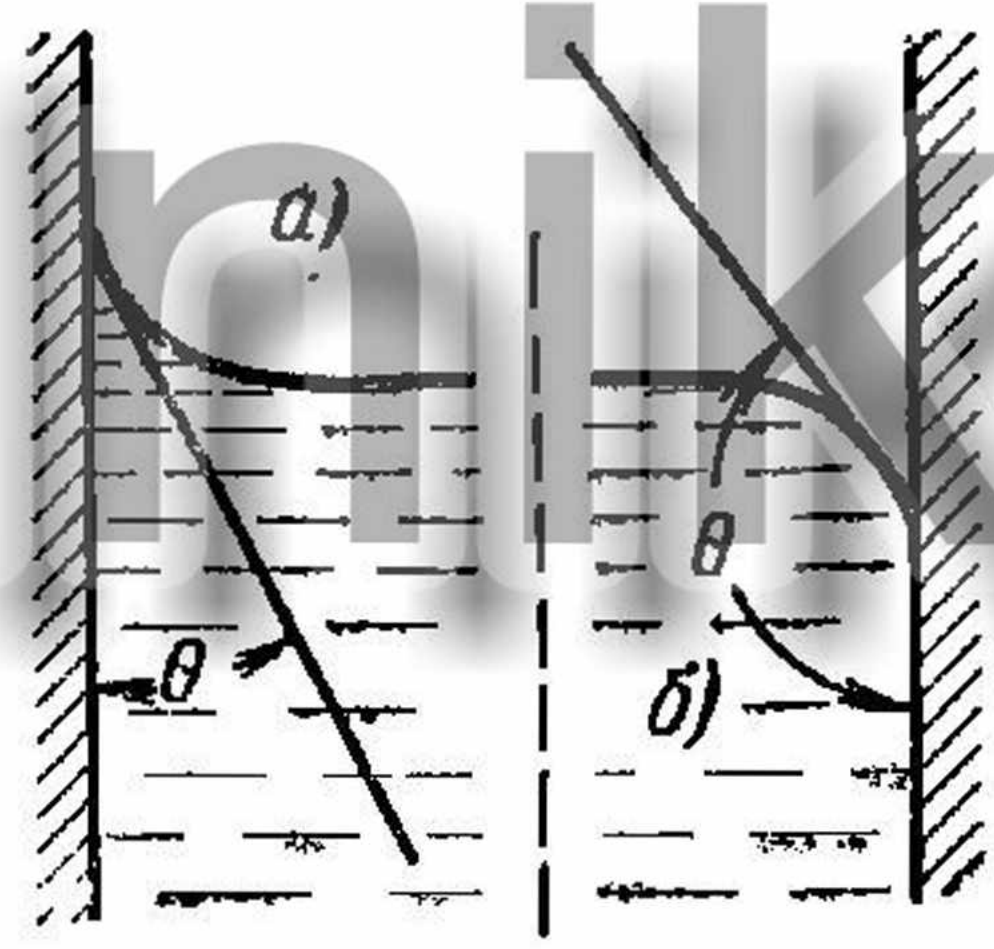
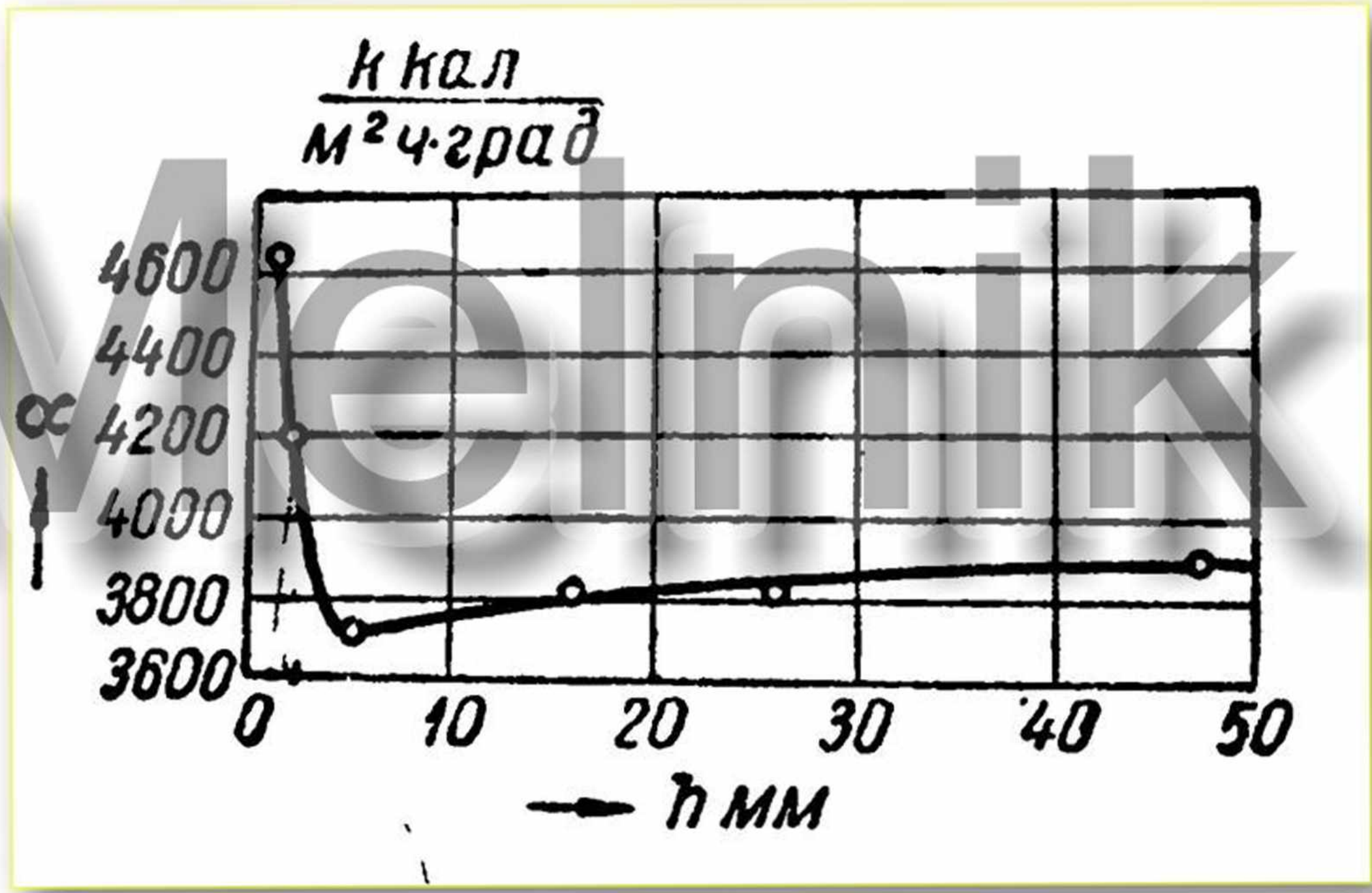


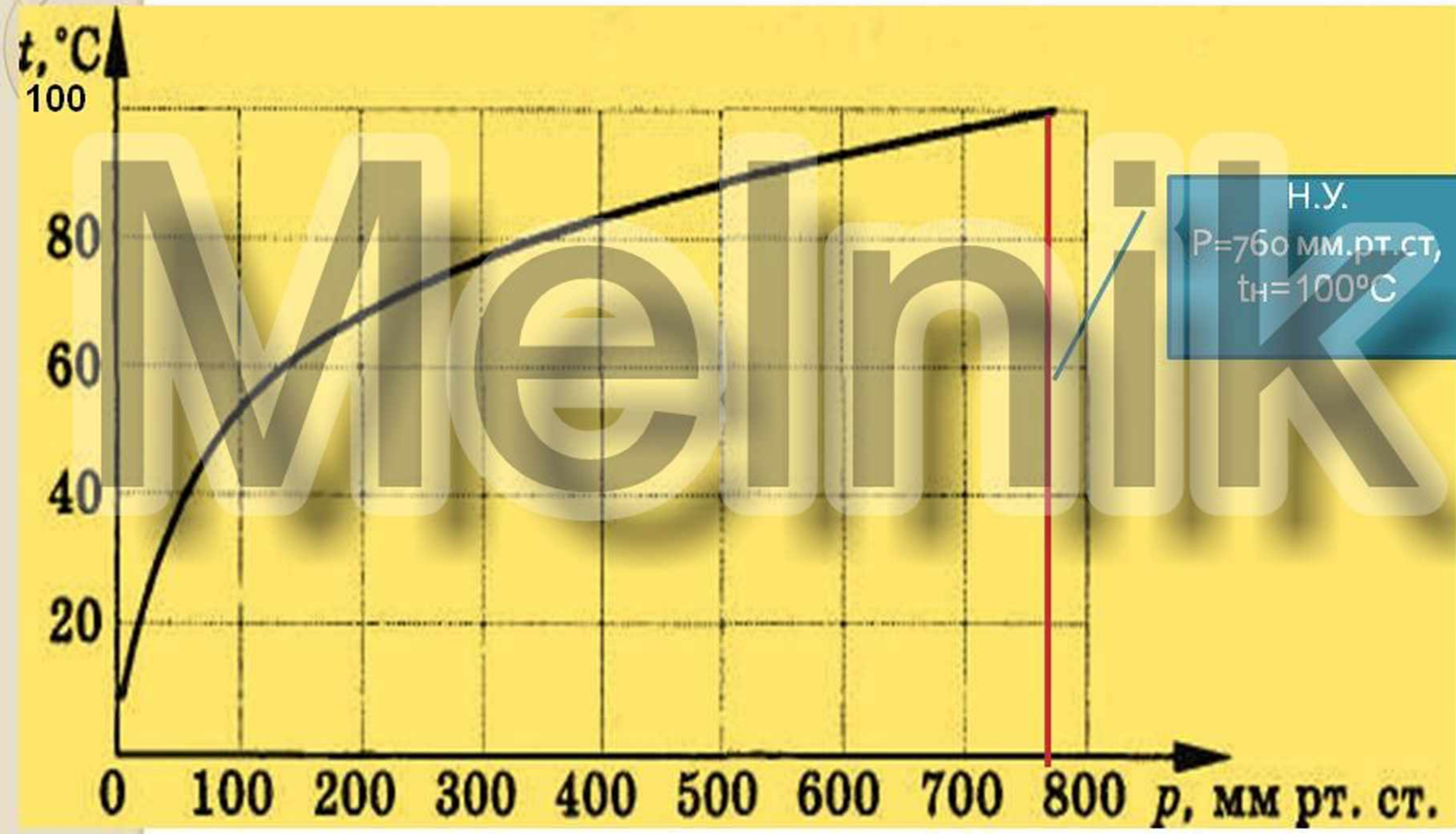
Рис.2



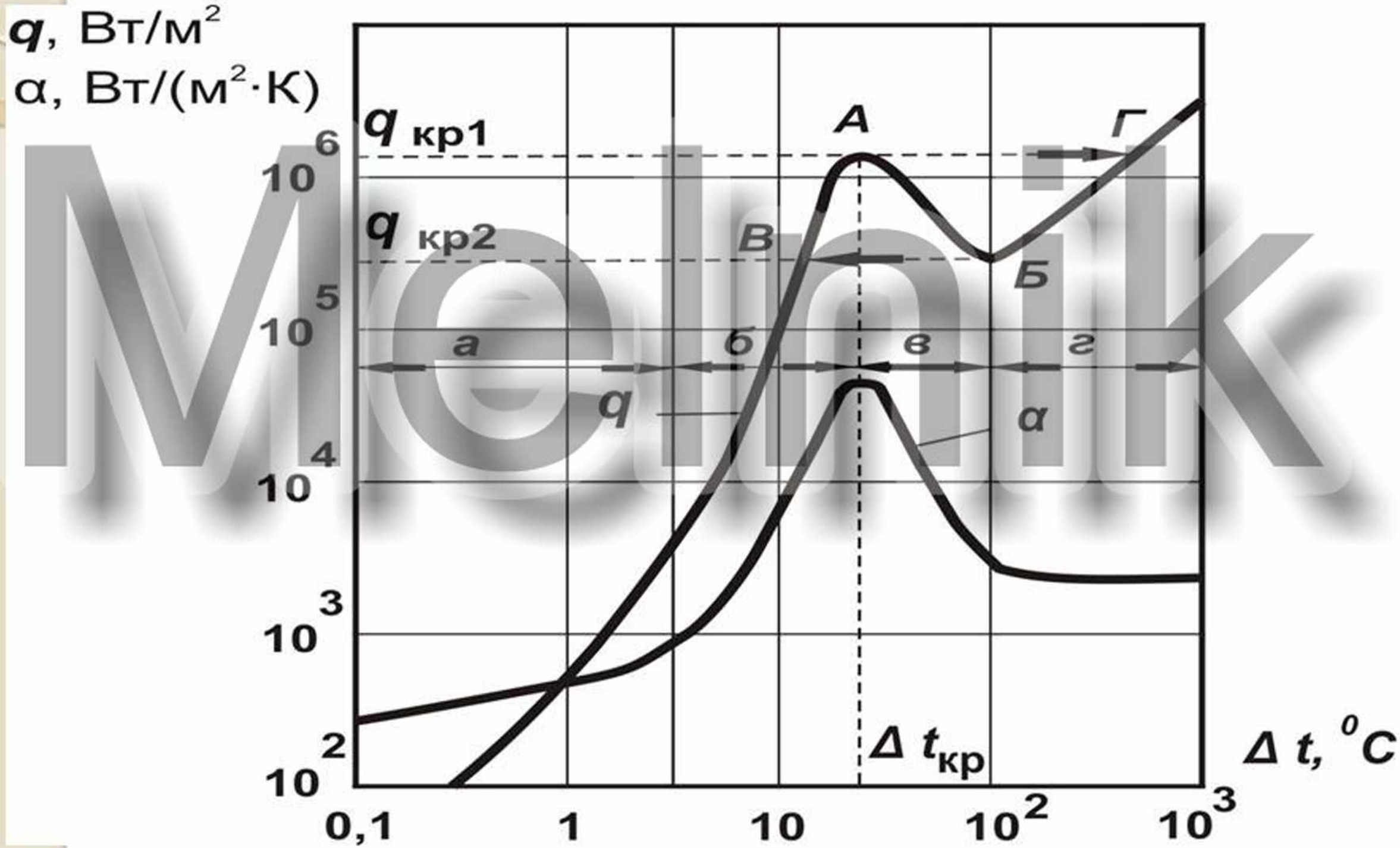
Залежність зміни коефіцієнта тепловіддачі по висоті рідини при кипіння на горизонтальній плиті (дані М.Якоба при p=1атм, q=36 400 $\text{ккал}/\text{м}^2 \times \text{К}$



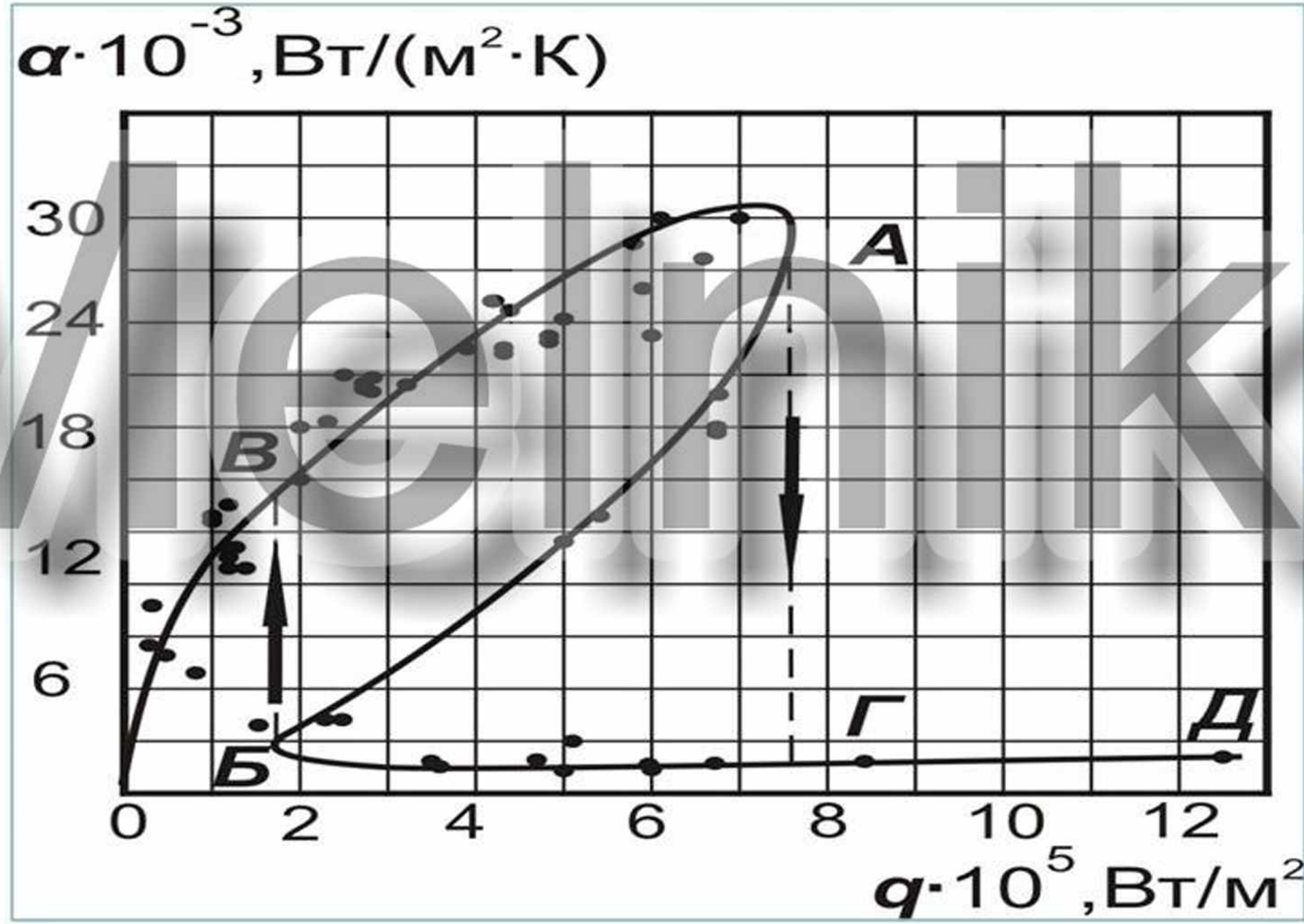
Залежність зміни температури насичення води від тиску



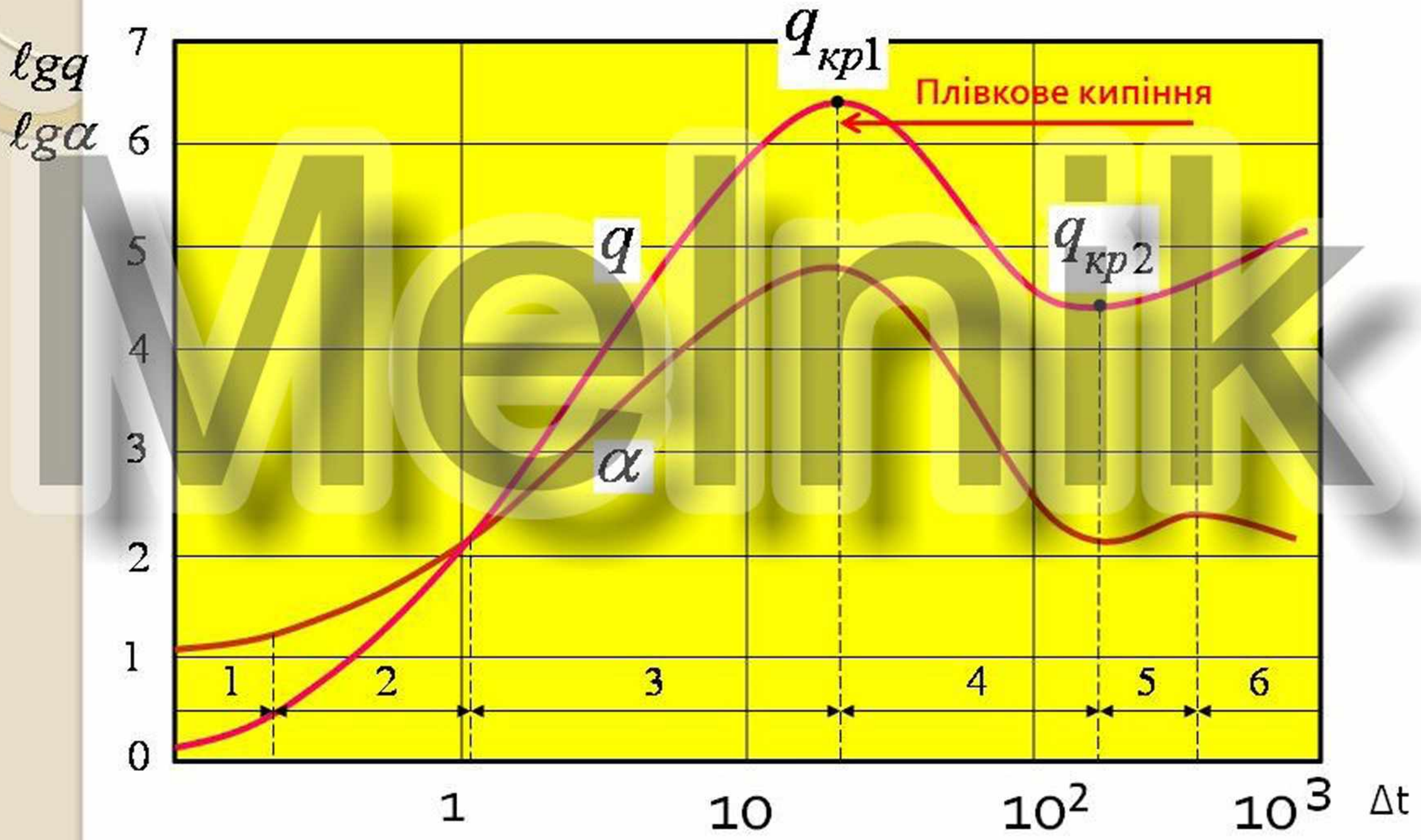
Криві кипіння води за атмосферного тиску (кризи кипіння)



Залежність коефіцієнта тепловіддачі при кипінні від густини теплового потоку



Крива кипіння води при атмосферному тиску



Характерні області кривої кипіння рідини

На кривій кипіння (води) відмічено шість зон:

1 – конвекція;

2 – нестійке кипіння (перехід від конвекції до розвиненого бульбашкового кипіння;

3 – розвинуте бульбашкове кипіння;

4 – перехід від розвинутого бульбашкового кипіння до плівкового;

5 – стійке плівкове кипіння (вклад променистого випромінювання незначне);

6 – плівкове кипіння при значному променистому випромінюванні.

Перша криза кипіння обумовлена переходом від бульбашкового кипіння до плівкового. Їй відповідає максимальна густина теплового потоку $q_{кр1}$. При цьому відбувається різке зниження тепловіддачі та ріст температури тепловіддаючої поверхні – що може призвести до руйнування поверхні нагріву. Значення критичного теплового потоку дуже важливе при проектуванні сучасних ефективних кип'ятильних та випарних апаратів (особливо з електронагрівачами, тобто, з постійним тепловим потоком) .

Melnik

Перша криза кипіння

Критичний коефіцієнт тепловіддачі: $\alpha_{кр1} = q_{кр1} / \Delta t_{кр1}$

Для води при атмосферному тиску маємо:

$q_{кр1} \approx 1{,}2 \cdot 10^6$ Вт/м²; $\Delta t_{кр1} \approx 25$ К.

Найбільше значення критичного теплового потоку для води відповідає тиску насичення $p_н = (0{,}3 - 0{,}4) p_{кр} \approx 77$ бар ($p_{кр} \approx 221$ бар).

Гідродинамічне трактування кризи кипіння згідно С.С.Кутателадзе базується та твердженні, що криза виникає в результаті динамічної нестійкості двохфазного киплячого шару, що виникає під дією сили тяжіння, поверхневого натягу та динамічного напору потоку. В загальному випадку це виражається як:

$$q_{кр1} = 0{,}145 r \sqrt{\rho''} \cdot \sqrt[4]{\sigma (\rho' - \rho'') g}, \left[Вт/м^2 \right]$$

Melnik

Друга криза кипіння

Має місце на початку зворотного переходу від плівкового режиму кипіння до бульбашкового. На кривій кипіння він відповідає $q_{2кр}$. При цьому, парова плівка раптово руйнується, температура поверхні нагріву різко зменшується. Тепловий потік при цьому суттєво менший першого критичного і для води при атмосферному тиску становить $q_{2кр} \approx 3,5 \cdot 10^4 \; Вт/м^2$.

- В роботі Н.Зібера висказана гіпотеза, що критична швидкість кипіння пропорційна швидкісті спливання великих деформованих бульбашок, в результаті чого отримана наступна залежність, яка достатньо добре підтверджена дослідними даними:

$$q_{кр2} = 0,125 r \rho'' \sqrt[4]{\frac{\sigma g(\rho' - \rho'')}{\rho'^2}}.$$

Друга критична різниця температур

Коефіцієнт тепловіддачі за другої кризи можна знайти як:

$$\alpha_{кр2} = 0{,}62\sqrt[4]{\frac{\lambda''^3\, r(\rho'-\rho'')g}{\nu''\Delta t_{кр2} d}} = \frac{q_{кр2}}{\Delta t_{кр2}},$$

Однак, так як критична різниця температур також невідома, то з цього рівняння, якщо його розв'язати відносно $\Delta t_{кр2}$, можна отримати:

$$\Delta t_{кр2} = \left[\frac{q_{кр2}}{0{,}62\sqrt[4]{\frac{\lambda''^3\, r(\rho'-\rho'')g}{\nu'' d}}}\right]^{4/3}.$$

В усіх формулах теплоту пароутворення r необхідно підставляти як і усі інші показники в системі Сі, тобто в Дж / кг.

По даним різних авторів для різних речовин $q_{кр2}/q_{кр1} \approx 0{,}17...0{,}22.$

Вплив різних факторів на інтенсивність тепловіддачі при кипінні

- Коефіцієнт тепловіддачі зростає із збільшенням густини теплового потоку і тиску. Ця залежність характерна для усіх рідин , які змочують поверхню нагріву.
- Інтенсивність тепловіддачі залежить від фізичних властивостей рідини: теплопровідності (з її ростом інтенсифікується тепловіддача), в"язкості (збільшення в'язкості зменшує тепловіддачу), поверхневого натягу, крайового кута змочування та інших факторів, які носять досить складний характер впливу на тепловіддачу.
- Інтенсивність тепловіддачі залежить від стану поверхні нагріву, її чистоти та матеріалу та зовсім не залежить від її форми, розміру та орієнтації (за викл. коли тепловіддаюча поверхня повернута вниз, високі вертикальні труби та горизонтальні пучки).
- Під час кипіння за умов вимушеного руху рідини інтенсивність тепловіддачі залежить від швидкості руху рідини (за умов невисоких густин теплового потоку).
- Під час кипіння у трубах інтенсивність тепловіддачі залежить від структури потоку і паровмісту суміші. У випарних апаратах і випарниках з вертикально розміщеними трубами інтенсивність тепловіддачі залежить від рівня рідини в апараті.

Коефіцієнт тепловіддачі зростає із збільшенням густини теплового потоку і тиску. Ця залежність характерна для усіх рідин , які змочують поверхню нагріву.

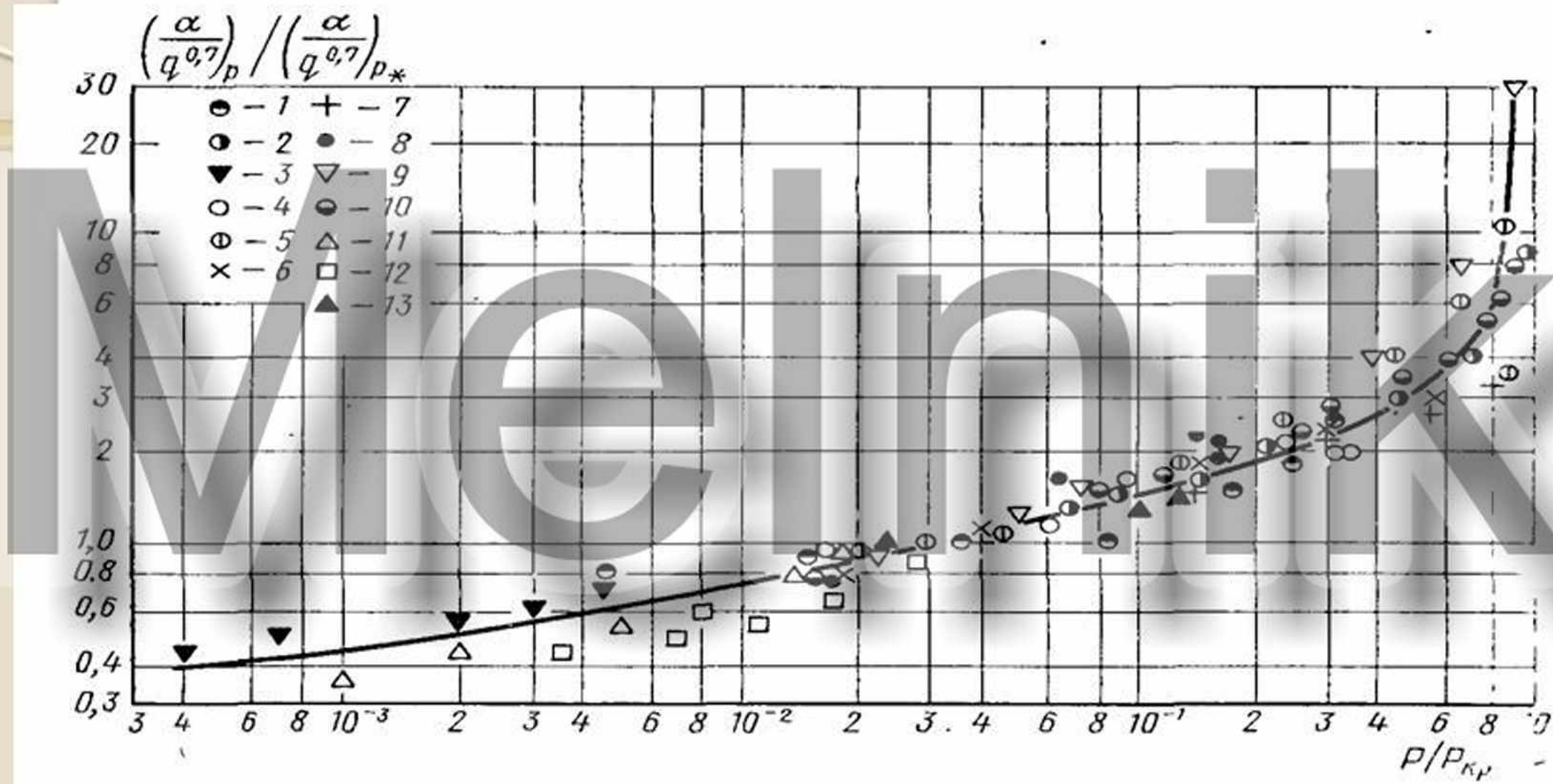


Рис. 7.2. Влияние давления на коэффициент теплоотдачи при кипении [13]:

1 — вода (p=0,101÷7,14 МПа); *2* — вода (p=0,101÷19,6 МПа); *3* — вода (p=0,0088÷0,1065 МПа); *4* — вода (p=0,101÷7,25 МПа); *5* — н-пентан (p=0,101÷2,86 МПа); *6* — 80% гептан (p=0,045÷1,49 МПа); *7* — н-пентан (p=0,045÷2,16 МПа); *8* — этиловый спирт (p=0,101÷0,79 МПа); *9* — бензол (p=0,101÷4,43 МПа); *10* — этиловый спирт (p=0,101÷5,87 МПа); *11* — метиловый спирт (p=0,078÷0,139 МПа); *12* — бутиловый спирт (p=0,0166÷0,138 МПа); *13* — фреон-12 (p=0,101÷0,486 МПа)

Вплив шорсткості поверхні на величину коефіцієнта тепловіддачі для фреону-113

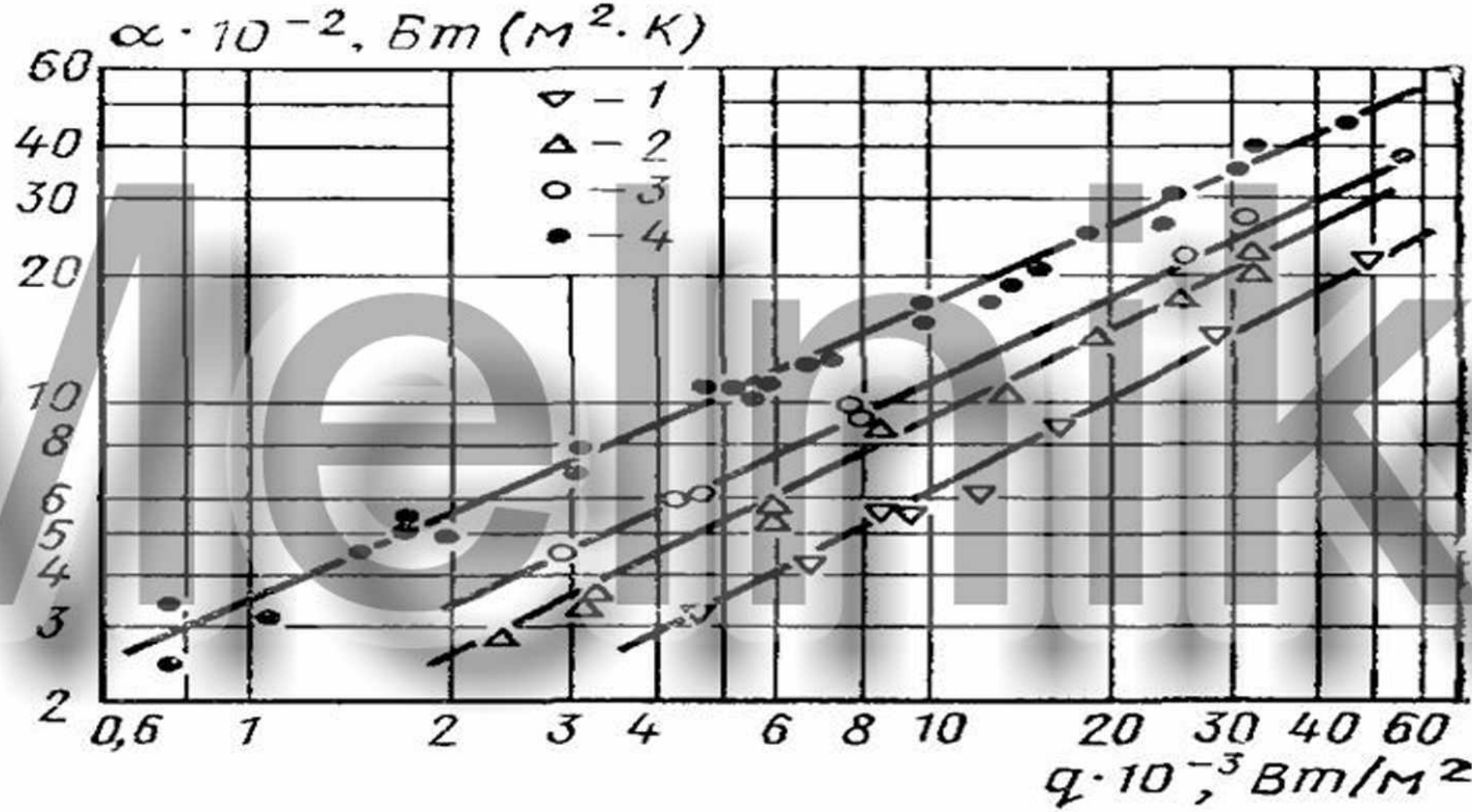


Рис. 7.10. Зависимость α от q при кипении фреона-113 на поверхностях нагрева разной шероховатости ($p = 1{,}0 \cdot 10^5$ Па):

1 — $R_z = 0{,}3-0{,}45$ мкм, *2* — $R_z = 1{,}9$ мкм, *3* — $R_z = 6{,}3$ мкм; *4* — $R_z = 18{,}7-58$ мкм

Вплив рівня рідини тв товщини граничного шару на інтенсивність тепловіддачі при кипінні.

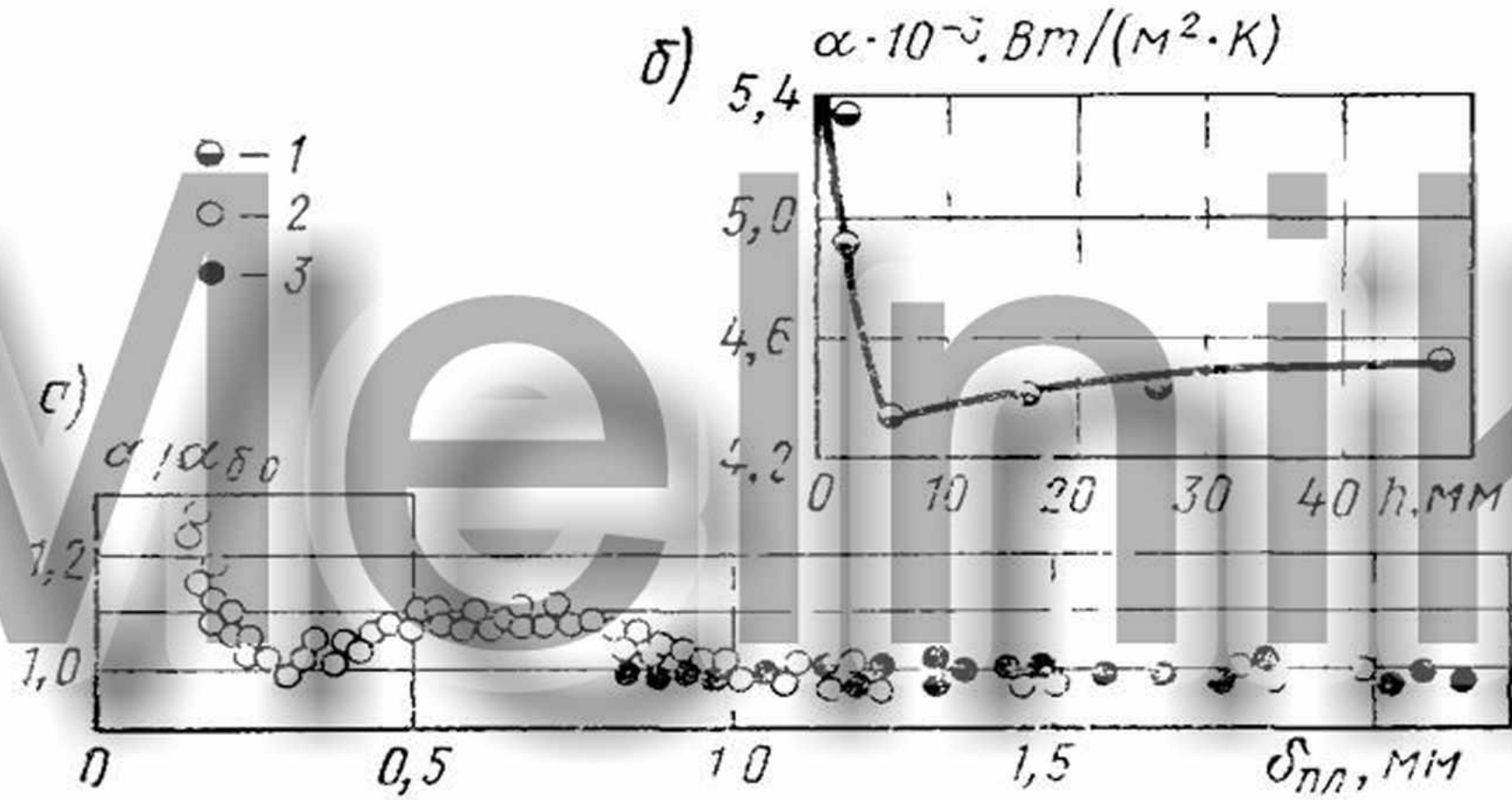


Рис. 7.9. Зависимость коэффициента теплоотдачи от толщины пленки $\delta_{пл}$ ($а$) и от высоты уровня жидкости h ($б$) при кипении воды на горизонтальной плоской поверхности ($p = 1{,}0 \cdot 10^5$ Па)

1 — $q = 42$ кВт/м² (данные М. Якоба); *2* — $q = 26$ кВт/м², *3* — $q = 610$ кВт/м² [199]

Інтенсивність тепловіддачі залежить від фізичних властивостей рідини: теплопровідності (з її ростом інтенсифікується тепловіддача), в"язкості (збільшення в'язкості зменшує тепловіддачу), поверхневого натягу, крайового кута змочування та інших факторів, які носять досить складний характер впливу на тепловіддачу.

Melnik