



# ТЕПЛОМАССОБМЕН

***Лекция 12. Теплообмен при кипении.***

**Кипение и конденсация,  
Плавление и затвердевание (замерзание),  
Сублимация и десублимация** – процессы **фазового перехода** из одного агрегатного состояния (**фазы**) в другое.

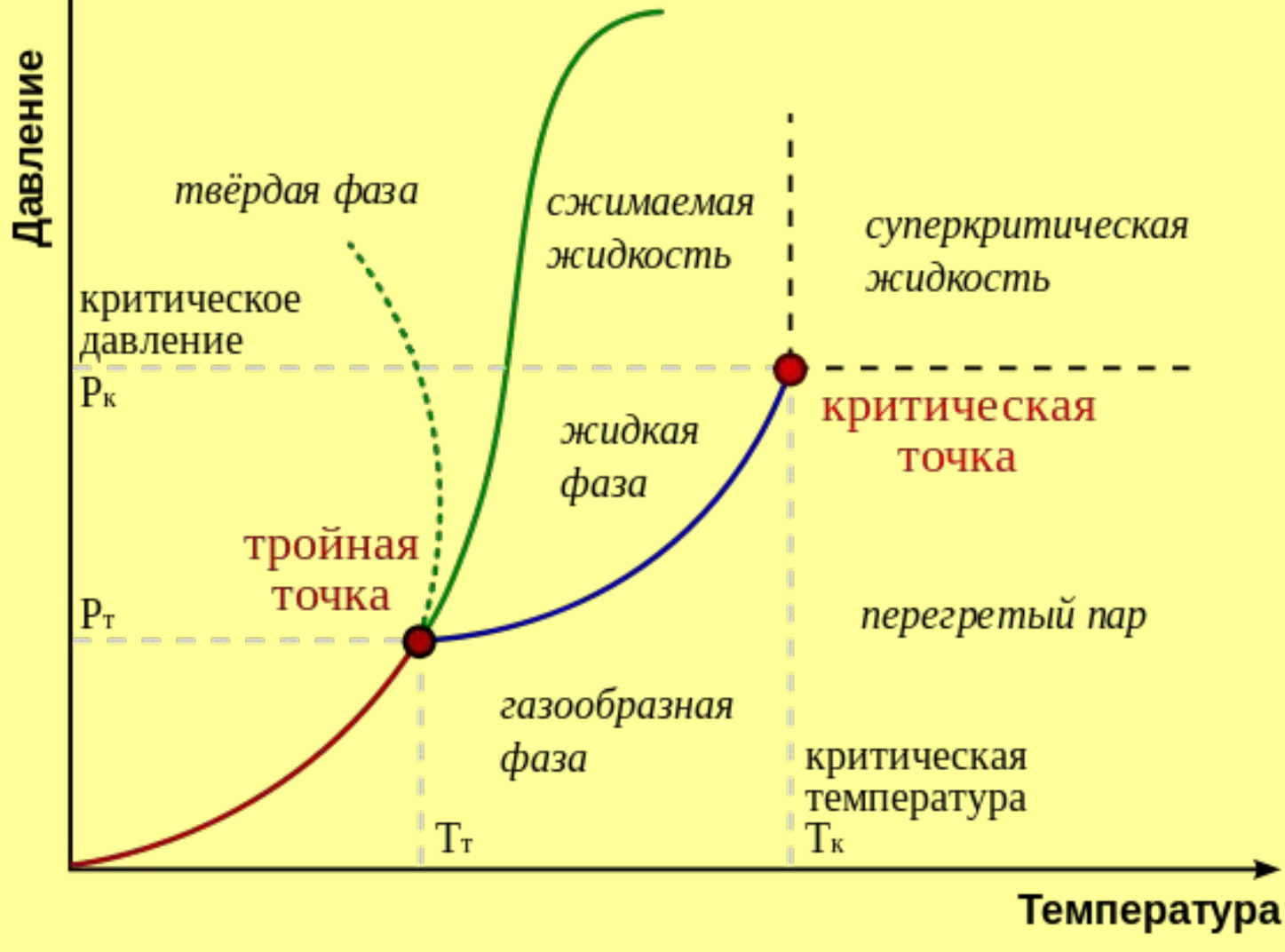
**Правило фаз Гиббса:**  $\psi = n - m + 2$

$\psi$  – число степеней свободы –

количество независимых параметров состояния ( $p$ ,  $v$ ,  $T$ )  
необходимое для полного описания системы ,

$n$  – число компонентов,

$m$  – число фаз

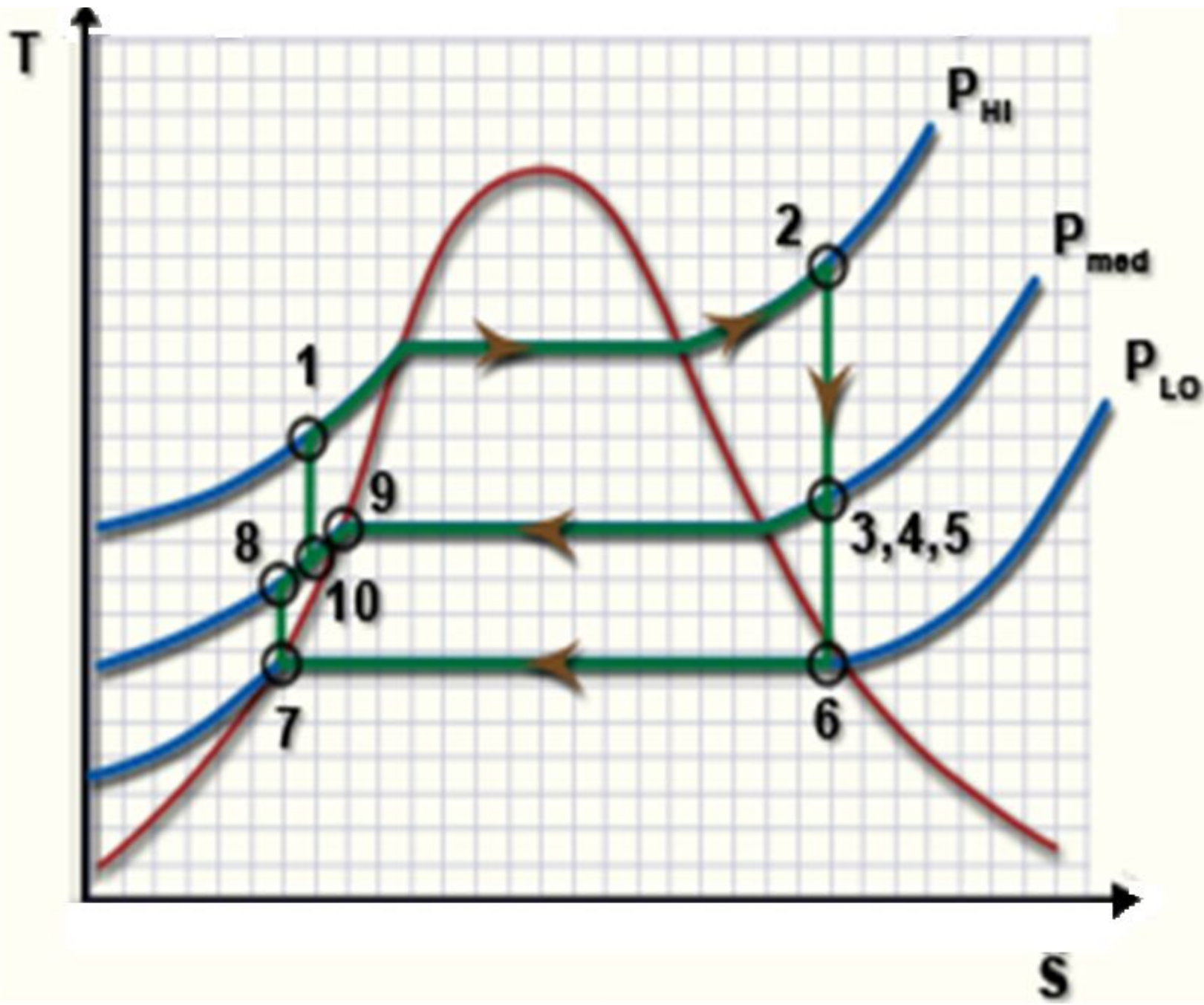


**Т-к** — линия **насыщения** (вода:  $t_H = 100^\circ\text{C}$ ,  $p_H = 1 \text{ бар} \approx 1 \text{ атм}$ ).

**Т** — **тройная точка** (вода:  $t_o = 0.01^\circ\text{C}$ ,  $p_o = 0.006 \text{ бар}$ )

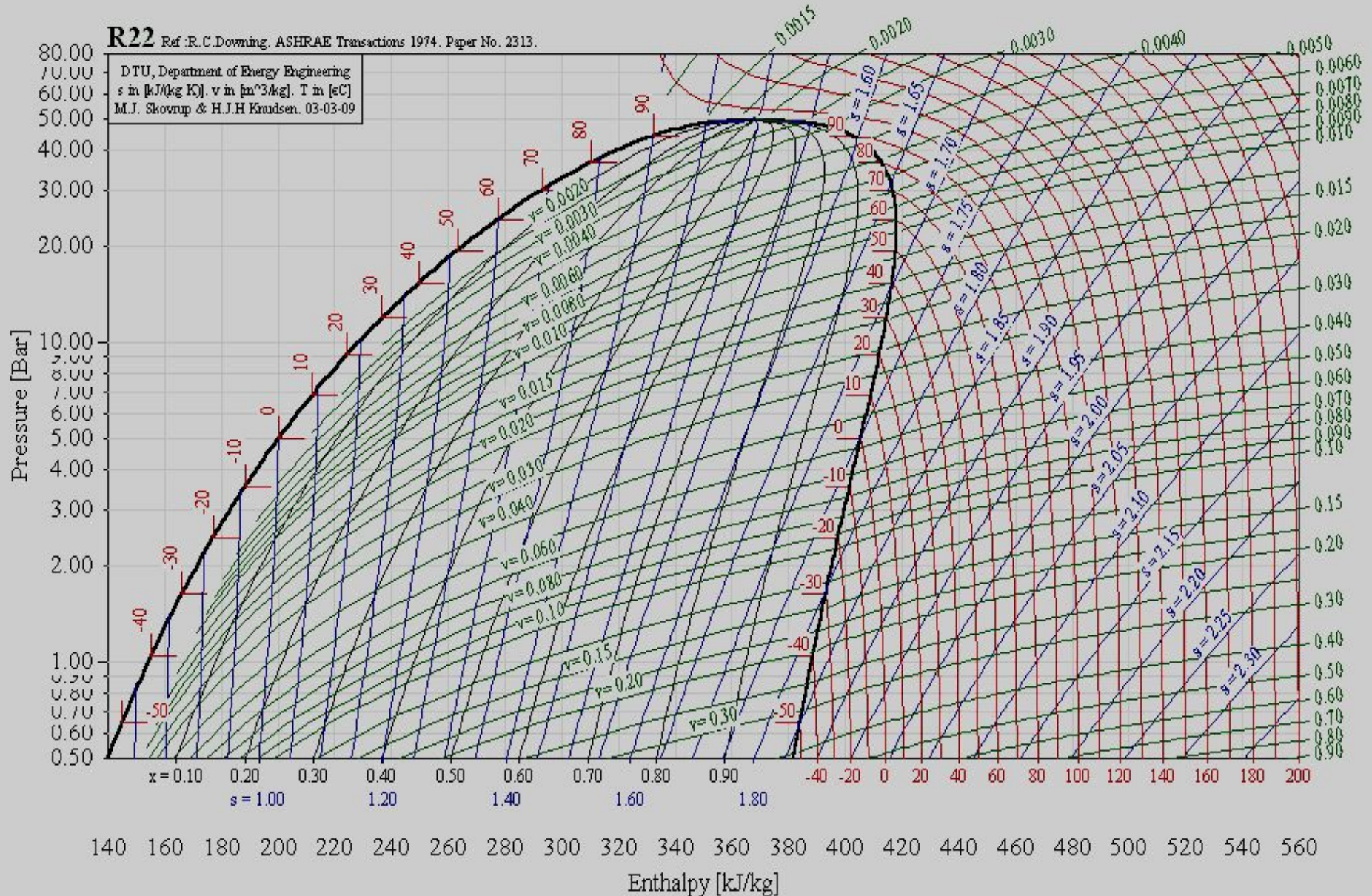
**к** — **критическая точка** (вода:  $t_o = 374^\circ\text{C}$ ,  $p_o = 220.6 \text{ бар}$ ) — плотность жидкости и её насыщенного пара равны, а поверхностное натяжение жидкости = 0, исчезает граница раздела фаз жидкость-пар.

# Процессы кипения и конденсации воды в TS диаграмме



# $p, h$ – диаграмма хладагента R22 (Хлордифторметан, $\text{CHClF}_2$ )

$$t_{\text{кр}} = 96.00 \text{ }^\circ\text{C}, \quad p_{\text{кр}} = 49.774 \text{ бар}, \quad v_{\text{кр}} = 0.00191 \text{ м}^3/\text{кг}$$



# СОСТОЯНИЕ НАСЫЩЕНИЯ

Состояние *равновесия* жидкой и газообразной фаз ( $m = 2$ ) одного компонента, например, воды ( $n = 1$ ), полностью характеризуемое *одним параметром состояния (одной степенью свободы,  $\psi = n - m + 2 = 1$ )*  $p_n$  или  $T_n$  ( $p_s$  или  $T_s$ ). В  $p, T$ -диаграмме представлено "линией насыщения" (при любом  $p_n$  – одна  $T_n$ )

## Уравнение Клапейрона – Клаузиуса

устанавливает однозначную зависимость температуры от давления на *линии насыщения*:

$$\left( \frac{dp}{dT} \right)_s = \frac{r}{T(v'' - v')}$$

$r = (h'' - h')$  – (скрытая) теплота фазового перехода (кипения или конденсации),  $v', h'$ ;  $v'', h''$  – удельные объёмы и энтальпии воды и пара на линии насыщения,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ,  $\text{Дж}/\text{кг}$  соответственно;

При **кипении** вещество переходит из жидкой фазы в газообразную **при подводе к системе *скрытой* теплоты парообразования**, которая **затрачивается** на преодоление сил межмолекулярного взаимодействия и работу расширения ( $v'' \gg v'$ ).

При **конденсации** пара (переходе в жидкое состояние) при тех же условиях **выделяется** точно такое же количество теплоты – ***скрытая теплота конденсации***, которую нужно **отводить** от системы.

Аналогично определяются фазовые переходы и скрытые теплоты ***плавления/затвердевания*** (твёрдое-жидкость) и ***сублимации/десублимации*** (твёрдое – газ).

# ПРОЦЕСС КИПЕНИЯ

**Кипение** – процесс образования пара (в виде пузырьков или пленки) **в жидкости** или **на поверхности**, **перегретых** сверх **температуры насыщения** при данном давлении.

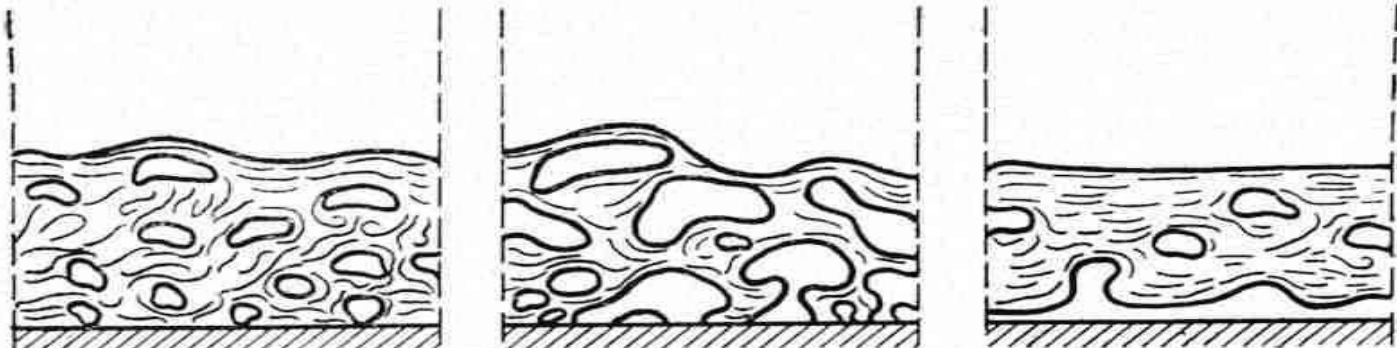
Величина необходимого перегрева  $\Delta T = (T - T_s)$  уменьшается при наличии **центров парообразования** в жидкости (например, взвешенные частицы) и на поверхности (царапины, неоднородности и т.п.).

Если вся жидкость оказывается **значительно перегретой** (например, при резком **сбросе давления**, т.е. **снижении  $T_s$** ), то паровые пузыри возникают **во всем объеме жидкости** и она вскипает в результате **объёмного кипения**. (Этот механизм кипения мы далее не рассматриваем).



# Два основных режима поверхностного кипения

**1. Пузырьковое кипение** – на начальной стадии кипения **на поверхности нагрева** возникают отдельные паровые пузырьки, интенсифицирующие **свободноконвективный теплообмен** :  
– поверхность имеет прямой контакт с жидкостью, причем пограничный слой **турбулизируется** и «**утоняется**» паровыми пузырями;  
– отрывающиеся пузыри увлекают из погран. слоя в ядро потока перегретую жидкость, что приводит к дополнительному **молярному переносу теплоты**.



**2. Пленочное кипение** – при увеличении **температурного напора** на поверхности образуется сплошной слой пара, отделяющий ее от жидкости. Интенсивность теплоотдачи резко снижается.

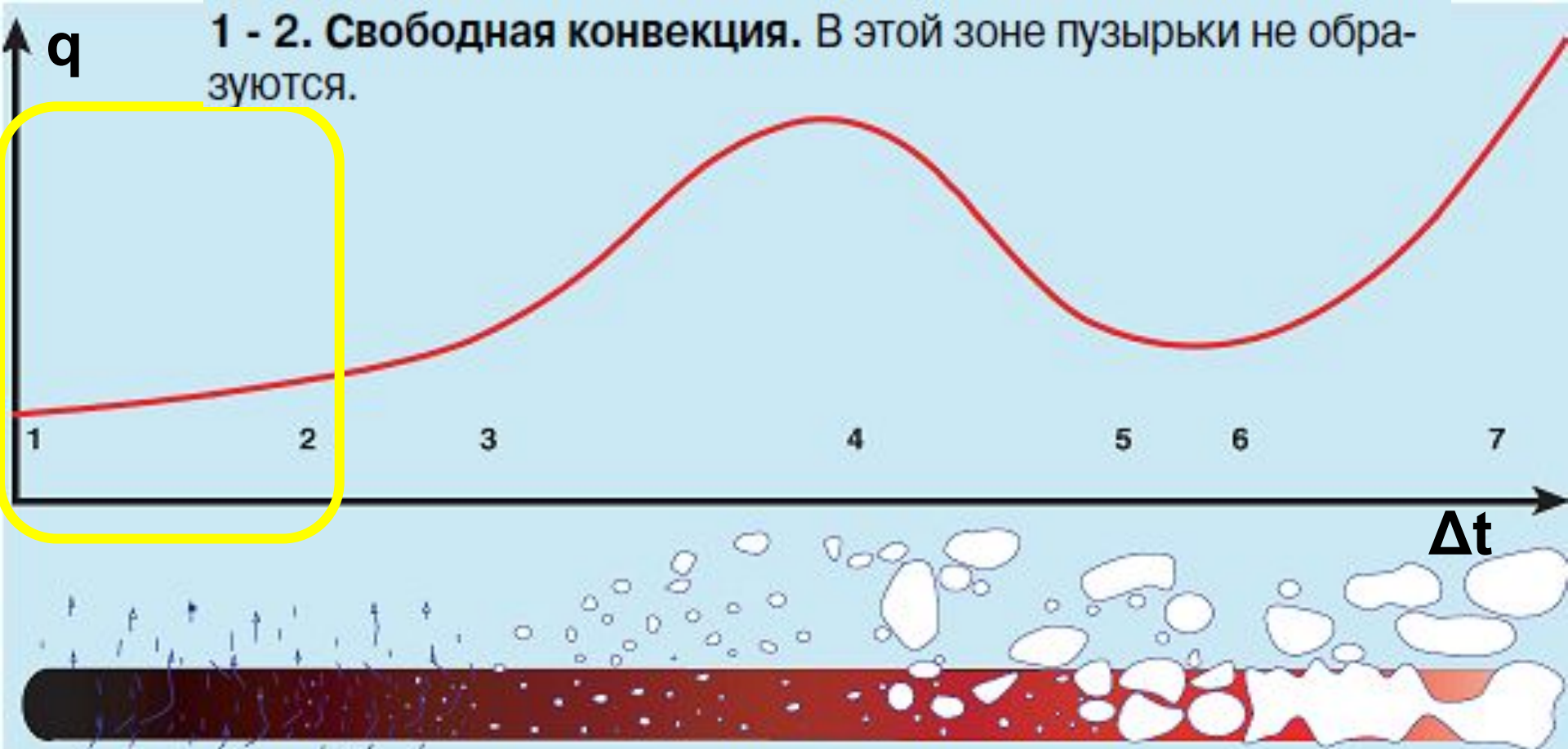


Рис. 01 А. Теплоотдача при кипении в большом объеме на нагретой проволоке

**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.

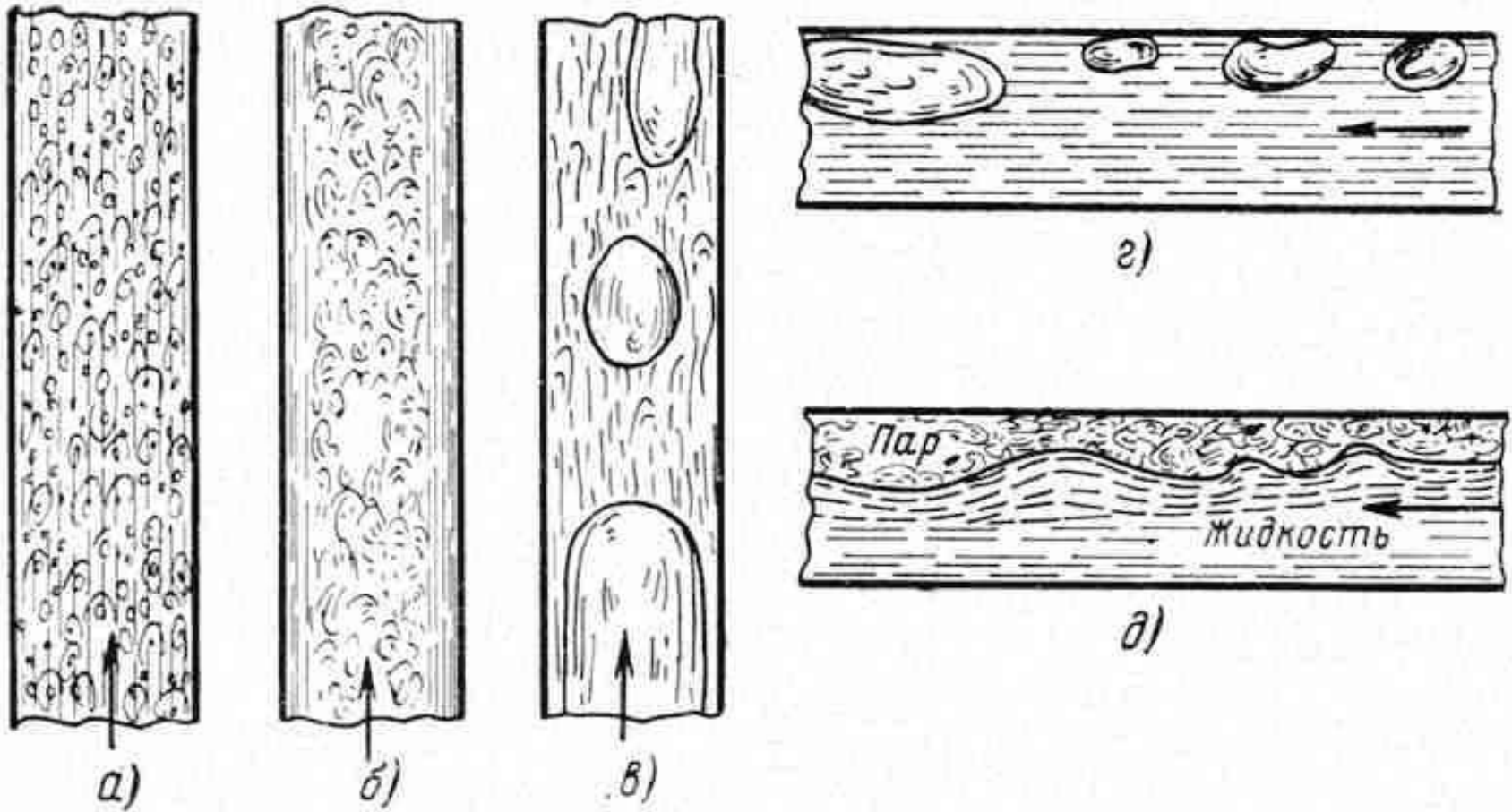
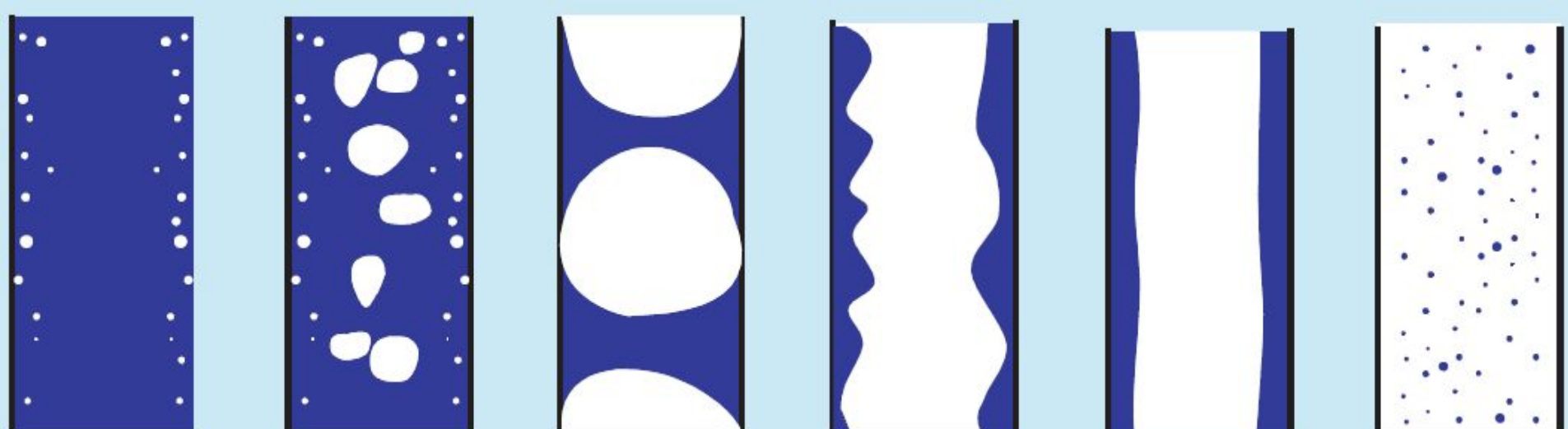


Рис. 4-4. Характер движения пароводяной смеси в трубах.

а) однородно-эмульсионный;

б, д) расслоённый;

в, г) снарядный



1.

2.

3.

4.

5.

6.

**1. Кипение в фазе переохлаждения.** Пузырьки захлопываются с перемещением в более холодный слой жидкости.

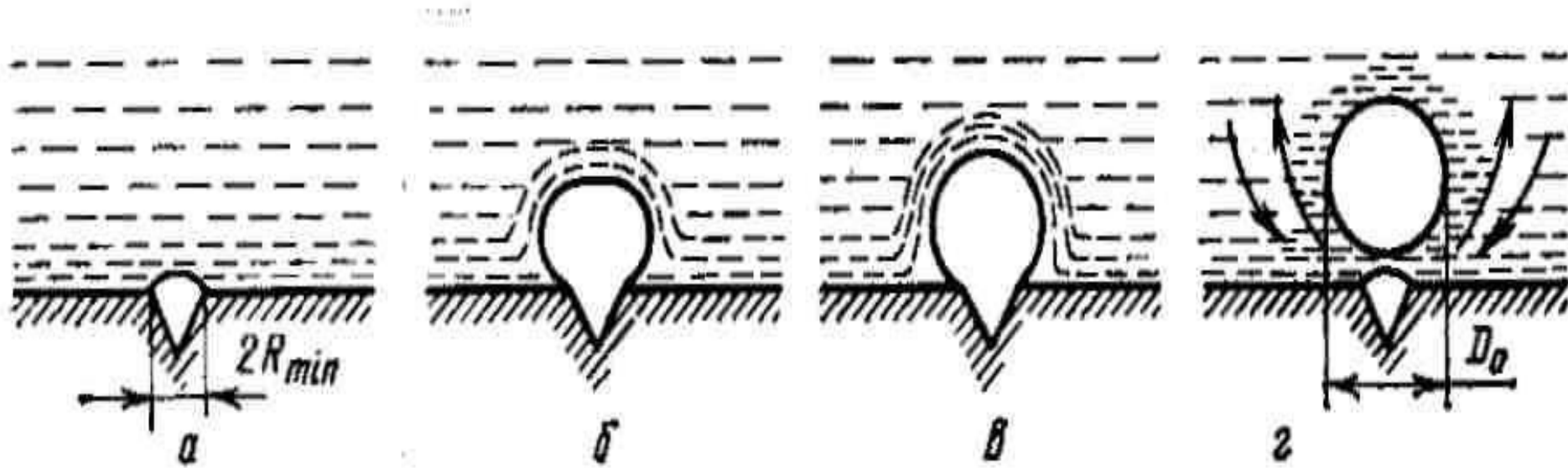
**2. Пузырьковый поток.** Происходит образование чистого пара.

**3. Пробковый поток.** Пузырьки сливаются в газовые пробки, занимающие большую часть сечения канала.

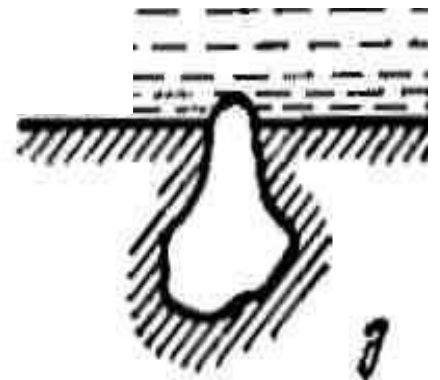
**5. Кольцевой поток.** Пар движется с достаточной скоростью, чтобы поднимать с собой кольцо жидкости. Коэффициент теплоотдачи очень велик и поток стабилен.

**6. Эмульсионный поток.** Двухфазный поток представляет собой капли жидкости в паре, а не пузырьки в жидкости. Коэффициент теплоотдачи низкий, характерный для газа.

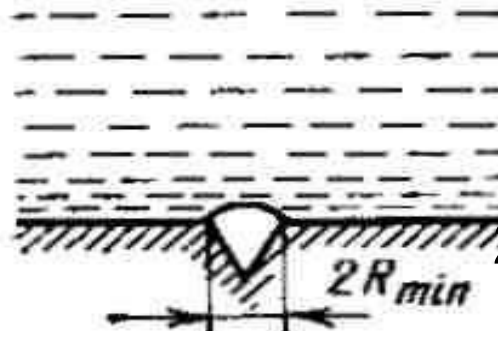
# Схема образования пузыря в несмачиваемой впадине на стенке и его отрыва



а — прогрев пограничного слоя жидкости; б — рост пузыря;  
в — момент отрыва пузыря; г — подъем пузыря в жидкости после отрыва;  $d$  — эффективная форма углубления



# Минимальный (критический) радиус устойчивого пузыря



**Условия существования и роста пузырька:**

- 1) сила давления пара **не меньше** силы поверхностного натяжения жидкости;
- 2) перегрев жидкости:  $\Delta t = (t_{ж} - t_{н}) > 0$ ,  $t_{ж} \approx t_c$   
(в момент отрыва температура пара  $t_{п,к} = t_{ж}$ )

$$\Delta p = p_{\Pi} - p_{ж} = \frac{2\sigma}{R_{к}} \quad - \quad \text{з-н Лапласа, } \sigma - \text{поверхностн. натяжение, Н/м;}$$

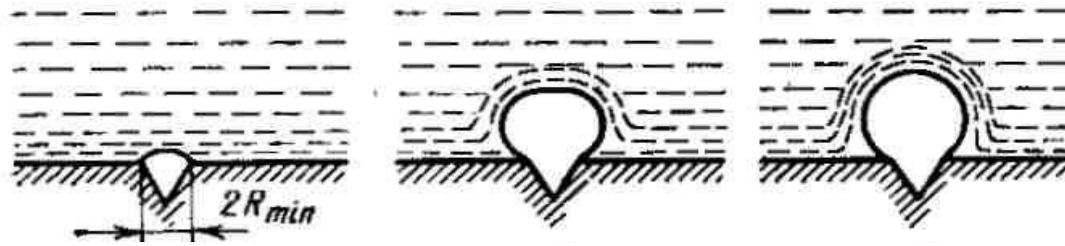
при меньшем  $\Delta p$  пузырек сконденсируется

$$\left. \begin{aligned} \Delta p \approx \Delta t \left( \frac{dp}{dT} \right)_s \frac{\rho_{ж} - \rho_{\Pi}}{\rho_{ж}} \\ \left( \frac{dp}{dT} \right)_s = \frac{r}{T_{жс} (v''_n - v'_n)} = \frac{r \rho_{жс} \rho_n}{T_s (\rho - \rho)} \end{aligned} \right\} \Delta p = 2 \frac{\sigma}{R_{к}} \approx \frac{r \rho_n \Delta t}{T_s}$$

( по Клапейрону-Клаузиусу )

$$\Delta p \approx \frac{r \rho_n \Delta t}{T_{жс}} \geq \frac{2\sigma}{R_{к}} \Rightarrow R_{\min} = R \approx \frac{2\sigma T_s}{r \rho (T - T_c)}$$

# Скорость роста пузыря на поверхности

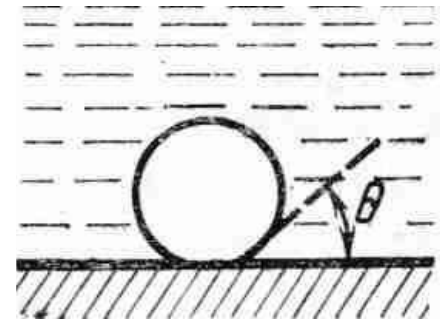


Подвод теплоты к пузырьку путем *теплопроводности* из окружающего слоя перегретой жидкости и через поверхность под пузырьком идет на испарение жидкости и работу расширения. Скорость роста пузырька – функция **критерия Якоба**:

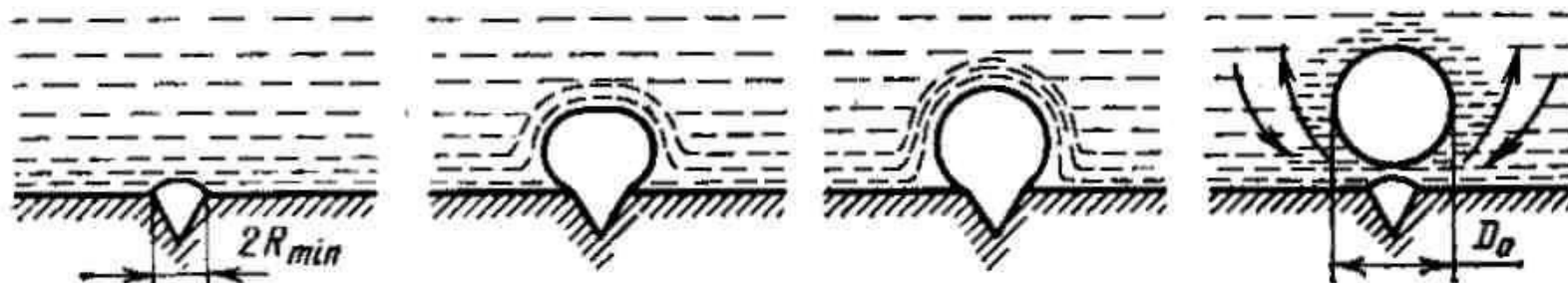
$Ja \equiv \frac{c_{pc} \Delta t \rho}{r \rho_n}$  – соотношение между тепловым потоком, идущим на перегрев жидкости, и объемной теплотой испарения

$$\frac{R}{\sqrt{a\tau}} = \left( m Ja + \sqrt{m^2 Ja^2 + 2n Ja} \right)$$

$m = 0.1 \div 0.5$  для углов смачивания  $\Theta = 40 \div 90^\circ$ ;  
 $n = 6$



## Диаметр и частота отрыва пузырей



Значения  $f$ ,  $D_0$  и  $D_0f$  для жидкостей

Жидкость	$f$ , 1/с	$D_0$ , мм	$D_0f$ , мм/с
Вода . . . . .	62	2,5	155
Фреон-12 . . . . .	91	0,7	64
Четыреххлористый углерод . . . . .	108	1,1	119
Этиловый спирт . . . . .	108	1,1	119
Бутиловый спирт . . . . .	106	1,05	111
Бензол . . . . .	99	1,0	99



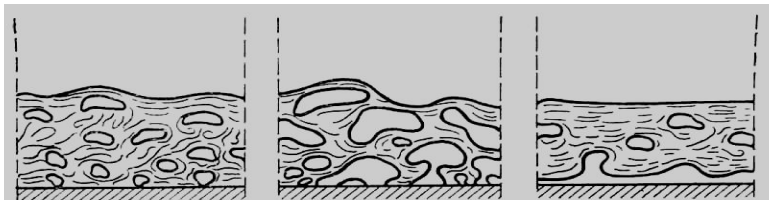
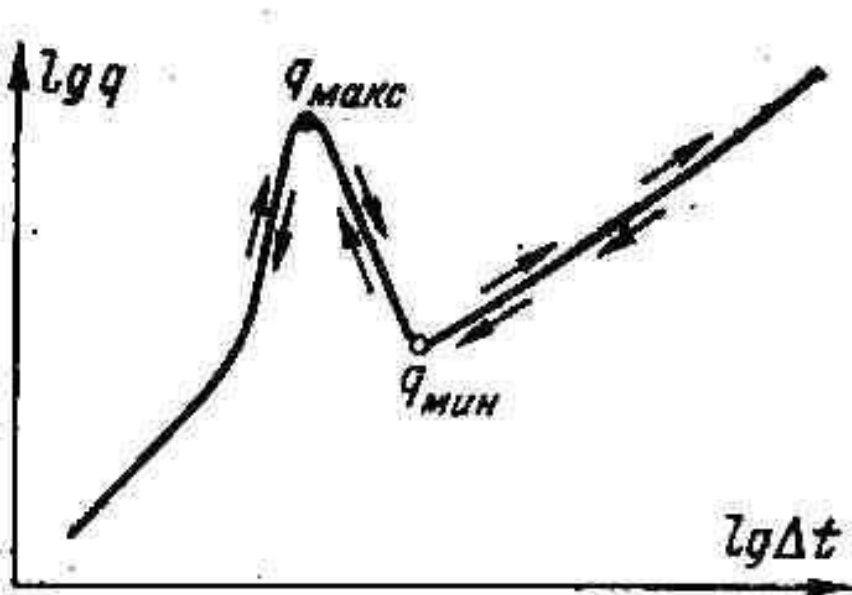
## Кривая кипения при $t_c$ , $\Delta t = const$

$t_c$  – заданная **независимая** величина, например, температура конденсации греющего пара;  $q$  – плотность теплового потока, отводимого от стенки к кипящей жидкости (**зависимая** величина).

С увеличением  $t_c$  растёт  $\Delta t = t_c - t_s$  и, следовательно,  $q = \alpha \Delta t$ , которая достигает **максимума** при развитии пузырьковом кипении.

При переходе к плёночному режиму снижается  $\alpha$ , что приводит к соответствующему снижению  $q$ .

После достижения **минимума**, тепловой поток опять начинает расти за счёт роста теплопроводности пара в плёнке и теплового излучения.



Если уменьшать  $\Delta t$  в обратном порядке, процесс кипения будет описываться точно той же кривой кипения.

# Области кипения воды при $p = 1$ бар

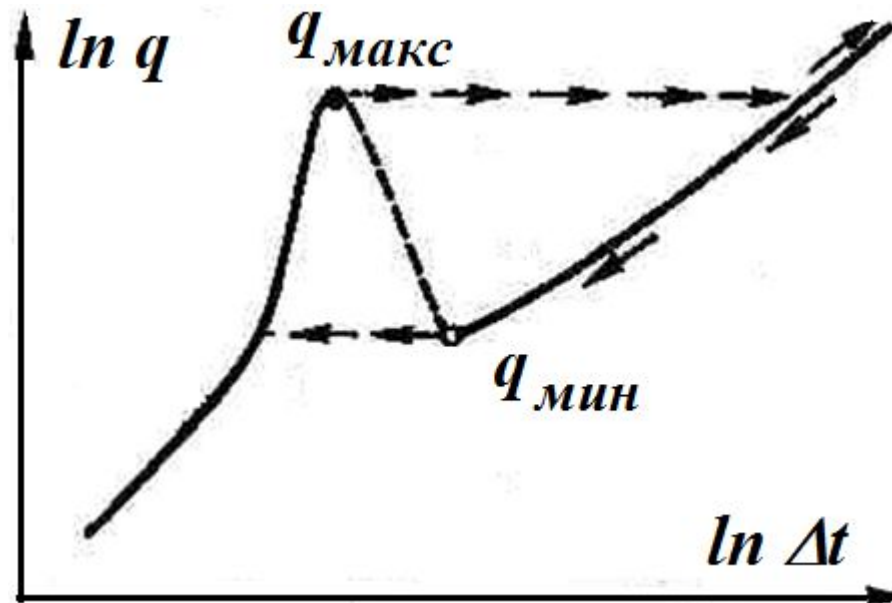
$\Delta t$	Механизм кипения
0 – 5.5 °C	Свободно-конвективный: <i>пузырьки малочисленны, зарождаются только в дефектных местах и неустойчивы</i>
5.5 – 22 °C	Пузырьковый
22 – 111 °C	Переходный (частично пленочное)
> 111 °C	Пленочный

**Эффект Лейденфроста** (1756): когда на раскаленную поверхность попадает капля воды, она, не касаясь поверхности, долго испаряется и распыляется на «паровой подушке» (пленочное кипение).

# Кривая и кризисы кипения при $q_c = const$

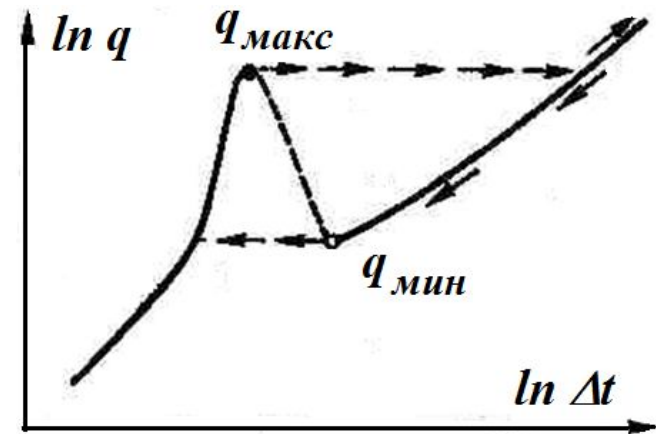
$q_c$  – заданная независимая величина (тепловая нагрузка), например, подводимая к стенке электронагревателем или излучением от пламени горения топлива;  $t_c, \Delta t$  – зависимые величины.

Прямой ход: при постепенном увеличении  $q_c$  на поверхности развивается пузырьковый режим кипения. Максимальная тепловая нагрузка, которую можно отвести от поверхности стенки к кипящей жидкости, которую можно отвести от поверхности стенки к кипящей жидкости,  $q_{\max} = q_{кр1}$ , называется **первой критической плотностью теплового потока**.



При этой нагрузке любое случайное увеличение  $q_c$  приводит к повышению температуры стенки вследствие того, что *подводимый* к ней тепловой поток превышает *отводимый* из-за того, что начинается переход к пленочному режиму кипения, *падают  $\alpha$*  и *отвод теплоты от стенки*. Это приводит к ещё большему росту температуры стенки; процесс её разогрева приобретает лавинообразный характер, в результате чего происходит "скачок"  $t_c$  и  $\Delta t$ , что может привести к разрушению стенки ("выгоранию поверхности"). Это явление называется **1-м кризисом кипения**.

Обратный ход: уменьшение  $q_c$  при плёночном кипении до  $q_{мин} = q_{кр2}$  приводит к **2-му кризису кипения** – скачкообразному охлаждению стенки вследствие того, что жидкость местами "протекает" через нестабильную паровую



пленку к поверхности, из-за чего *растет  $\alpha$* , и *отвод теплоты* от стенки превышает *подвод* ( $q_{мин}$ ); процесс имеет лавинообразный характер, что приводит к разрушению пленки и "скачку" к пузырьковому режиму кипения при более низкой температуре.

## Критическая плотность теплового потока

$$q_{кр1} = K \cdot r \sqrt{\rho_n} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_{жс} - \rho_n)}$$

$$K = 0.13 \div 0.16$$

Жидкость	$q_{кр1}$ , МВт/м <sup>2</sup>
Вода	1.25
Аммиак	0.70
R22	0.44
R12	0.36

**Для воды**

$$q_{кр1} = 0,248r \sqrt[4]{\rho_{\Pi}^2 \sigma (\rho_{жс} - \rho_{\Pi})}$$

# Коэффициент теплоотдачи при пузырьковом кипении

$$\alpha = \frac{q}{\Delta t}, \Delta t = t_c - t_s.$$

**Опыт:**

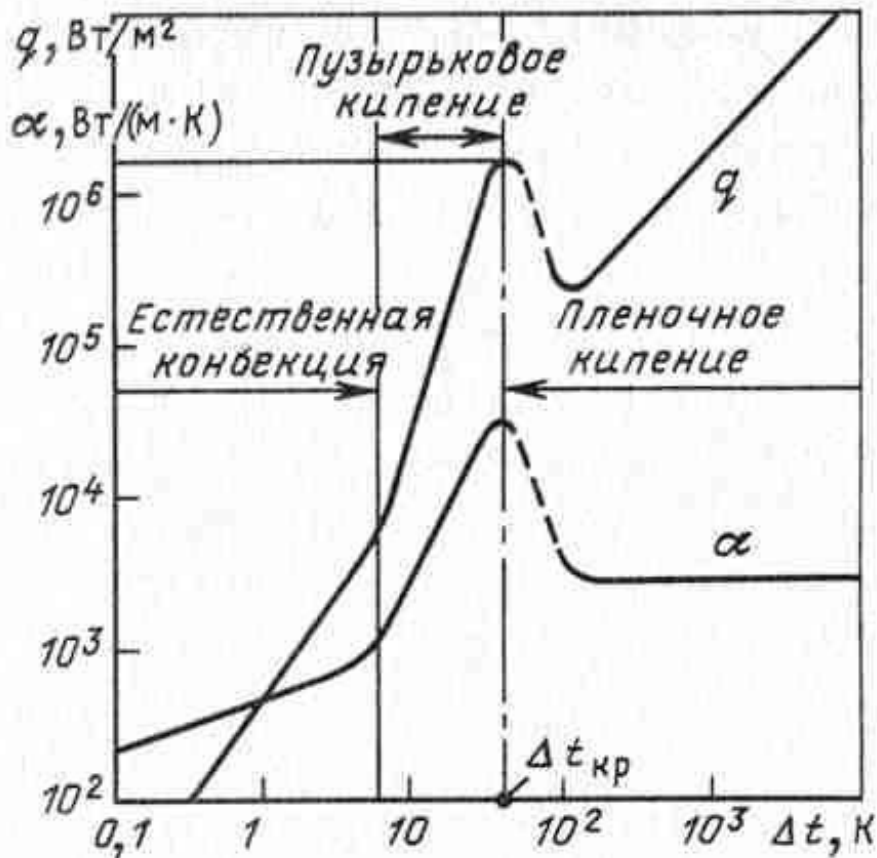
$$\alpha = cq^{2/3}$$

$\Rightarrow$

$$\Delta t = \frac{1}{c} q^{1/3}$$

**Д.А. Лабунцов:**

$$\alpha = 0.075 \left[ 1 + 10 \left( \frac{\rho_n}{\rho_{жс} - \rho_n} \right)^{2/3} \right] \left( \frac{\lambda^2}{\nu \sigma T_s} \right)^{1/3} q^{2/3}$$



# Эмпирические формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при кипении воды

единицы СИ, кроме давления: **[p] = бар** (= 10<sup>5</sup> Па)

$$\alpha = \frac{3.4 p^{0.18}}{1 - 0.0045 p} q^{2/3}$$

$$\alpha = 3.0 q^{0.7} p^{0.15}$$

$$\alpha = 38.7 \Delta t^{2.33} p^{0.5}$$

# Сравнение коэффициентов теплоотдачи при конвекции и фазовых переходах, Вт/(м<sup>2</sup>К)

Свободная конвекция в газах	5—30
Свободная конвекция воды	10 <sup>2</sup> —10 <sup>3</sup>
Вынужденная конвекция газов . . . . .	10—500
Вынужденная конвекция воды	500—2 · 10 <sup>4</sup>
Кипение воды . . . . .	2 · 10 <sup>3</sup> —4 · 10 <sup>4</sup>
Пленочная конденсация водяного пара . . . . .	4 · 10 <sup>3</sup> —10 <sup>4</sup>
Капельная конденсация водяного пара . . . . .	4 · 10 <sup>4</sup> —10 <sup>5</sup>



# Коэфф-т теплоотдачи при кипении хладонов

$$\alpha = C_o F(\pi) (R_z / R_{zo})^{0.2} q^{0.75}$$


**Г.Н. Данилова:**

$$C_{\text{вр}} = \underset{\text{кр}}{550} p^{1/4} T^{-1/8} M^{-1/8}$$

при  $0.003 \leq \pi \leq 0.5$   $F(\pi) = 0.14 + \pi \left( 1.6 + \frac{0.4}{1 - \pi} \right)$ ,  $\pi = p_{\text{кр}} / p$

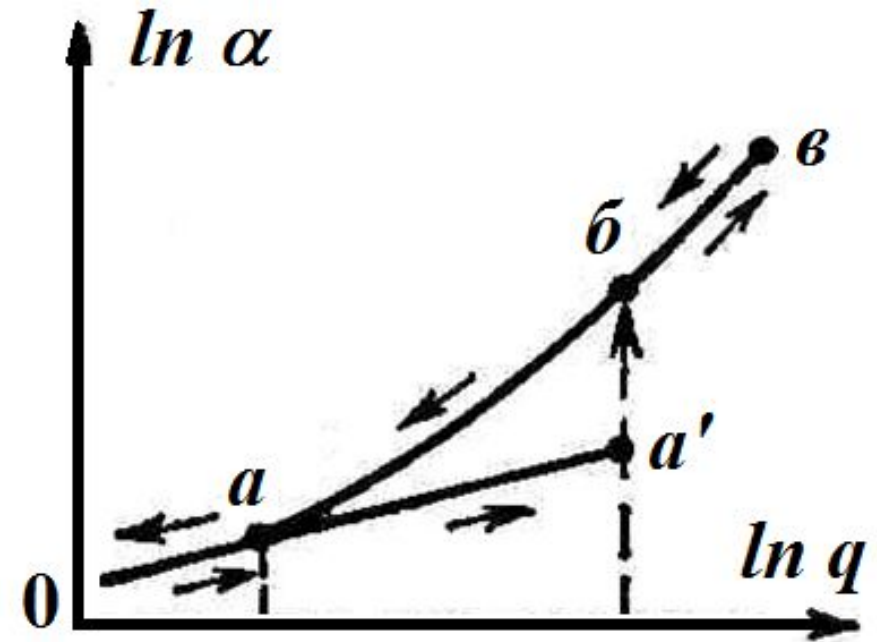
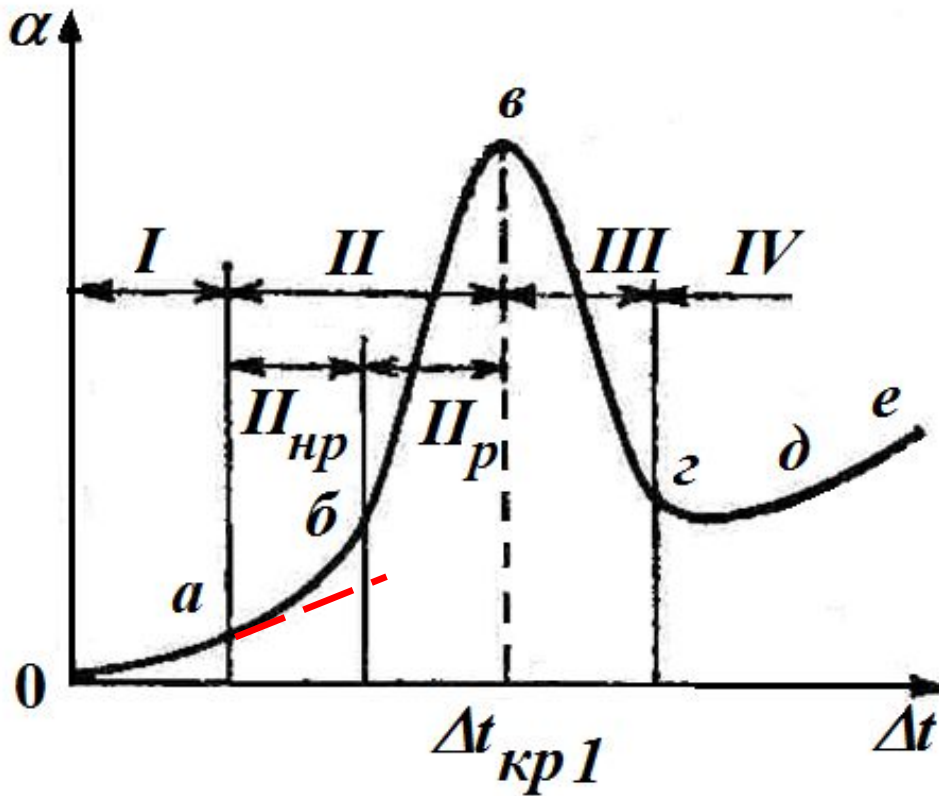
M – молекулярная масса;  $p_{\text{кр}}$  [бар] и  $T_{\text{кр}}$  [K] – **критические** параметры,  $R_z$  [мкм] – высота микронеровностей поверхности нагрева (3–5 мкм для труб промышл. изготовления,  $R_{zo} = 1$  мкм)

Величина	Холодильный агент								
	R11	R12	R13	R21	R22	R113	RC318	R502	R142
$p_{\text{кр}} \cdot 10^{-6}$ , Па	43,7	40,5	38,6	51,6	49,4	41,1	28,0	40,5	41,1
$C_o$	3,50	4,20	5,22	4,10	4,74	3,07	3,85	4,54	4,05



Теоретические основы хладотехники.  
Тепломассообмен / С.Н.Богданов, Н.А. Бучко,  
Э.И. Гуйко и др.; Под ред. Э.И. Гуйко.  
– М.: Агропромиздат, 1986. – 320 с.

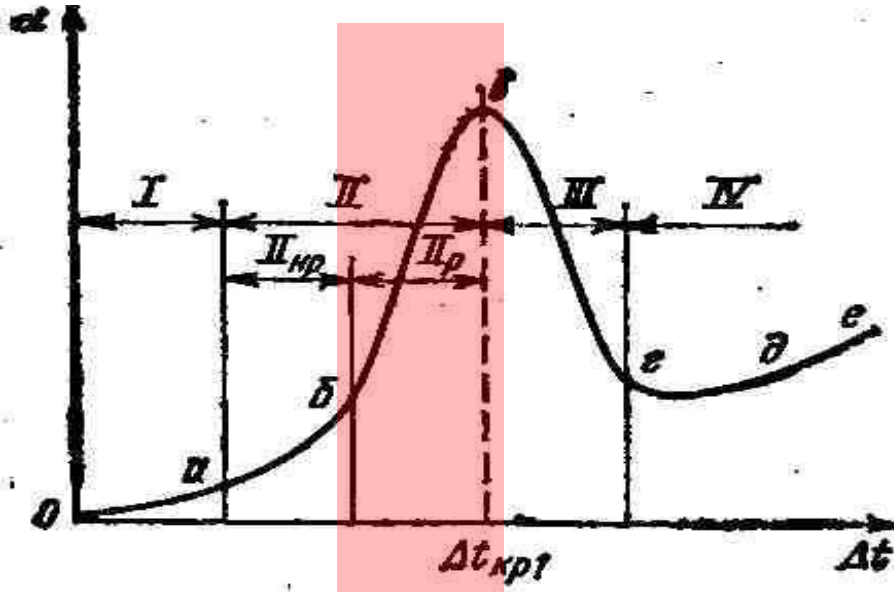
# Переход от своб. конвекции к кипению в большом объеме



$a'$  – точка начала кипения  
 $a$  – точка окончания кипения

**I** – свободная конвекция, сопровождающаяся испарением с поверхности жидкости; **II** – пузырьковое кипение ( $II_{nr}$  – неразвитый режим;  $II_r$  – развитый режим); **III** – переходный режим; **IV** – устойчивое пленочное кипение

# Расчет теплообмена при развитом пузырьковом кипении



Область  $II_p$  (СИ)

$$\alpha = C \cdot f(p) \cdot q^n$$

Вещество	$n$	$f(p)$	$C$
R 718 Вода	0,67	$p^{0,18} (1 - 0,0045 p)^{-1}$	3,4
Вода	0,70		3,0
R 717 Аммиак	0,70	$p^{0,21}$	2,2
R12	0,75	$0,14 + \pi \left( 1,6 + \frac{0,4}{1 - \pi} \right)$	5,5
R22	0,75	$0,14 + \pi \left( 1,6 + \frac{0,4}{1 - \pi} \right)$	6,2

(R 729 – воздух)

# Безразмерное описание теплообмена при пузырьковом кипении на основе модели Кружилина

(Д.А.Лабунцов)

1) задана тепловая нагрузка  $q$ , Вт/м<sup>2</sup>

$$Nu_s = 0,0625 Re_s^{0,5} Pr_s^{1/3} \quad s <$$

$$Nu_s = 0,125 Re_s^{0,65} Pr_s^{1/3} \quad s \geq$$

$$Nu_s = \frac{\alpha l_s}{\lambda}; \quad M_s = \frac{c_{\text{пр}} \rho_s \sigma T}{(\rho_{\text{II}} r)^2}, \quad ;$$

$l_s \sim (d_{\text{кр}} \cdot Ja)$  – характ. масштаб длины для паровой фазы

$$Re_s = \frac{w_s l_s}{\nu} = q A_s; \quad , \quad m_s / \text{Вт}; \quad \frac{q}{r \rho_{\text{II}}}$$

$$A_s = \frac{l_s}{r \nu \rho_{\text{II}}} \quad ^2$$

$$Pr_s = \frac{\nu}{a}; \quad B_s = \frac{\lambda}{(r \rho_{\text{II}} \nu)}, \text{ K}^{-1}$$

2) задан температурный напор  $\Delta t = t_c - t_s$ :

$$\text{Nu}_s = 2,6 \text{Pr}^{10^{-3}} (B_s \Delta t)^{1,86} \text{Pr}_s^{0,952} \quad B_s \Delta t \frac{1}{s} \geq$$

$$\text{Nu}_s = 3,9 \text{Pr}^{10^{-3}} (B_s \Delta t) \text{Pr}_s^{\frac{2}{3}} \quad B_s \Delta t \frac{1}{s} <$$

$$\text{Re}_s = 10^{-5} \div 10^{+4}; \quad \text{Pr}_s = 0,86 \div 7,6; \quad p = 4500 \div 175 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$B_s \text{Pr}_c^{1/3} = 0,05 \div 200$$

# Теплоотдача при кипении в условиях вынужденной конвекции

К-т теплоотдачи при кипении определяется тепловой ( $q_c$ ) нагрузкой и не зависит от скорости, а при конвекции является степенной функцией скорости.

$$\frac{\alpha_{\text{кип}}}{\alpha_{\text{конв}}} < 0.5 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \alpha_{\text{конв}}$$

$$\frac{\alpha_{\text{кип}}}{\alpha_{\text{конв}}} > 2 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \alpha_{\text{кип}}$$

$$0.5 < \frac{\alpha_{\text{кип}}}{\alpha_{\text{конв}}} < 2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\alpha}{\alpha_{\text{конв}}} = \frac{4\alpha_{\text{конв}} + \alpha_{\text{кип}}}{5\alpha_{\text{конв}} - \alpha_{\text{кип}}}$$

