



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.

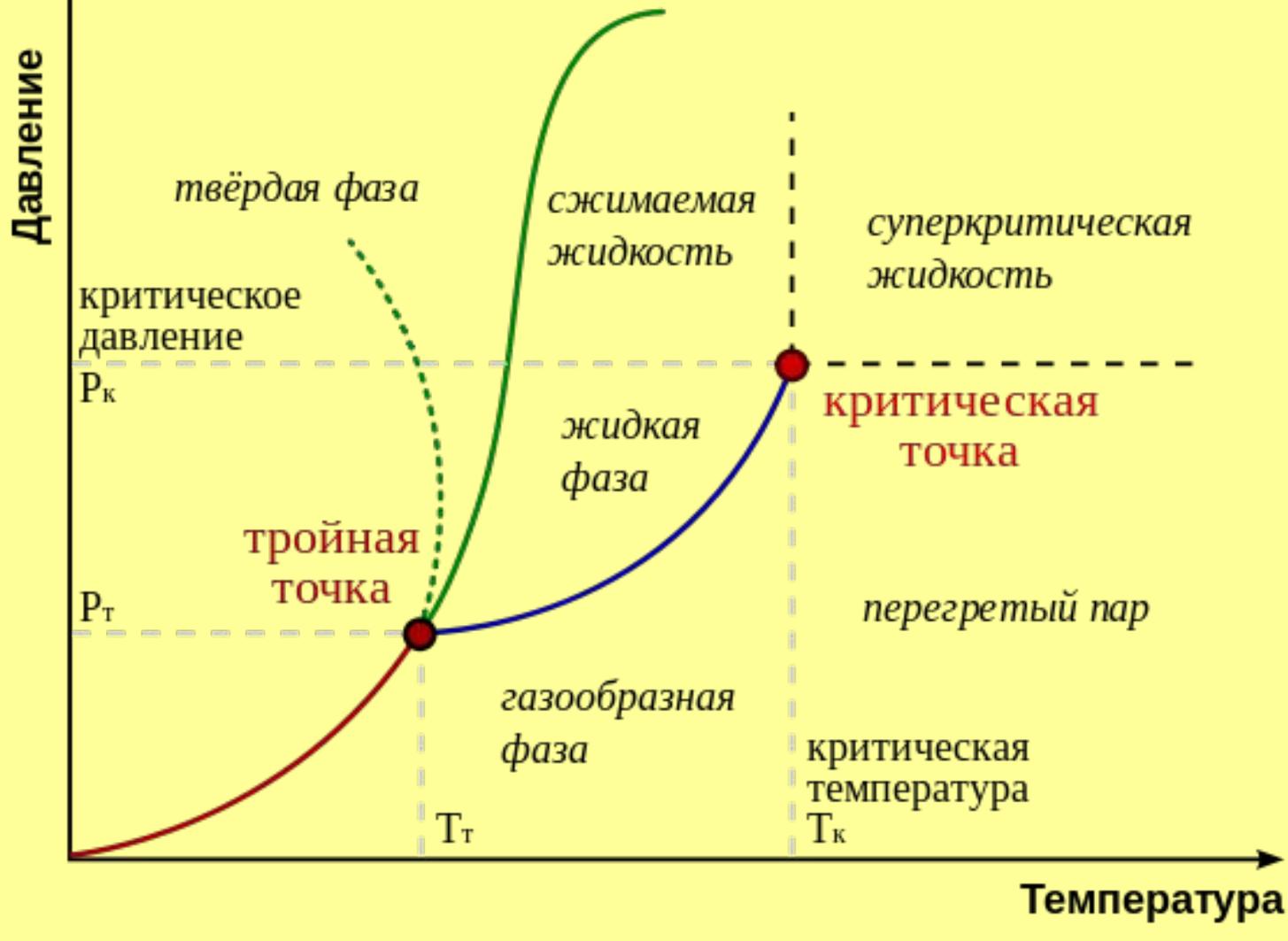
Правило фаз Гиббса: $\psi = n - m + 2$

ψ – число степеней свободы –

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

n – число компонентов,

m – число фаз

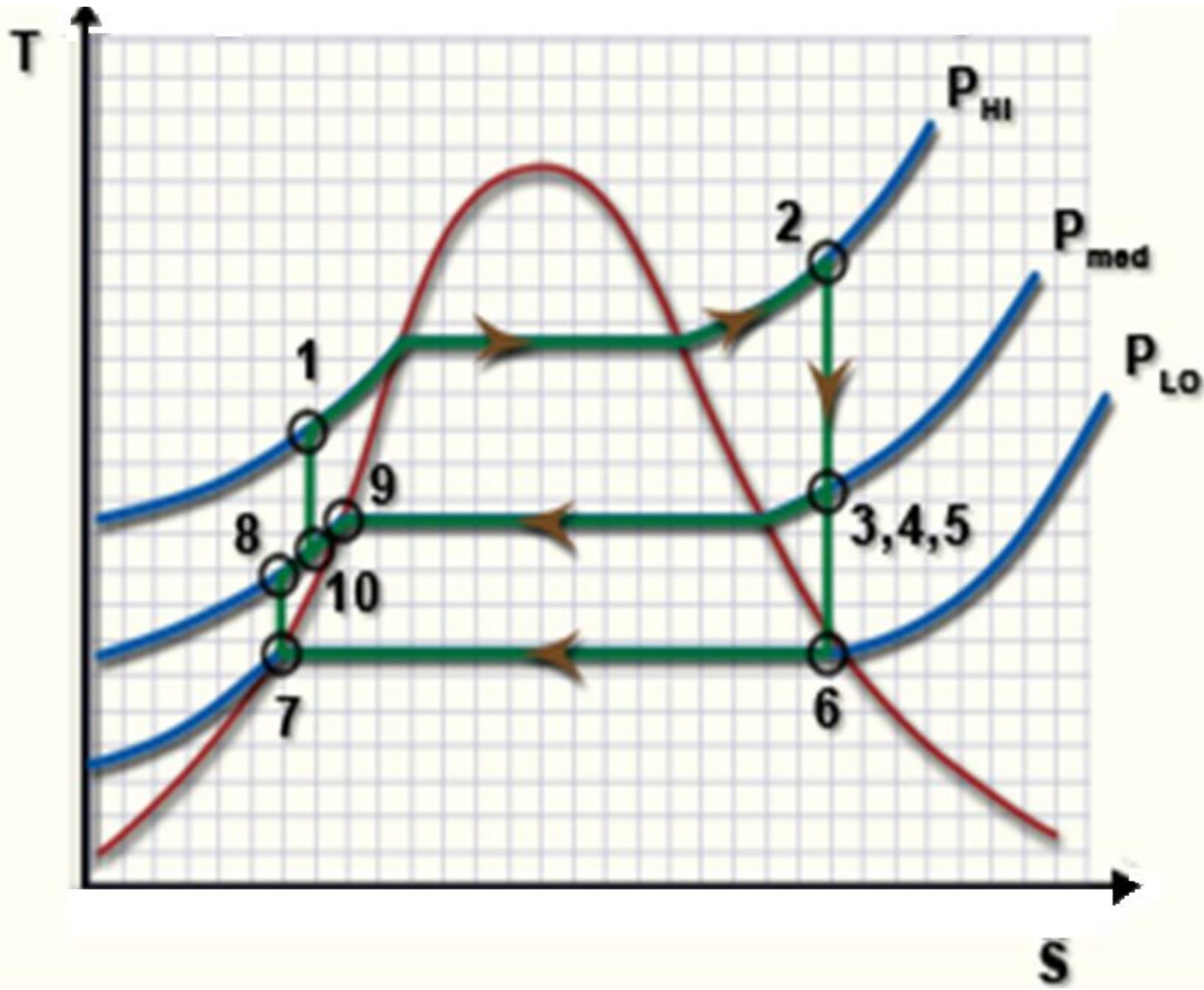


Т-к — линия **насыщения** (вода: $t_H = 100^\circ\text{C}$, $p_H = 1 \text{ бар} \approx 1 \text{ атм}$).

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

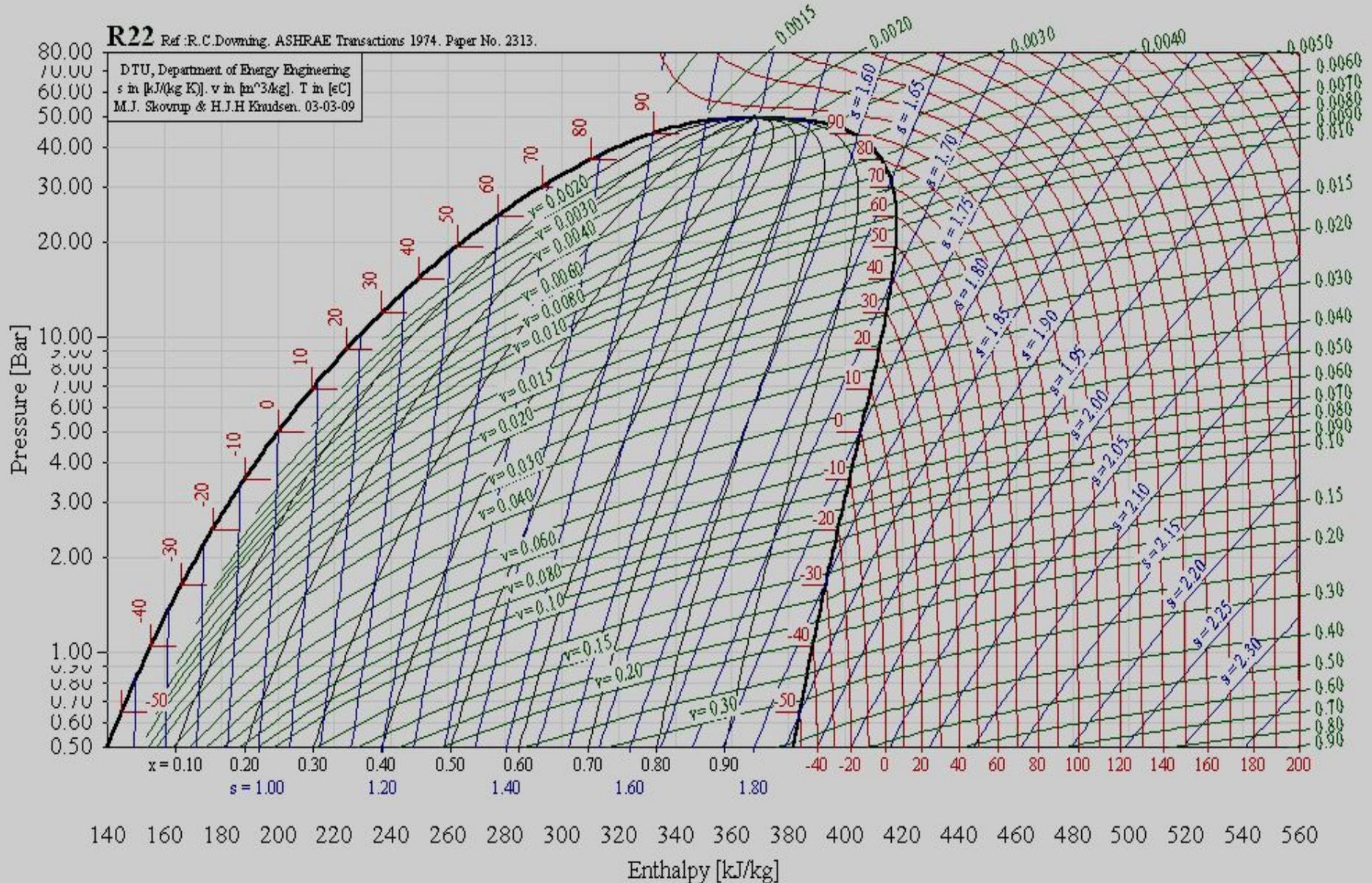
к — **критическая точка** (вода: $t_o = 374^\circ\text{C}$, $p_o = 220.6 \text{ бар}$) — плотность жидкости и её насыщенного пара равны, а поверхностное натяжение жидкости = 0, исчезает граница раздела фаз жидкость-пар.

Процессы кипения и конденсации воды в TS диаграмме



p, h – диаграмма хладагента R22 (Хлордифторметан, CHClF_2)

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



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

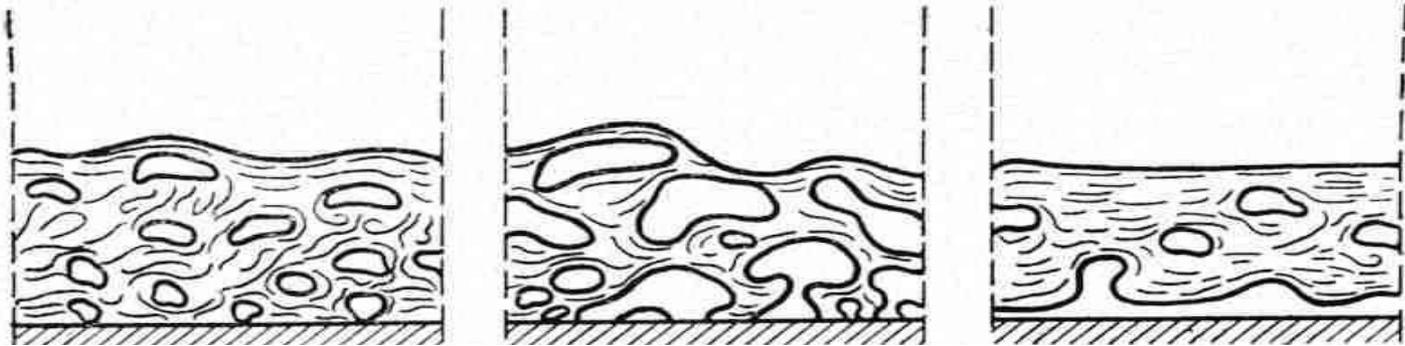
Кипение – процесс образования пара (в виде пузырьков или пленки) **в жидкости** или **на поверхности**, **перегретых** сверх **температуры насыщения** при данном давлении.

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.

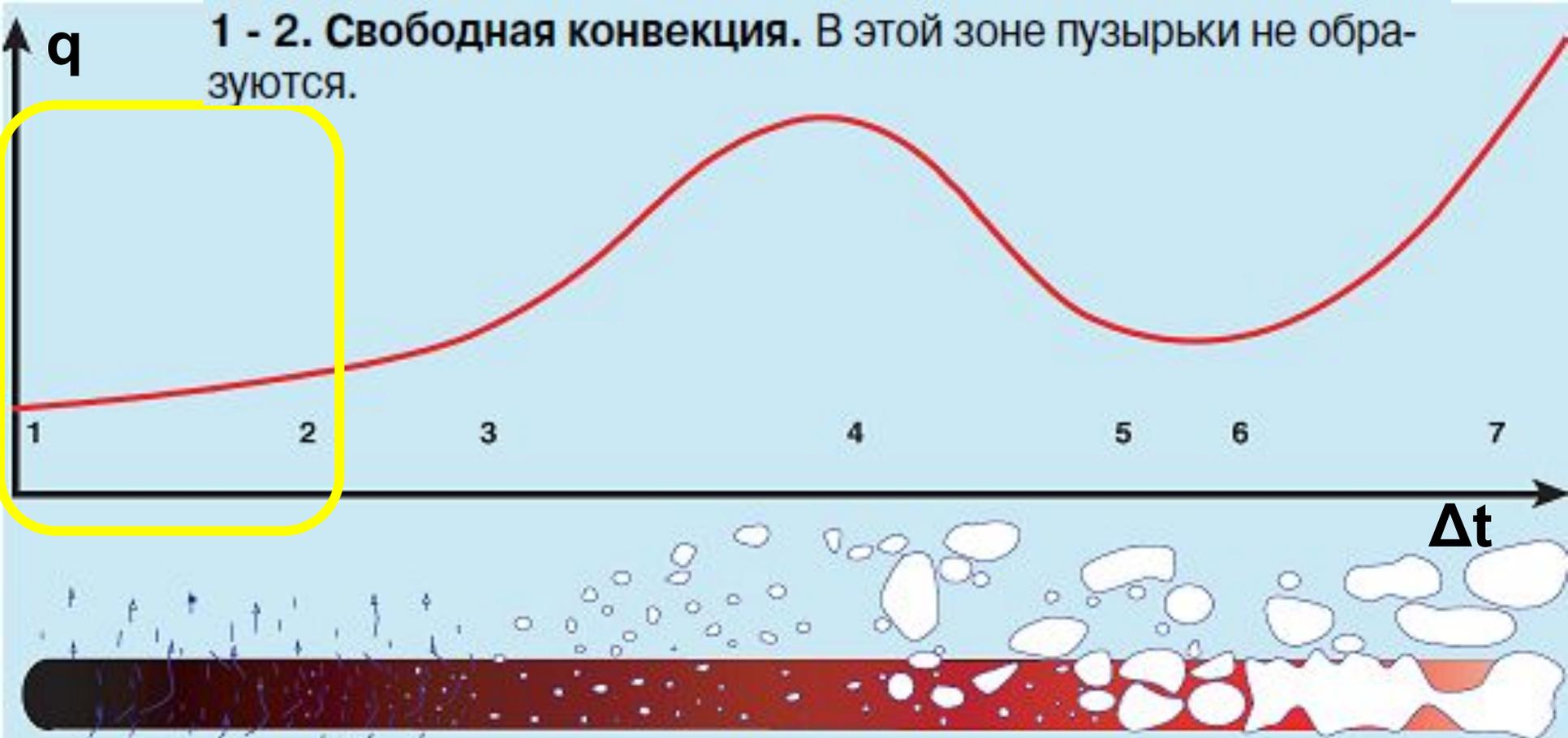


Рис. 01 А. Теплоотдача при кипении в большом объеме на нагретой проволоке

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.

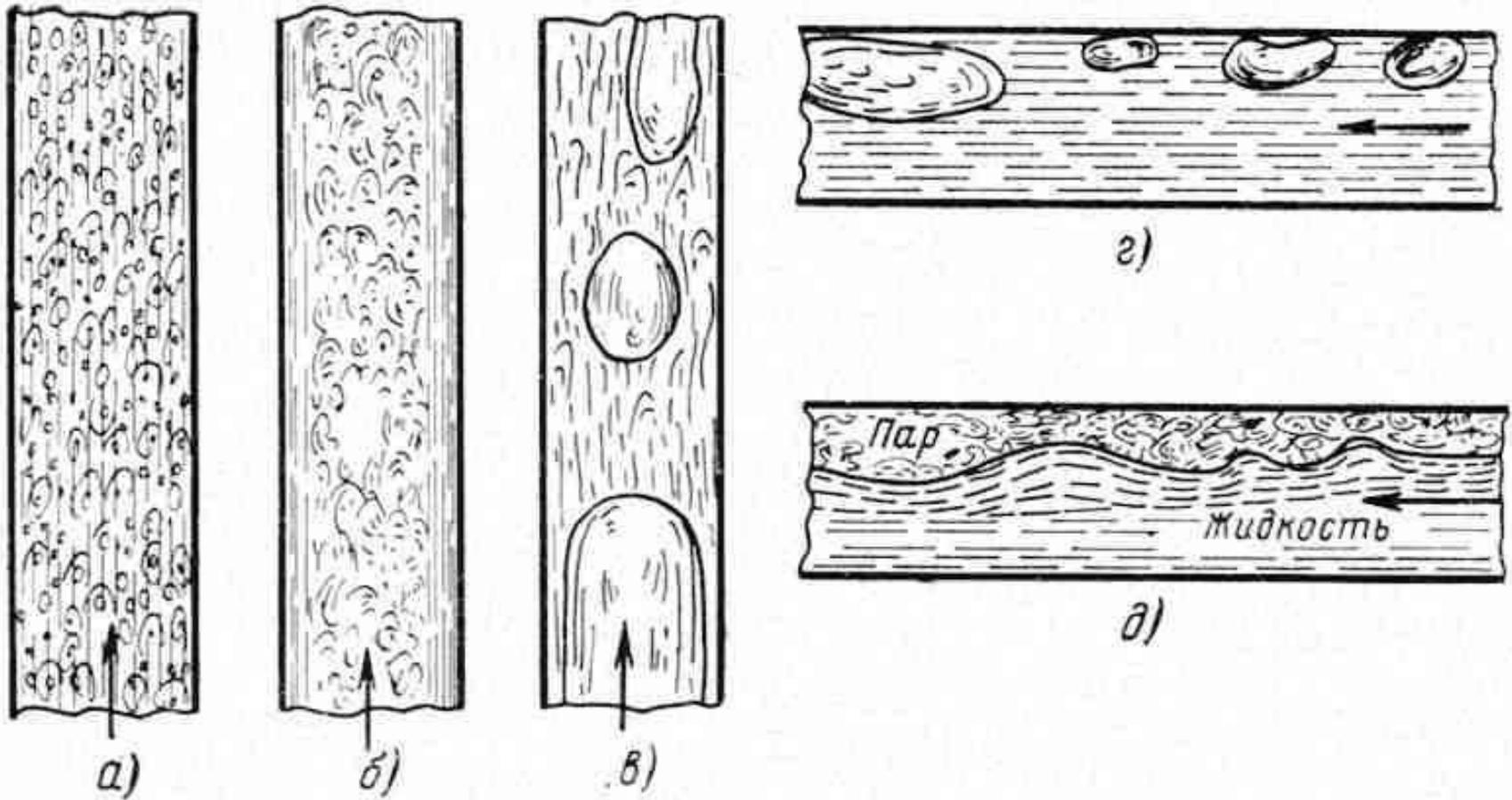
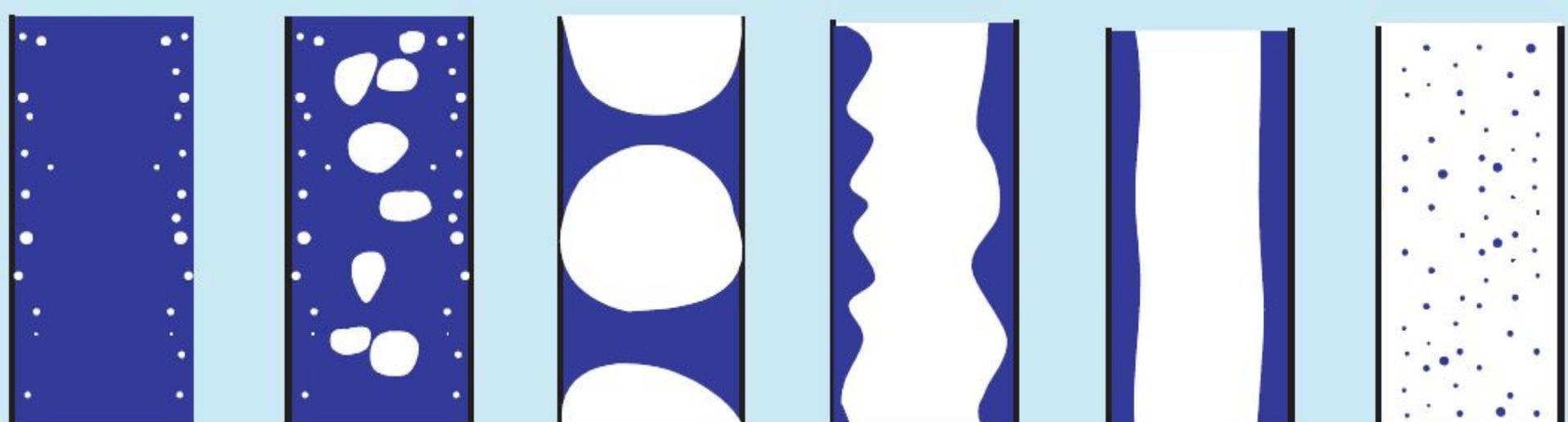


Рис. 4-4. Характер движения пароводяной смеси в трубах.

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.

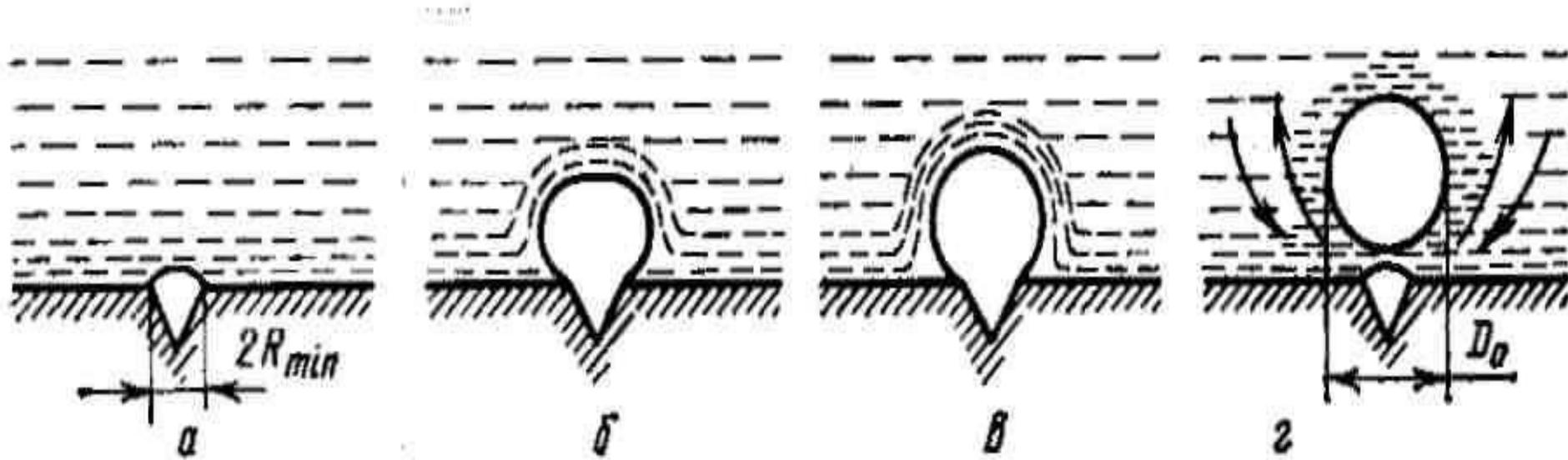
2. Пузырьковый поток. Происходит образование чистого пара.

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

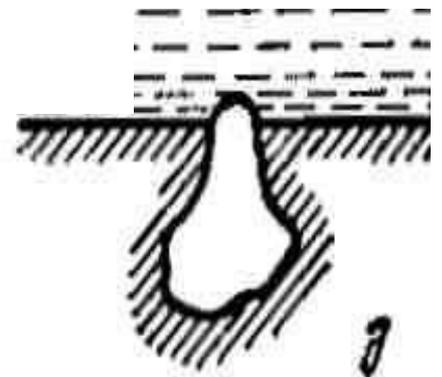
5. Кольцевой поток. Пар движется с достаточной скоростью, чтобы поднимать с собой кольцо жидкости. Коэффициент теплоотдачи очень велик и поток стабилен.

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

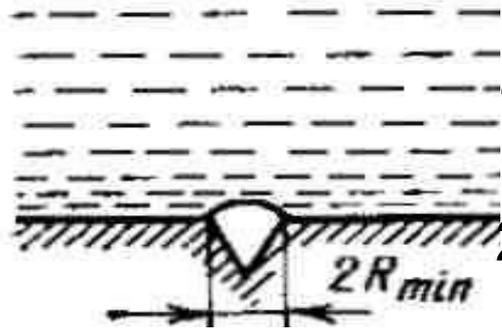
Схема образования пузыря в несмачиваемой впадине на стенке и его отрыва



а — прогрев пограничного слоя жидкости; б — рост пузыря;
в — момент отрыва пузыря; г — подъем пузыря в жидкости после отрыва; д — 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 $t_{п,к} = t_{ж}$)

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

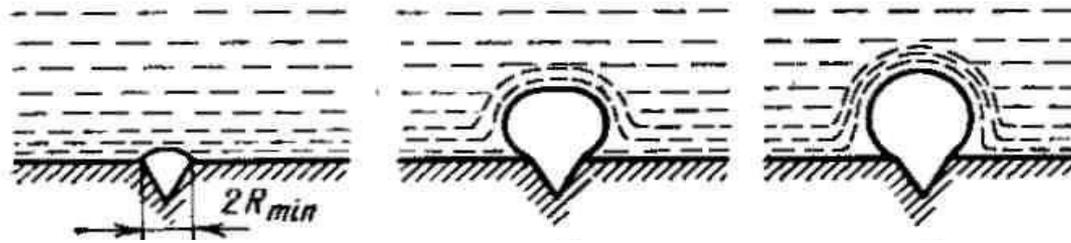
при меньшем Δp пузырек сконденсируется

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

(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

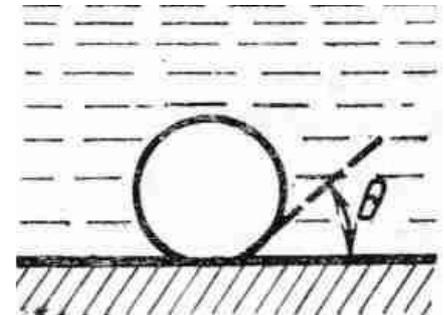


Подвод теплоты к пузырьку путем *теплопроводности* из окружающего слоя перегретой жидкости и через поверхность под пузырьком идет на испарение жидкости и работу расширения. Скорость роста пузырька – функция **критерия Якоба**:

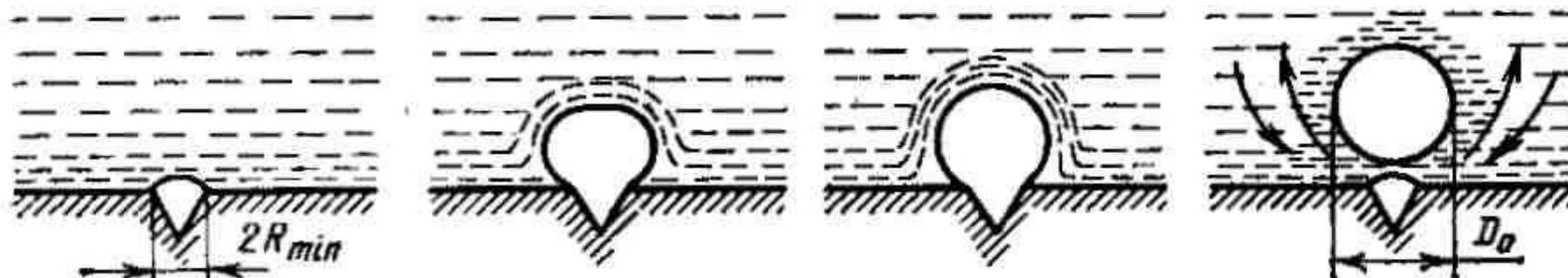
$$Ja \equiv \frac{c_{pc} \Delta t \rho}{r \rho_n}$$
 – соотношение между тепловым потоком, идущим на перегрев жидкости, и объемной теплотой испарения

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

$m = 0.1 \div 0.5$ 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

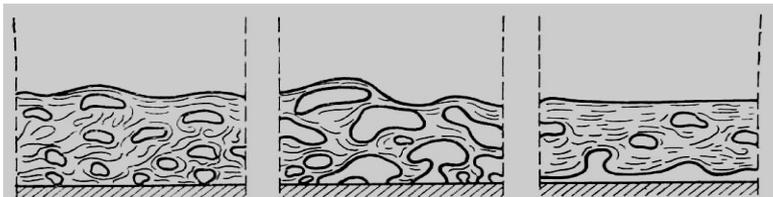
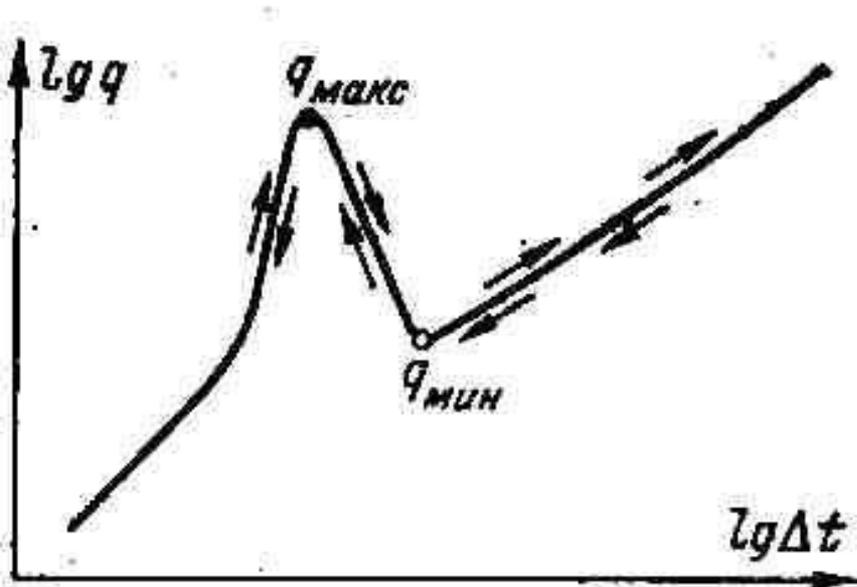
Кривая кипения при t_c , $\Delta t = const$

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 α , 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 Δt в обратном порядке, процесс кипения будет описываться точно той же кривой кипения.

Области кипения воды при $p = 1$ бар

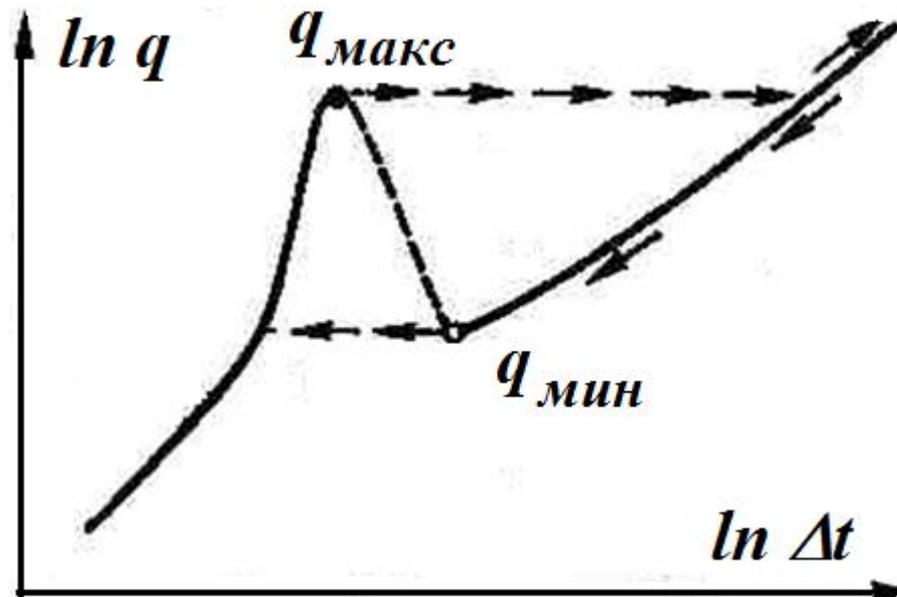
Δt	Механизм кипения
0 – 5.5 °C	Свободно-конвективный: <i>пузырьки малочисленны, зарождаются только в дефектных местах и неустойчивы</i>
5.5 – 22 °C	Пузырьковый
22 – 111 °C	Переходный (частично пленочное)
> 111 °C	Пленочный

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 $q_c = \text{const}$

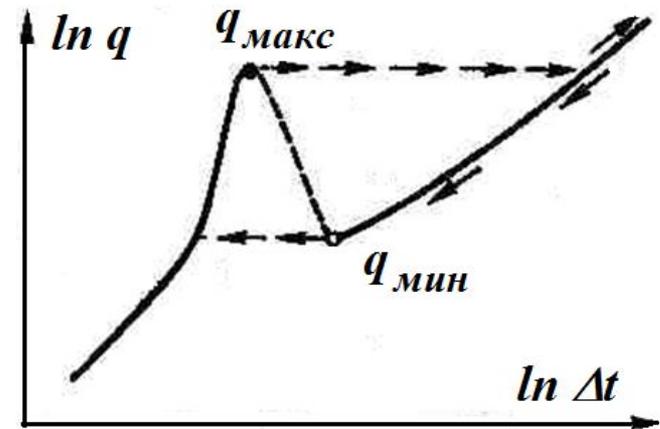
q_c – заданная независимая величина (тепловая нагрузка), например, подводимая к стенке электронагревателем или излучением от пламени горения топлива; $t_c, \Delta t$ – зависимые величины.

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, $q_{\text{макс}} = q_{\text{кр1}}$, 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 α* 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 Δt , 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 α* , 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 ²
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:

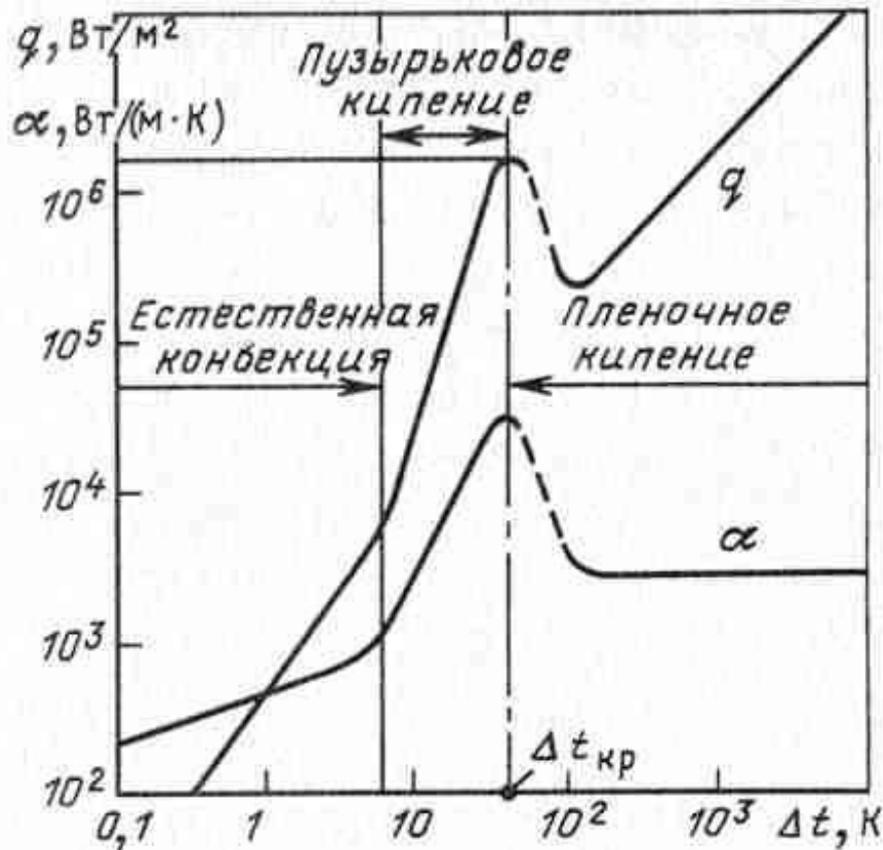
$$\alpha = cq^{2/3}$$

\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** (= 10⁵ 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/(м²К)

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

Коэфф-т теплоотдачи при кипении хладонов

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

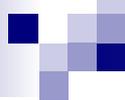
Г.Н. Данилова:

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

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

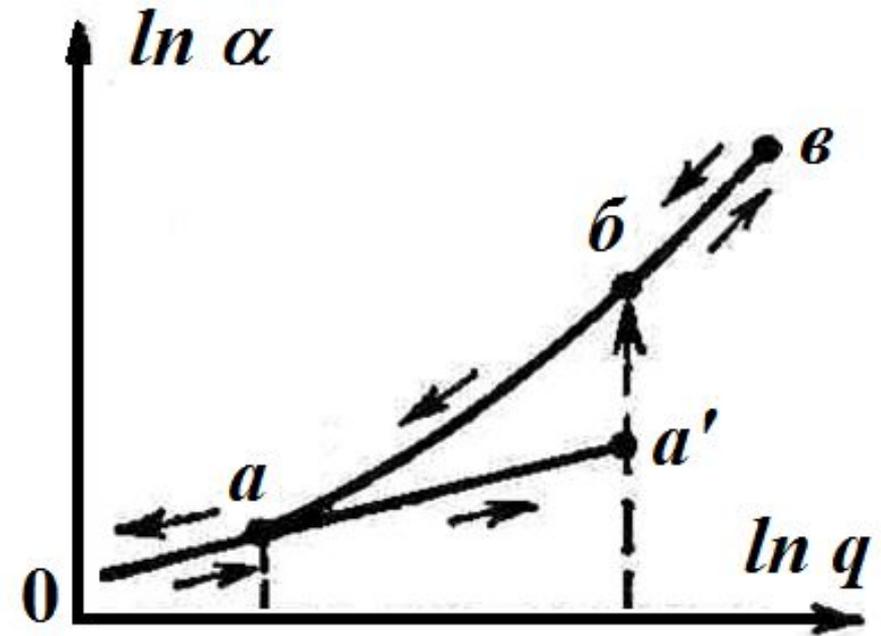
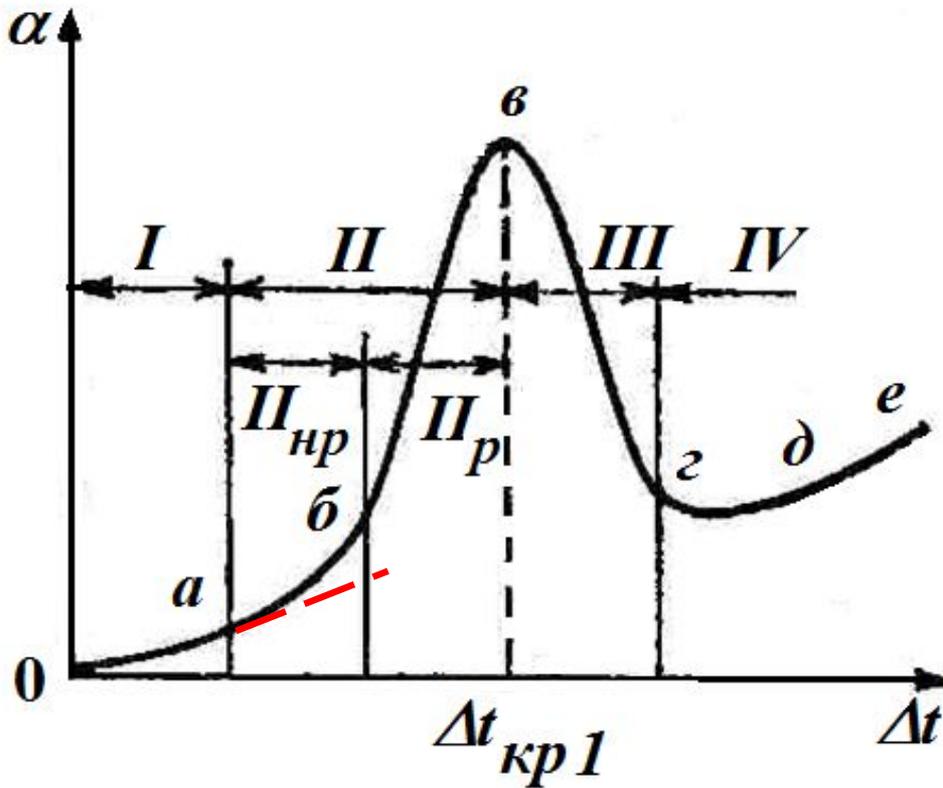
M – молекулярная масса; $p_{\text{кр}}$ [бар] и $T_{\text{кр}}$ [К] – **критические** параметры, R_z [мкм] – высота микронеровностей поверхности нагрева (3–5 мкм для труб промышл. изготовления, $R_{zo} = 1$ мкм)

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.

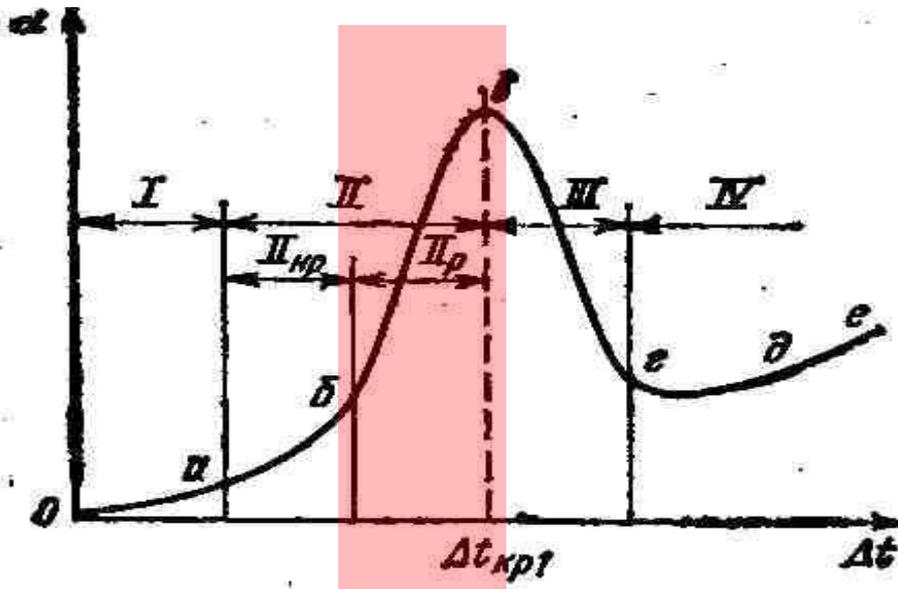
Переход от своб. конвекции к кипению в большом объеме



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/м²

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

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

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

$l_s \sim (d_{\text{кр}} \cdot Ja)$ – 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.

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

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

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

