

# Глава 4

## Теплообмен при кипении и конденсации

### 4-1. Теплообмен при кипении

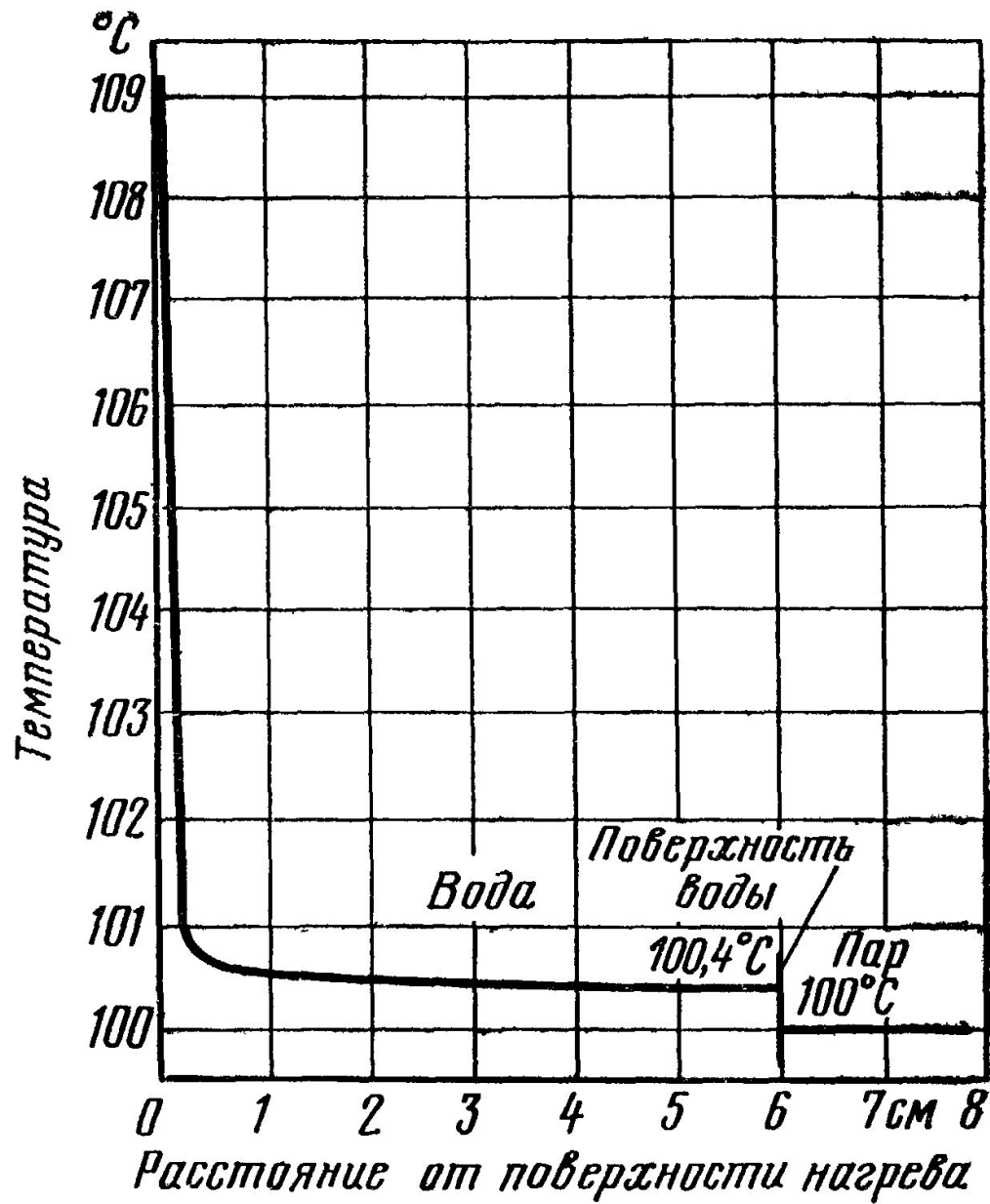
#### 1. Общие представления о процессе кипения.

**Кипением** называют процесс образования пара внутри объёма жидкости.

Для возникновения кипения всегда необходим некоторый перегрев жидкости, т.е. превышение температуры жидкости  $t_{\text{ж}}$  относительно температуры насыщения  $t_s$  при заданном давлении  $p$ .

Чем чище жидкость, тем более высоким оказывается начальный перегрев, необходимый для возникновения кипения.

При подводе теплоты к жидкости через поверхность, имеющую микрошероховатости, образование пузырьков наблюдается в отдельных точках поверхности, так называемых **центрах парообразования**.



Распределение температуры в объёме кипящей жидкости при атмосферном давлении.



Процесс кипения жидкости: *a)* пузырьковый режим, *б)* переходный режим, *в)* плёночный режим.

Температурный напор  $\Delta t = t_c - t_s$

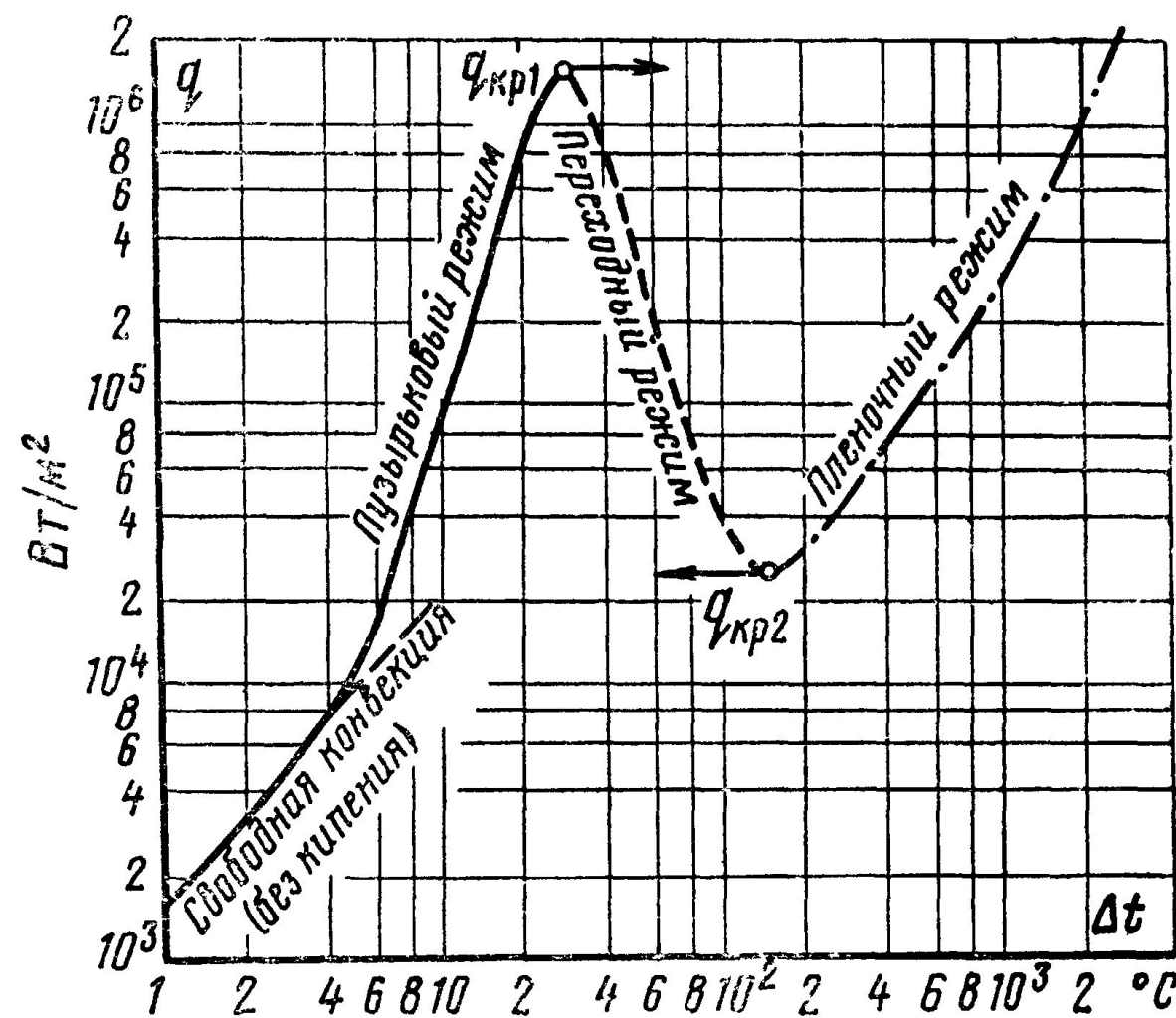
Уравнение теплового баланса при кипении  $Q = r G''$

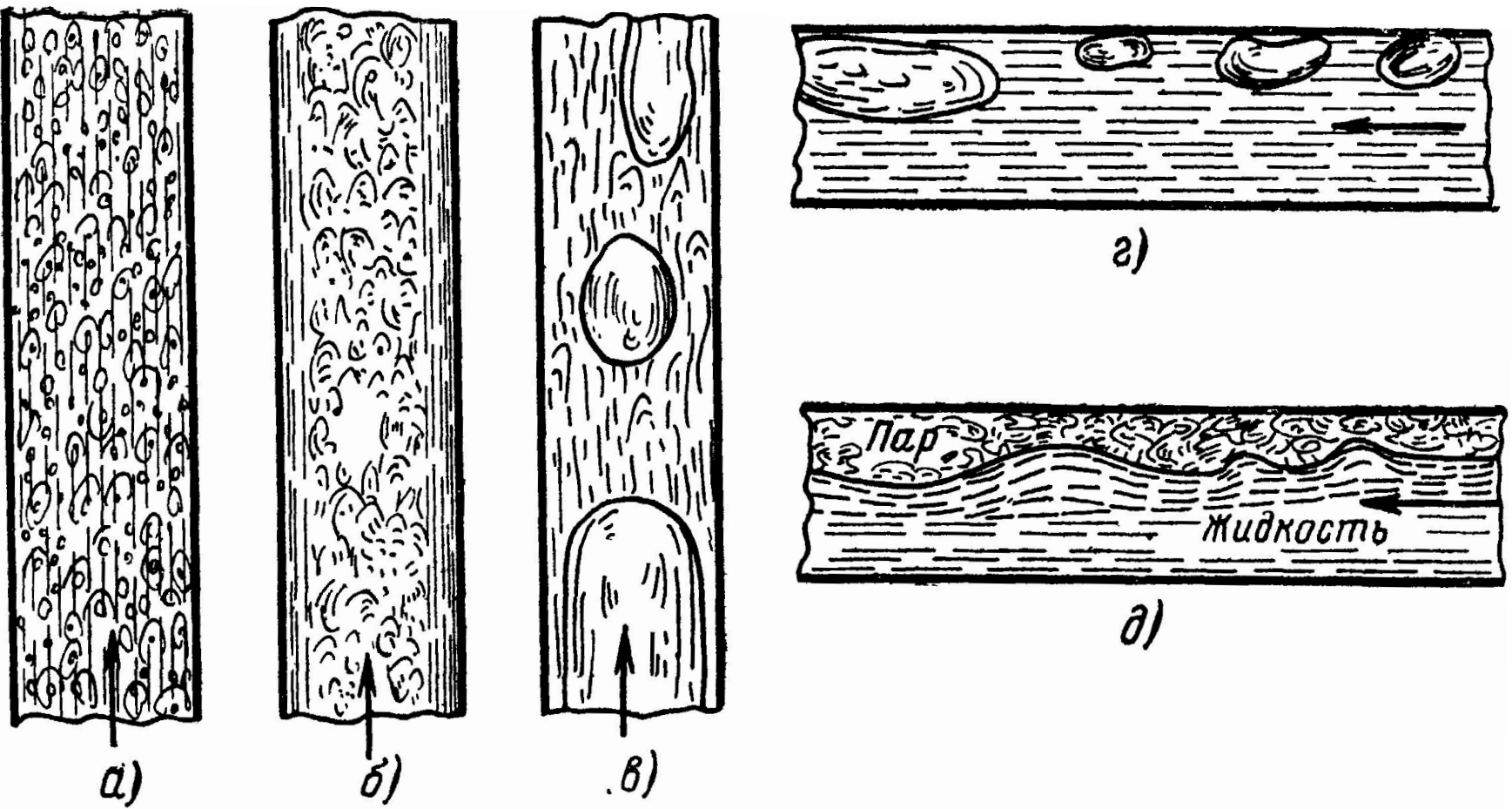
Максимальную тепловую нагрузку при пузырьковом кипении называют **первой критической плотностью теплового потока** и обозначают  $q_{кр1}$ .

Минимальное значение тепловой нагрузки при плёночном кипении называется **второй критической плотностью теплового потока**

$q_{кр2}$ .

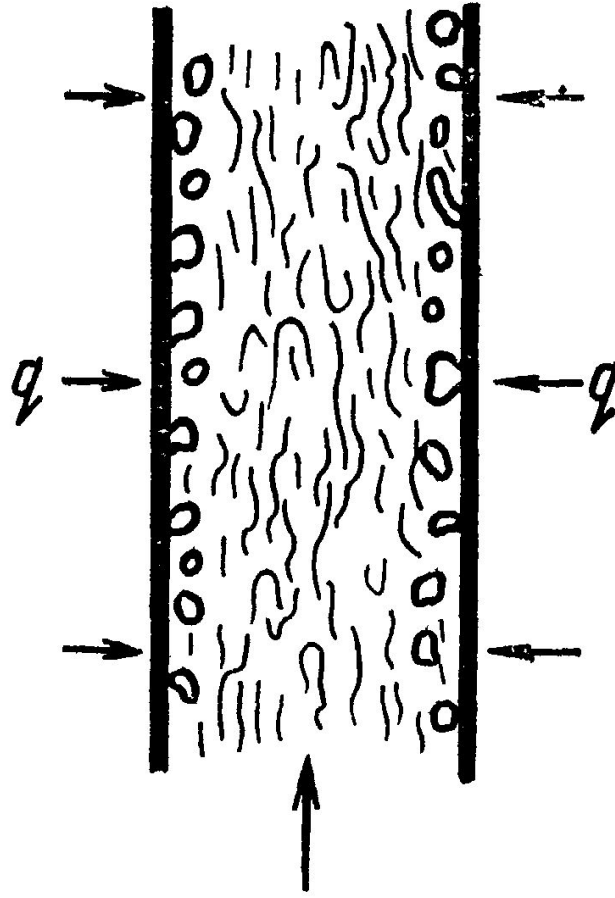
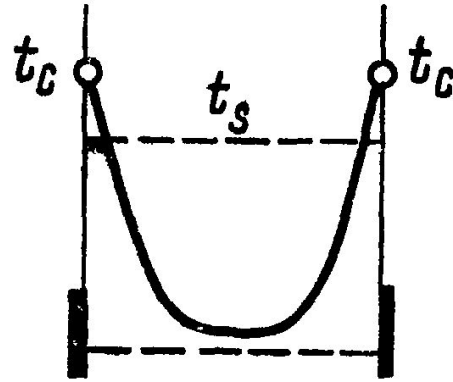
Зависимость плотности теплового потока  $q$  от температурного напора  $\Delta t$  при кипении воды.





Характер движения пароводяной смеси в трубах: а) в виде однородной эмульсии; б) в виде двух самостоятельных потоков воды и пара в вертикальной трубе; в) в виде пузырькового режима в вертикальной трубе; г) в виде пузырькового режима в горизонтальной трубе; д) в виде двух самостоятельных потоков воды и пара в горизонтальной трубе.

# Процесс кипения с недогревом



## 2. Теплообмен при пузырьковом кипении.

Работой адгезии называется работа, которую необходимо затратить для отрыва жидкости от твёрдой поверхности на единицу площади.

Изменение поверхностного натяжения с температурой

$$\sigma = c (\rho' - \rho'')^4$$

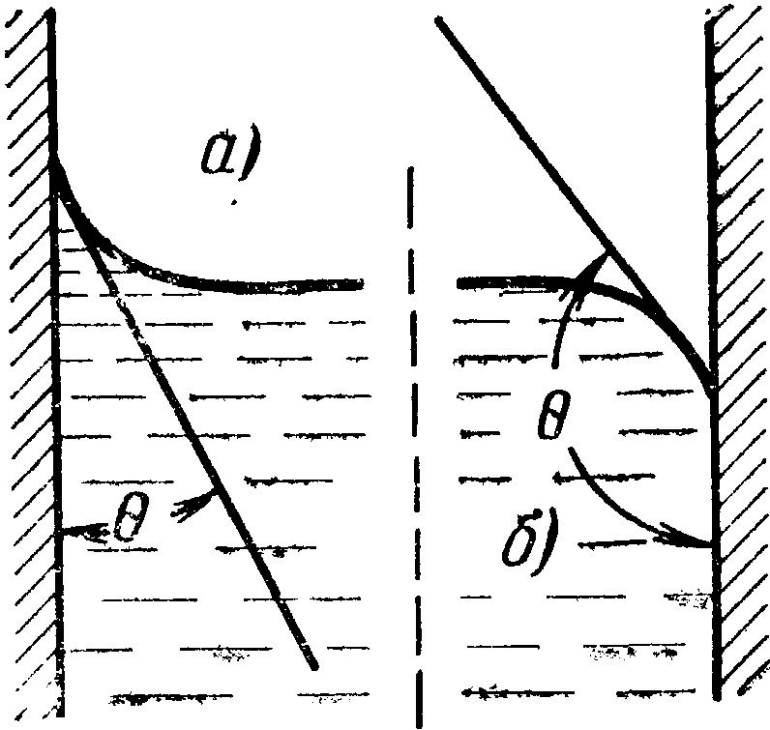
$$\Delta p = p_{\text{п}} - p_{\text{ж}} = \frac{2\sigma}{R}$$

$$R_{\text{мин}} = \frac{2\sigma}{\Delta p} \quad \text{— минимальное значение радиуса пузырька}$$

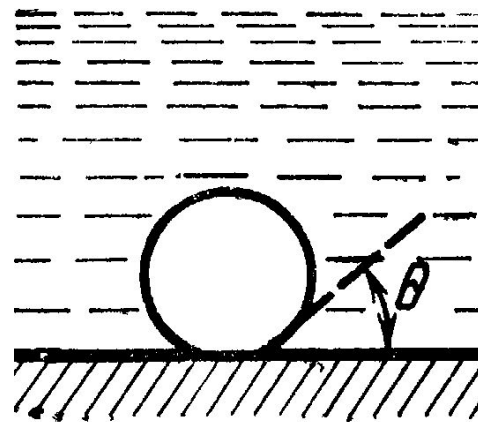
$$\Delta p = p_s(t_s + \Delta t) - p_s(t_s) \approx p'_s \Delta t \quad p'_s = (\partial p / \partial t)_s$$

$$R_{\text{мин}} = \frac{2\sigma}{p'_s \Delta t} \quad R_{\text{мин}} = \frac{2\sigma}{p'_s \Delta t} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''}$$

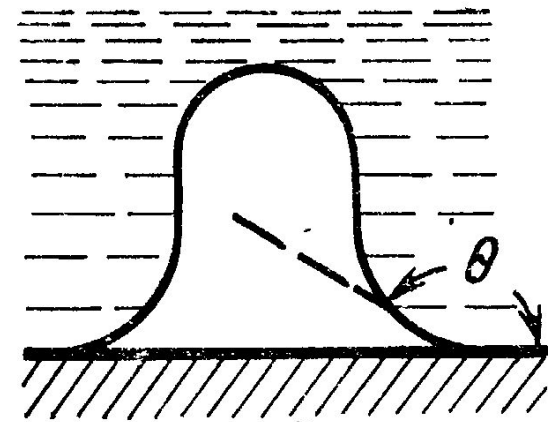
$$p'_s = \frac{r \rho' \rho''}{T_s (\rho' - \rho'')}$$



Форма мениска и краевой угол  $\theta$  при смачивании (а) и несмачивании (б) поверхности жидкостью.



а)



б)

Форма паровых пузырьков на смачиваемой (а) и несмачиваемой (б) поверхностях.

$$\alpha = \frac{q}{t_c - t_s} \quad \text{— коэффициент теплоотдачи при кипении}$$

$$\alpha = c q^{2/3}$$



$$\alpha = b \left( \frac{\lambda^2}{\nu \sigma T_s} \right)^{1/3} q^{2/3}$$

$$b = 0,075 \left[ 1 + 10 \left( \frac{\rho''}{\rho' - \rho''} \right)^{2/3} \right]$$

**Расчёт коэффициента теплоотдачи при кипении для воды**  
(при давлениях 1–200 атм)

$$\alpha = \frac{3,4 p_s^{0,18}}{1 - 0,0045 p_s} q^{2/3}$$

Расчёт первой критической плотностью теплового потока при кипении жидкости на горизонтальных трубах и плитах в условиях свободного движения (большого объёма).

$$q_{кр1} = 0,14 r \sqrt{\rho''} \sqrt[4]{\sigma g (\rho' - \rho'')}$$

### 3. Теплообмен при плёночном кипении.

Расчёт теплоотдачи при плёночном кипении на поверхности горизонтальных труб и пластин в большом объёме

$$\bar{\alpha} = 0,62 \sqrt[4]{\frac{\lambda''^3 (\rho' - \rho'') g r_*}{\nu'' D (t_c - t_{ж})}}$$

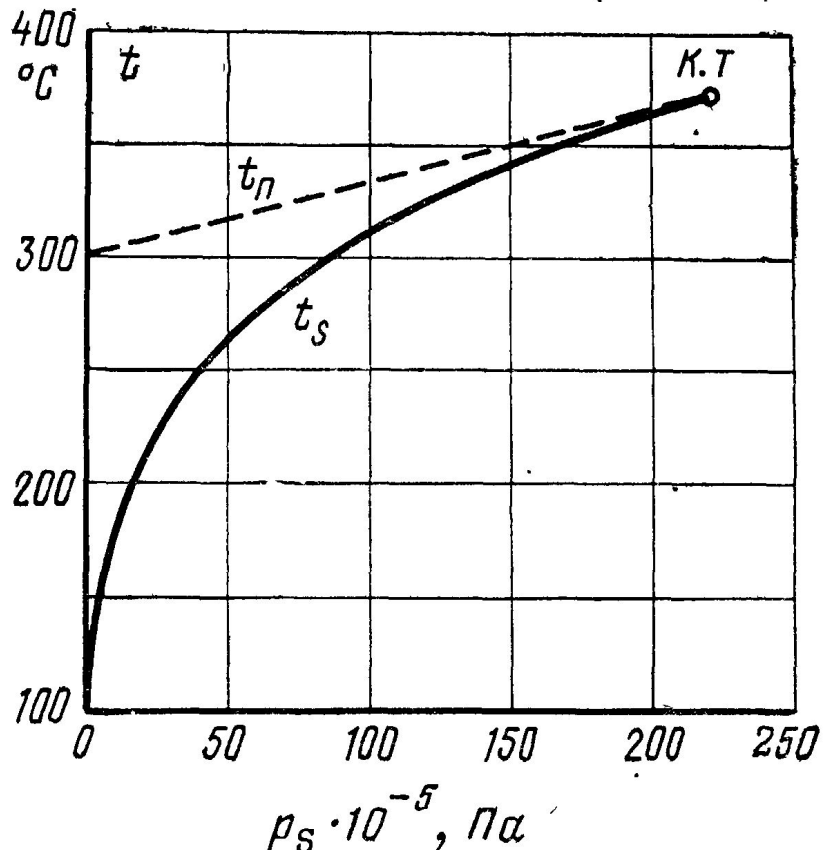
$r_* = r + 0,5 c_p'' (t_c - t_s)$  – эффективная теплота фазового перехода

Расчёт теплоотдачи при плёночном кипении на поверхности вертикальных труб и пластин

$$\bar{\alpha} = 0,25 \sqrt[3]{\frac{\lambda''^2 c_p'' g (\rho' - \rho'')}{\nu''}}$$

# Значения предельных температур $t_{\Pi}$ некоторых жидкостей

Жидкость	$t_s, ^\circ\text{C}$	$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$	Жидкость	$t_s, ^\circ$	$t_{\Pi}, ^\circ\text{C}$
Этиловый спирт . . . . .	78,3	195	Бензол . . . . .	80,1	226
Метилловый спир . . . . .	64,5	190	Пентан . . . . .	36,1	147
Ацетон . . . . .	56,1	181	Гексан . . . . .	68,7	182
Диэтиловый эфир . . . . .	34,5	144	Гептан . . . . .	98,4	215



Зависимость температуры  
предельного нагрева от давления

## 4-2. Теплообмен при конденсации пара

### 1. Основные представления о процессе конденсации.

Различают два вида конденсации: *капельную*, когда конденсат осаждается в виде отдельных капель, и *плёночную*, когда на поверхности твёрдого тела образуется сплошная плёнка жидкости.

Капельная конденсация возможна лишь в том случае, если конденсат не смачивает поверхность охлаждения.

В целом интенсивность теплоотдачи при конденсации пара оказывается достаточно высокой.

Если в паре содержится примесь газа (например, воздуха), скорость конденсации заметно снижается. Газ постепенно накапливается около поверхности, и это затрудняет доступ новых порций пара к поверхности.

## 2. Теплоотдача при плёночной конденсации пара.

В процессе плёночной конденсации вся теплота, выделяющаяся на внешней границе плёнки, отводится к поверхности охлаждения.

При ламинарном движении жидкостной плёнки перенос теплоты через неё осуществляется лишь путём теплопроводности.

Если температура частиц конденсата, соприкасающихся с паром, равна температуре насыщения, то плотность теплового потока определяется выражением

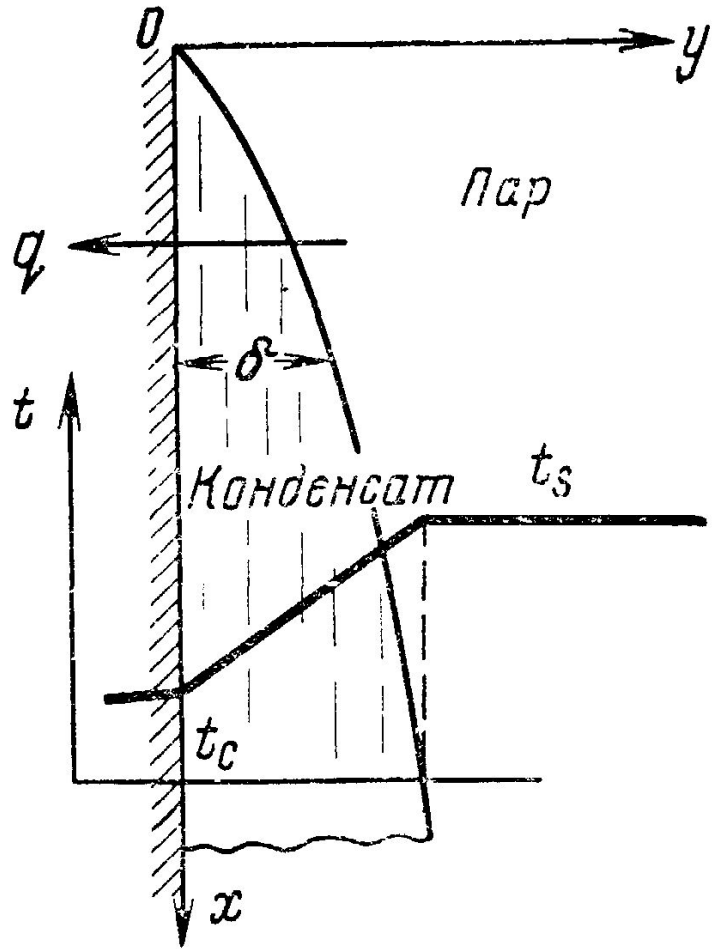
$$q = \frac{\lambda}{\delta} (t_s - t_c)$$

С другой стороны по закону Ньютона-Рихмана

$$q = \alpha (t_s - t_c)$$

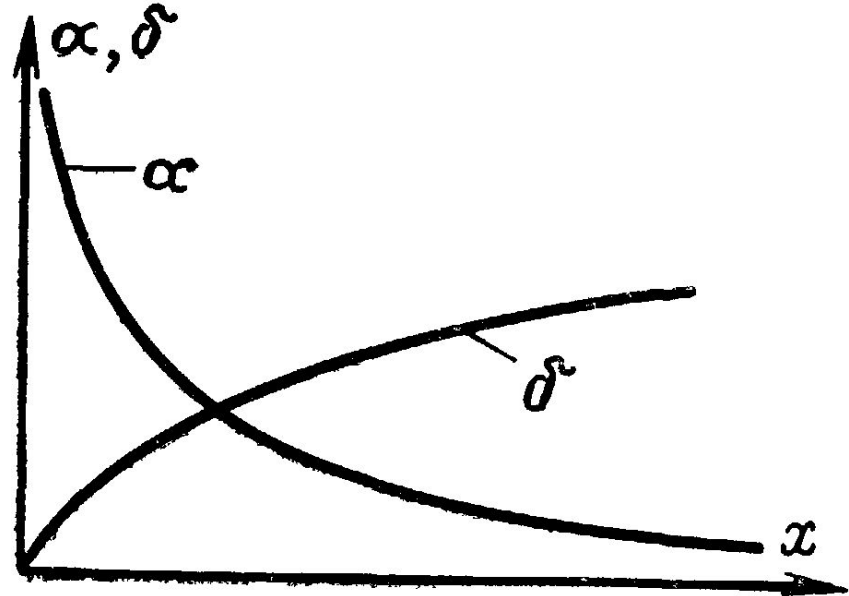
$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta}$$

Следовательно, определение коэффициента теплоотдачи сводится к определению толщины плёнки конденсата  $\delta$ , которая может быть получена из анализа условий его течения.



Плёночная конденсация на вертикальной стенке.

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4\lambda (t_s - t_c) \nu x}{rg (\rho' - \rho'')}}$$



Изменение коэффициента теплоотдачи  $\alpha$  и толщины плёнки  $\delta$  вдоль вертикальной стенки.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta} = \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 rg (\rho' - \rho'')}{4 (t_s - t_c) \nu x}}$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для вертикальной стенки или вертикальной трубы высотой  $h$  определяется формулой

$$\bar{\alpha} = 0,943 \frac{A}{\sqrt[4]{h \Delta t}} \quad \Delta t = t_s - t_c \quad A = \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 r g (\rho' - \rho'')}{\nu}}$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для наклонной стенки

$$\bar{\alpha}_\psi = \bar{\alpha}_{\text{верт}} \sqrt[4]{\sin \Psi}$$

Среднее значение коэффициента теплоотдачи для горизонтальной трубы

$$\bar{\alpha} = 0,728 \frac{A}{\sqrt[4]{D \Delta t}}$$

Для расчёта коэффициента теплоотдачи для горизонтальной трубы необходимо ввести поправку, учитывающую зависимость физических свойств пара от температуры

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{N, s} \varepsilon_t$$

На поверхности вертикальных пластин и труб интенсивность теплоотдачи, как показывают опытные данные, обычно оказывается более высокой, чем расчётная. Это объясняется тем, что в действительности в этих условиях наблюдается волновое течение плёнки конденсата.

Поправка, учитывающая волновой характер течения, имеет вид:

$$\varepsilon_v = (Re_s/4)^{0,04} \quad \text{При значениях } Re \leq 4 \quad \varepsilon_v = 1$$

$$Re = 4 \frac{G}{\mu} \quad Re_s = 4 \frac{\bar{g}h}{r\mu} = 4 \frac{\bar{\alpha}\Delta th}{r\mu}$$

С учётом поправки на волновое течение расчётное соотношение для теплоотдачи при конденсации пара на поверхности вертикальных труб и плит имеет вид:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{N, s} \varepsilon_v \varepsilon_t$$



## Значение поправки $\varepsilon_t$ для воды

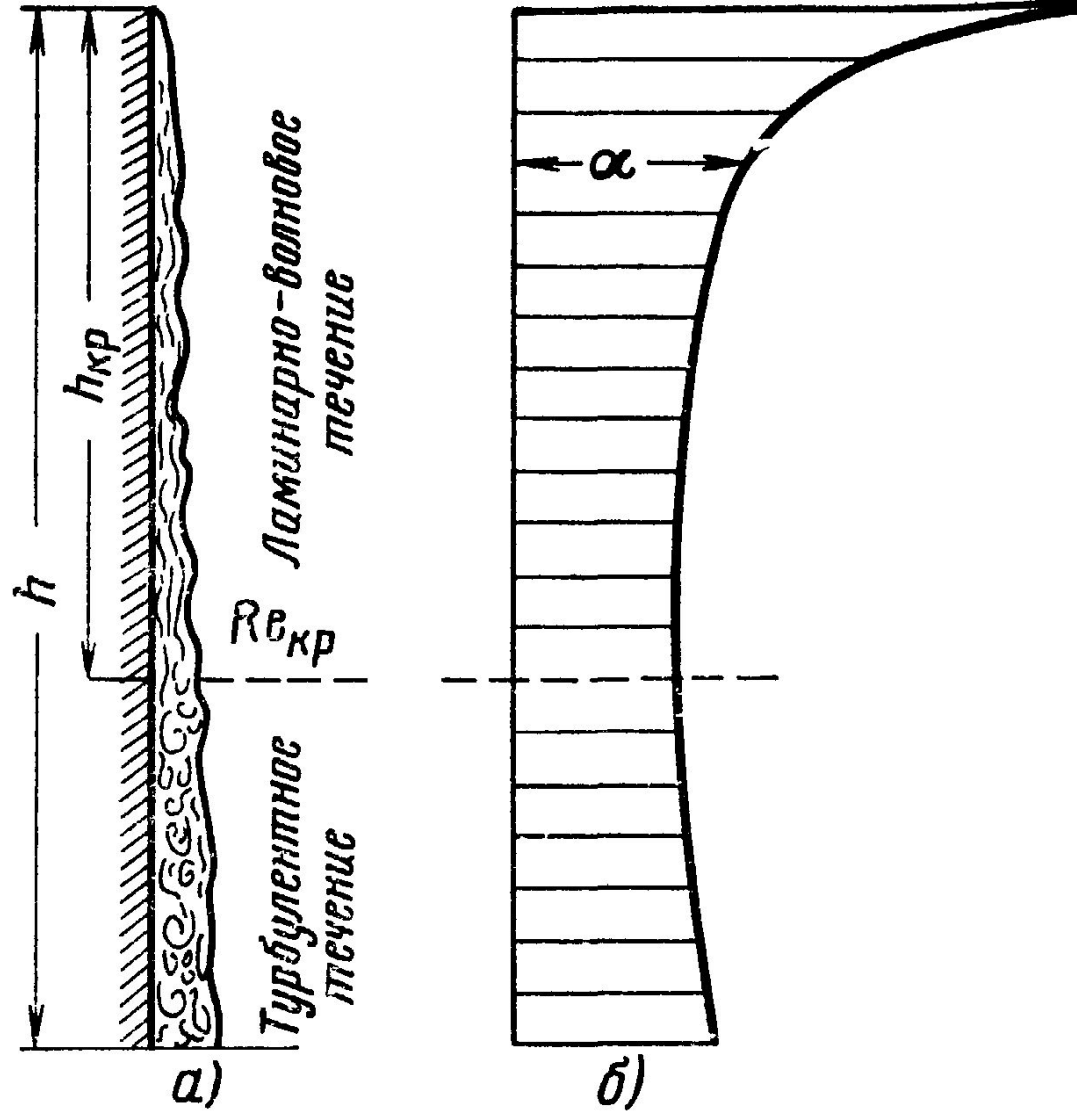
$\Delta t$	$p \cdot 10^{-5}, \text{ Па}$				
	1	5	10	100	150
10	0,985	0,990	0,990	1,01	1,02
20	0,967	0,982	0,985	1,01	1,03
50	0,900	0,950	0,960	1,02	1,04

При больших высотах вертикальной поверхности и значительных температурных напорах расход конденсата может возрасти настолько, что возникает *турбулентный* режим течения плёнки.

$$Re_{кр} \approx 1600$$

При турбулентном течении локальная интенсивность теплоотдачи растёт с увеличением расхода  $G$  и числа  $Re$  по соотношению

$$\frac{\alpha}{\lambda} \left( \frac{v^2}{g} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \right)^{1/3} = 0,023 Re^{0,25} Pr^{0,5}$$



$$(h\Delta t)_{кр} = 2300 \frac{r\mu_s}{\lambda_s} \left( \frac{v_s^2}{g} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \right)^{1/3}$$

Значения величин  $(h\Delta t)_{кр}$  и  $A_s = \sqrt[4]{\frac{\lambda_s^3 rg (\rho' - \rho'')}{\nu_s}}$  для воды

$t_s, ^\circ\text{C}$	$p_s \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$(h\Delta t)_{кр}, \text{м}\cdot^\circ\text{C}$	$A_s \cdot 10^{-3},$ $\text{Вт}/(\text{м}^{7/4}\cdot^\circ\text{C}^{3/4})$
100	1,01	44,6	12,2
120	1,99	32,7	12,7
150	4,76	21,5	13,0
180	10,0	15,3	13,2
210	19,1	11,7	13,0
250	39,8	8,8	12,3
280	64,2	7,4	11,0
310	98,7	6,3	9,8
340	146,1	5,0	7,9

Расчётные формулы для определения среднего по всей поверхности коэффициента теплоотдачи при наличии на вертикальной поверхности участка с турбулентным режимом течения конденсата

$$\bar{\alpha} = 400 \frac{r\mu_s}{h\Delta\bar{t}} \left\{ 1 + 0,625 \text{Pr}^{0,5} \left[ \frac{h\Delta\bar{t}}{(h\Delta\bar{t})_{\text{кр}}} - 1 \right] \right\}^{4/3}$$

Полученные расчётные формулы справедливы при конденсации чистого насыщенного пара и на чистой поверхности. Поэтому при определении значения коэффициента теплоотдачи по возможности необходимо учитывать ряд дополнительных обстоятельств, влияющих на теплоотдачу.

а) Влияние перегрева пара.

$$q''_{\text{п}} = i''_{\text{п}} - i''_s$$

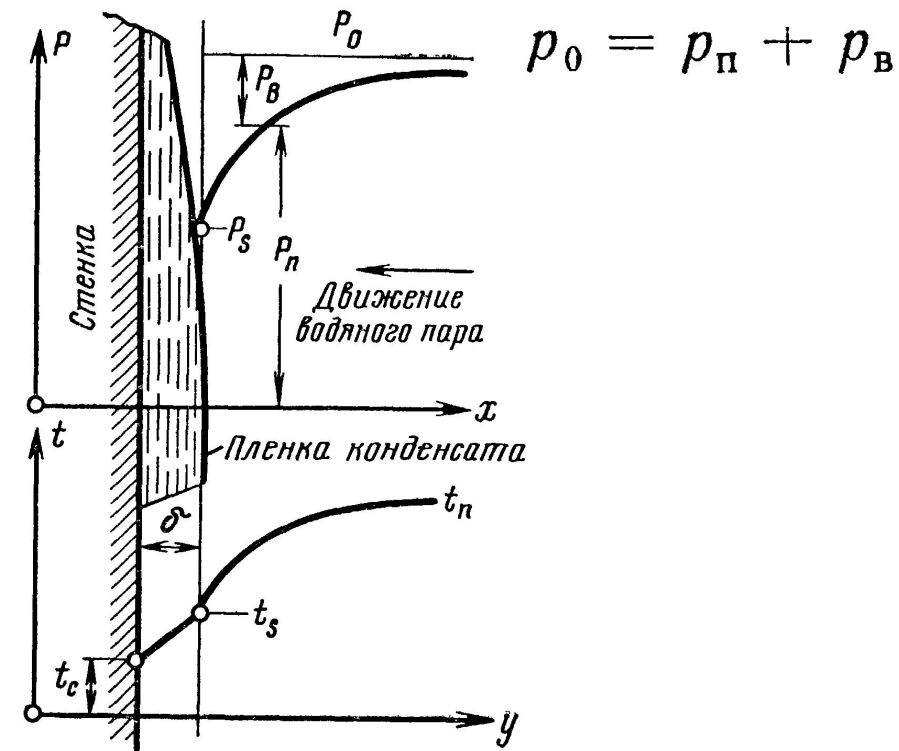
$$r' = r + q''_{\text{п}}$$

## б) Влияние состояния поверхности.

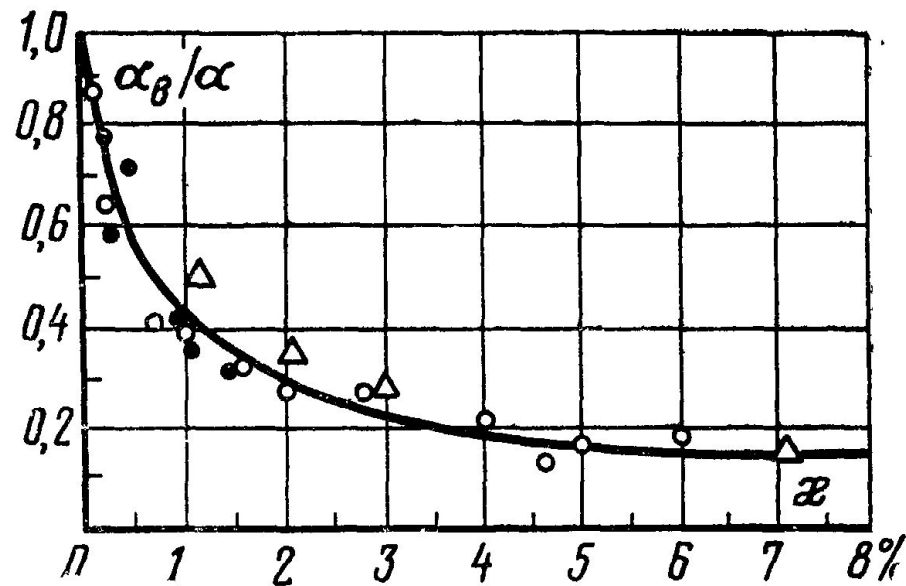
Если поверхность шероховата или покрыта слоем окисла, то вследствие дополнительного сопротивления течению толщина плёнки увеличивается, а коэффициент теплоотдачи при этом снижается.

Здесь большое влияние оказывает также термическое сопротивление окисной плёнки на поверхности

## в) Влияние содержания в паре неконденсирующихся газов.



$$p_0 = p_n + p_v$$



г) Влияние скорости и направления течения пара.

При значительных скоростях поток пара оказывает динамическое воздействие на конденсатную плёнку.

Если движение пара совпадает с направлением течения плёнки, поток пара ускоряет движение конденсата в плёнке, её толщина уменьшается, и коэффициент теплоотдачи возрастает.

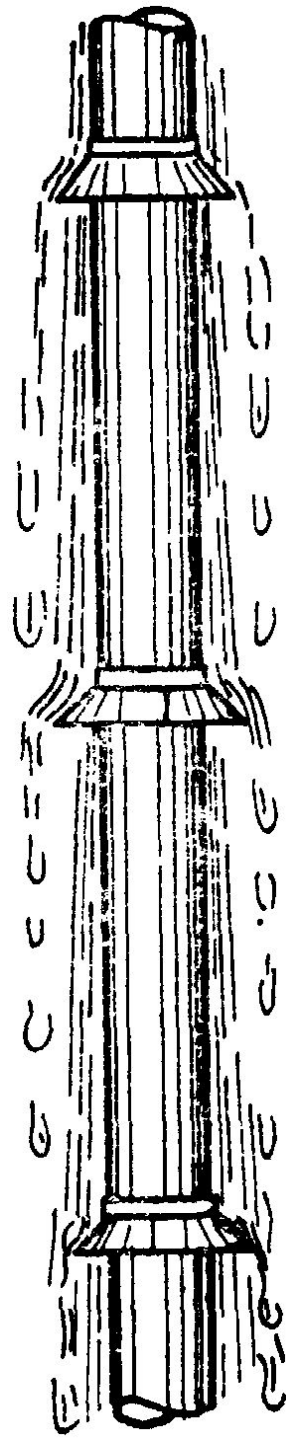
При движении пара снизу вверх, т.е. в обратном направлении, течение плёнки тормозится, толщина её увеличивается, а коэффициент теплоотдачи уменьшается.

Однако такое явление происходит лишь до тех пор, пока динамическое воздействие пара не превысит силу тяжести. После этого плёнка пара увлекается вверх и частично срывается с поверхности. При этом с увеличением скорости пара коэффициент теплоотдачи вновь растёт.

д) Влияние компоновки поверхности нагрева.

Установка конденсатоотводящих колпаков через каждые 10 см на трубе высотой 3 м увеличивает среднее значение коэффициента теплоотдачи в 2–3 раза.

Ещё большее увеличение теплоотдачи получается при подаче пара в виде тонких струек, движущихся с большой скоростью. При ударе таких струек о стенку происходит разрушение плёнки и разбрызгивание конденсата. Термическое сопротивление теплоотдачи при этом уменьшается в 3–10 раз.



### **3. Теплоотдача при конденсации пара в трубах.**

В *вертикальных трубах* при движении пара сверху вниз силы тяжести и динамического воздействия парового потока совпадают по направлению и плёнка конденсата стекает вниз.

В *коротких трубах* при *небольшой скорости* парового потока течение плёнки в основном определяется силой тяжести аналогично случаю конденсации неподвижного пара на вертикальной стенке.

При *увеличении скорости* пара интенсивность теплоотдачи растёт. Это объясняется уменьшением толщины конденсатной плёнки, которая под воздействием парового потока течёт быстрее.

В *длинных трубах* при *больших скоростях* движения пара картина процесса усложняется. В этих условиях наблюдается частичный срыв жидкости с поверхности плёнки и образование парожидкостной смеси в ядре потока.

При этом влияние силы тяжести постепенно утрачивается, и закономерности процесса перестают зависеть от ориентации трубы в пространстве.



В *горизонтальных трубах* при не очень больших скоростях парового потока взаимодействие сил тяжести и трения пара о плёнку приводит к иной картине течения.

Под влиянием силы тяжести плёнка конденсата стекает по внутренней поверхности трубы вниз. Здесь конденсат накапливается и образует ручей.

На это движение накладывается движение конденсата в продольном направлении под воздействием парового потока.

В итоге интенсивность теплоотдачи оказывается переменной по окружности трубы: в верхней части более высокая, чем в нижней.

Из-за затопления нижней части сечения горизонтальной трубы конденсатом средняя интенсивность теплоотдачи при небольших скоростях пара может оказаться даже более низкой, чем при конденсации неподвижного пара снаружи горизонтальной трубы того же диаметра.

При конденсации в трубах различают режимы *полной* и *частичной* конденсации пара.

При *полной конденсации* весь поступающий в трубу пар конденсируется целиком, и на выходе из трубы движется сплошной поток конденсата.

При *частичной конденсации* на выходе из трубы течёт парожидкостная смесь.

*Уравнение материального баланса* для любого поперечного сечения трубы

$$G'' + G' = G = \text{const}$$

Отношение расхода пара  $G''$ , проходящего через данное сечение трубы, к полному расходу  $G$  называют *расходным массовым паросодержанием* двухфазного потока в этом сечении.

$$x = G''/G$$

Уравнение теплового баланса для элемента трубы длиной  $dl$

$$q\pi D dl = r dG'$$

После интегрирования получаем

$$\bar{q}\pi D l = rG(x_1 - x_2)$$

Расчёт теплоотдачи

$$\alpha = \alpha_0 \sqrt{\rho' / \rho_m}$$

$\alpha_0$  найдём из уравнения

$$\bar{Nu}_{d_{ж}} = 0,021 Re_{d_{ж}}^{0,80} Pr_{ж}^{0,43} (Pr_{ж}/Pr_c)^{0,25} \epsilon_l$$

$$\frac{\rho'}{\rho_m} = 1 + \frac{\rho' - \rho''}{\rho''} x$$

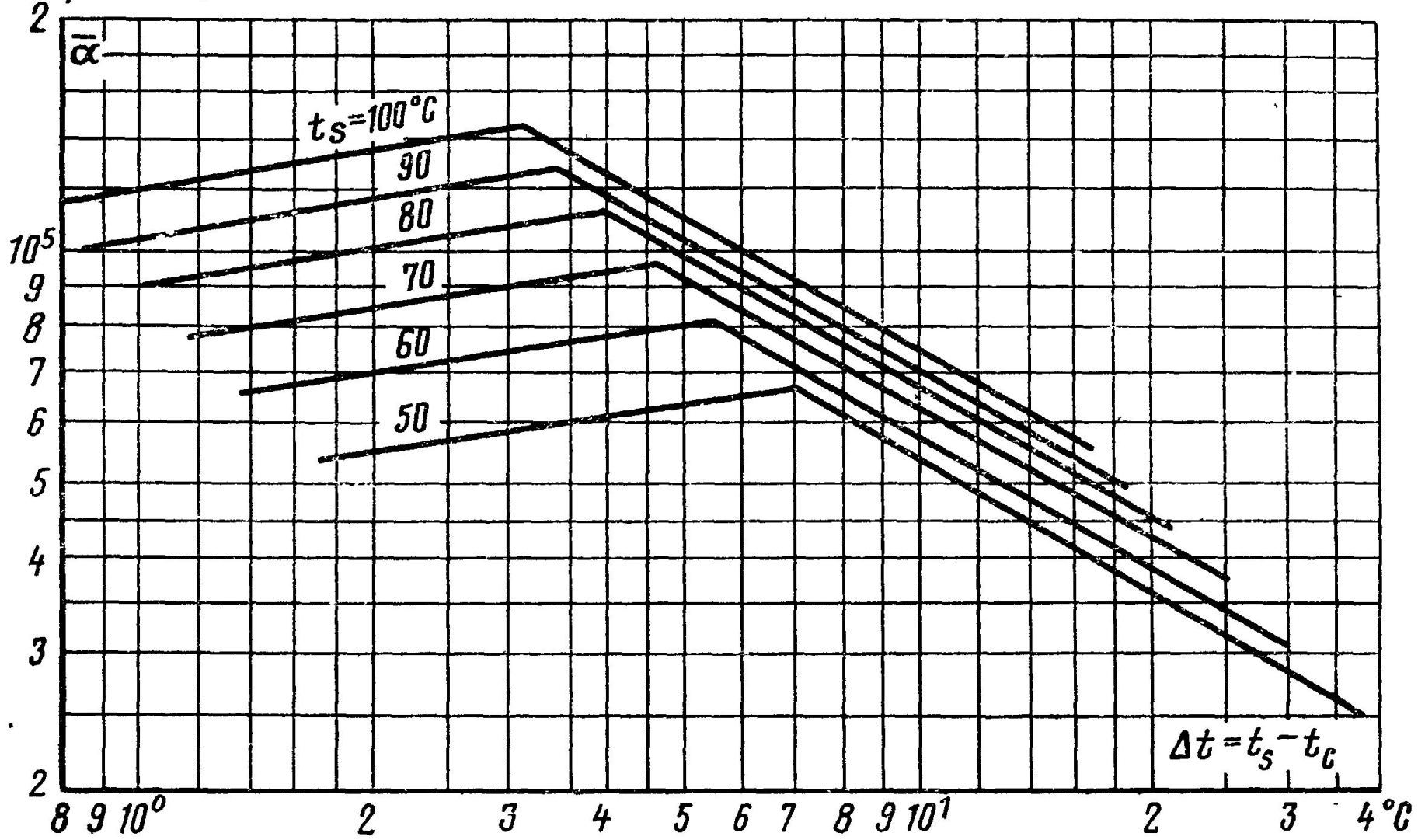
Средний коэффициент теплоотдачи по всей длине трубы

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_0} = \frac{1}{2} \left[ \sqrt{\left(\frac{\rho'}{\rho_m}\right)_1} + \sqrt{\left(\frac{\rho'}{\rho_m}\right)_2} \right]$$

# 4. Теплоотдача при капельной конденсации пара.

Теплоотдача при капельной конденсации водяного пара в зависимости от  $t_s$  и  $\Delta t$ .

$\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$



**Пример 4-1.** Определить интенсивность теплоотдачи и температурные напоры при пузырьковом кипении воды для давлений 10 и 100 бар при тепловой нагрузке  $q = 1,5 \cdot 10^6$  Вт/м<sup>2</sup>.

**Пример 4-2.** Определить наибольшие плотности тепловых потоков, которые можно отвести от поверхности нагрева при пузырьковом режиме кипения воды в большом объёме при давлениях 10 и 100 атм.

**Пример 4-3.** Найти коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока, отводимого конвективным путём от поверхности горизонтальной трубы диаметром 12 мм в плёночном режиме кипения воды при атмосферном давлении, если температура поверхности трубы 500°C.

**Пример 4-4.** Найти коэффициент теплоотдачи и плотность теплового потока, отводимого конвективным путём от поверхности вертикальной трубы диаметром 12 мм в плёночном режиме кипения воды при атмосферном давлении, если температура поверхности трубы 500°C.

Физические свойства сухого воздуха  
( $P_B = 760$  мм рт. ст.  $\approx 1,01 \cdot 10^5$  Па)

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^3, \text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
—50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
—40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
—30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
—20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	11,61	0,716
—10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Физические свойства воды на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i, \text{кДж/кг}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\alpha \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, 1/\text{K}$	$\sigma \cdot 10^4, \text{Н/м}$	$\text{Pr}$
0	1,013	999,9	0	4,212	0,560	13,2	1788	1,789	-0,63	756,4	13,5
10	1,013	999,7	42,04	4,191	0,580	13,8	1306	1,306	+0,70	741,6	9,45
20	1,013	998,2	83,91	4,183	0,597	14,3	1004	1,006	1,82	726,9	7,03
30	1,013	995,7	125,7	4,174	0,612	14,7	801,5	0,805	3,21	712,2	5,45
40	1,013	992,2	167,5	4,174	0,627	15,1	653,3	0,659	3,87	696,5	4,36
50	1,013	988,1	209,3	4,174	0,640	15,5	549,4	0,556	4,49	676,9	3,59
60	1,013	983,1	251,1	4,179	0,650	15,8	469,9	0,478	5,11	662,2	3,03
70	1,013	977,8	293,0	4,187	0,662	16,1	406,1	0,415	5,70	643,5	2,58
80	1,013	971,8	335,0	4,195	0,669	16,3	355,1	0,365	6,32	625,9	2,23
90	1,013	965,3	377,0	4,208	0,676	16,5	314,9	0,326	6,95	607,2	1,97
100	1,013	958,4	419,1	4,220	0,684	16,8	282,5	0,295	7,52	588,6	1,75
110	1,43	951,0	461,4	4,233	0,685	17,0	259,0	0,272	8,08	569,0	1,60
120	1,98	943,1	503,7	4,250	0,686	17,1	237,4	0,252	8,64	548,4	1,47
130	2,70	934,8	546,4	4,266	0,686	17,2	217,8	0,233	9,19	528,8	1,35
140	3,61	926,1	589,1	4,287	0,685	17,2	201,1	0,217	9,72	507,2	1,26
150	4,76	917,0	632,2	4,313	0,684	17,3	186,4	0,203	10,3	486,6	1,17
160	6,18	907,4	675,4	4,346	0,681	17,3	173,6	0,191	10,7	466,0	1,10
170	7,92	897,3	719,3	4,380	0,676	17,2	162,8	0,181	11,3	443,4	1,05
180	10,03	886,9	763,3	4,417	0,672	17,2	153,0	0,173	11,9	422,8	1,03
190	12,55	876,0	807,8	4,459	0,664	17,2	144,2	0,165	12,6	400,2	0,965

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5},$ Па	$\rho, \text{кг/м}^3$	$i, \text{кДж/кг}$	$c_p,$ кДж/(кг·°C)	$\lambda,$ Вт/(м·°C)	$a \cdot 10^6,$ м²/с	$\mu \cdot 10^6,$ Па·с	$\nu \cdot 10^6,$ м²/с	$\beta \cdot 10^4,$ 1/К	$\sigma \cdot 10^4,$ Н/м	Pr
200	15,55	863,0	852,5	4,505	0,658	17,0	136,4	0,158	13,3	376,7	0,932
210	19,08	852,8	897,7	4,555	0,649	16,7	130,5	0,153	14,1	354,1	0,915
220	23,20	840,3	943,7	4,614	0,640	16,5	124,6	0,148	14,8	331,6	0,898
230	27,98	827,3	990,2	4,681	0,629	16,3	119,7	0,145	15,9	310,0	0,888
240	33,48	813,6	1037,5	4,76	0,617	16,0	114,8	0,141	16,8	285,5	0,883
250	39,78	799,0	1085,7	4,87	0,605	15,5	109,0	0,137	18,1	261,9	0,884
260	46,94	784,0	1135,7	4,98	0,593	15,2	105,9	0,135	19,7	237,4	0,892
270	55,05	767,9	1185,3	5,12	0,578	14,7	102,0	0,113	21,6	214,8	0,905
280	64,19	750,7	1236,8	5,30	0,565	14,3	98,1	0,131	23,7	191,3	0,917
290	74,45	732,3	1290,0	5,50	0,548	13,7	94,2	0,129	26,2	168,7	0,944
300	85,92	712,5	1344,9	5,76	0,532	13,0	91,2	0,128	29,2	144,2	0,986
310	98,70	691,1	1402,2	6,11	0,514	12,2	88,3	0,128	32,9	120,7	1,05
320	112,90	667,1	1462,1	6,57	0,494	11,3	85,3	0,128	38,2	98,10	1,14
330	128,65	640,2	1526,2	7,25	0,471	10,2	81,4	0,127	43,3	76,71	1,25
340	146,08	610,1	1594,8	8,20	0,446	8,95	77,5	0,127	53,4	56,70	1,42
350	165,37	574,4	1671,4	10,10	0,431	7,90	72,6	0,126	66,8	38,16	1,70
360	186,74	528,0	1761,5	14,65	0,367	4,2	66,7	0,126	109	20,21	2,66
370	210,53	450,5	1892,5	40,32	0,338	1,85	56,9	0,126	264	4,709	6,80



**Физические свойства водяного пара на линии насыщения**

$t, ^\circ\text{C}$	$p \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$i'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$c_p', \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\text{Pr}$
100	1,013	0,598	2675,9	2256,8	2,135	2,372	18,58	11,97	20,02	1,08
110	1,43	0,826	2691,4	2230,0	2,177	2,489	13,83	12,46	15,07	1,09
120	1,98	1,121	2706,5	2202,8	2,206	2,593	10,50	12,85	11,46	1,09
130	2,70	1,496	2720,7	2174,3	2,257	2,686	7,972	13,24	8,85	1,11
140	3,61	1,966	2734,1	2145,0	2,315	2,791	6,130	13,54	6,89	1,12
150	4,76	2,547	2746,7	2114,3	2,395	2,884	4,728	13,93	5,47	1,16
160	6,18	3,258	2758,0	2082,6	2,479	3,012	3,722	14,32	4,39	1,18
170	7,92	4,122	2768,9	2049,5	2,583	3,128	2,939	14,72	3,57	1,21
180	10,03	5,157	2778,5	2015,2	2,709	3,268	2,339	15,11	2,93	1,25
190	12,55	6,397	2786,4	1978,8	2,856	3,419	1,872	15,60	2,44	1,30
200	15,55	7,862	2793,1	1940,7	3,023	3,547	1,492	15,99	2,03	1,36
210	19,08	9,588	2798,2	1900,5	3,199	3,722	1,214	16,38	1,71	1,41
220	23,20	11,62	2801,5	1857,8	3,408	3,896	0,983	16,87	1,45	1,47
230	27,98	13,99	2803,2	1813,0	3,634	4,094	0,806	17,36	1,24	1,54
240	33,48	16,76	2803,0	1766	3,881	4,290	0,658	17,75	1,06	1,61
250	39,78	19,98	2801	1716	4,157	4,515	0,544	18,24	0,913	1,68
260	46,94	23,72	2796	1661	4,467	4,800	0,453	18,83	0,794	1,75
270	55,05	28,09	2709	1604	4,815	5,115	0,378	19,32	0,688	1,82
280	64,19	33,19	2780	1543	5,234	5,490	0,317	19,91	0,600	1,90
290	74,45	39,15	2766	1476	5,694	5,830	0,261	20,59	0,526	2,01
300	85,92	46,21	2749	1404	6,280	6,270	0,216	21,28	0,461	2,13
310	98,70	54,58	2727	1325	7,118	6,840	0,176	21,97	0,403	2,29
320	112,90	64,72	2700	1238	8,206	7,510	0,141	22,85	0,353	2,50
330	128,65	77,10	2666	1140	9,881	8,260	0,108	23,93	0,310	2,86
340	146,08	92,76	2622	1027	12,35	9,300	0,0811	25,20	0,272	3,35
350	165,37	113,6	2564	893	16,24	10,70	0,0581	26,58	0,234	4,03
360	186,74	144,0	2481	719,7	23,03	12,790	0,0386	29,13	0,202	5,23
370	210,53	203,0	2331	438,4	56,52	17,10	0,0150	33,73	0,166	11,10

**Пример 4-5.** Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара атмосферного давления на поверхность горизонтальной трубы диаметром 16 мм, если температура поверхности трубы  $80^{\circ}\text{C}$ .

**Пример 4-6.** Определить тепловой поток  $Q$  и количество образующегося конденсата  $G$  при конденсации водяного пара атмосферного давления на поверхность горизонтальной трубы длиной 1 м и диаметром 16 мм, если температура поверхности трубы  $80^{\circ}\text{C}$ .

**Пример 4-7.** Определить коэффициент теплоотдачи при конденсации водяного пара атмосферного давления на поверхность вертикальной трубы диаметром 16 мм, если температура поверхности трубы  $80^{\circ}\text{C}$  и её высота равна: а) 1 м; б) 3 м.