

Тема 3 (2 час, лекция 1)

Лекция 11



Теплообмен при кипении однокомпонентных жидкостей.

Механизм переноса теплоты при кипении. Влияние смачиваемости стенки жидкостью, краевой угол. Рост, отрыв и движение пузырей пара. Минимальный радиус центра парообразования; число действующих центров парообразования. Режимы кипения жидкости в большом объеме. Кривая кипения при "паровом" и "электрическом" обогреве. Первая и вторая критические плотности теплового потока.

Расчет критических тепловых нагрузок. Зависимость коэффициента теплоотдачи от давления, физических свойств жидкости, состояния поверхности и других факторов при кипении в большом объеме.

Теплообмен при кипении жидкости в трубах; зависимость коэффициента теплоотдачи от скорости циркуляции, плотности теплового потока и других факторов. Расчет теплоотдачи в трубах.

Кипение – процесс интенсивного образования пара внутри объема жидкости при температуре насыщения или выше этой температуры.

При кипении поглощается теплота фазового перехода, поэтому для осуществления стационарного процесса кипения необходим **повод теплоты**.

Различают:

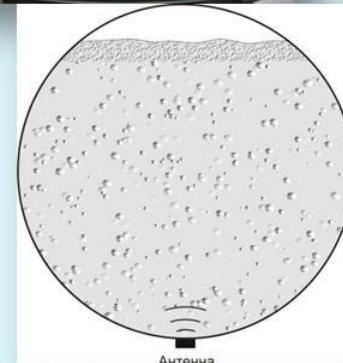
Объемное кипение жидкости (например, при резком уменьшении давления) - в этом случае температура жидкости становится больше температуры насыщения при данном давлении.

В нашем курсе будем рассматривать только теплообмен при кипении на твердых поверхностях или **поверхностное кипение**.

Всегда – центры парообразования:

объемное - виноградинки в шампанском, ложка, соль-сахар, динамическое воздействие с локальным изменением параметров;

поверхностное - неровности поверхности, динамическое воздействие с локальным изменением параметров.



Процесс кипения зависит от граничных условий теплообмена, давления среды, физических свойств жидкости, пара и твердой стенки, состояния твердой поверхности, геометрии системы, режима движения жидкости и т.д. Поэтому разработать математическую модель процесса кипения не представляется возможным и все сведения о механизме кипения получены опытным путем.

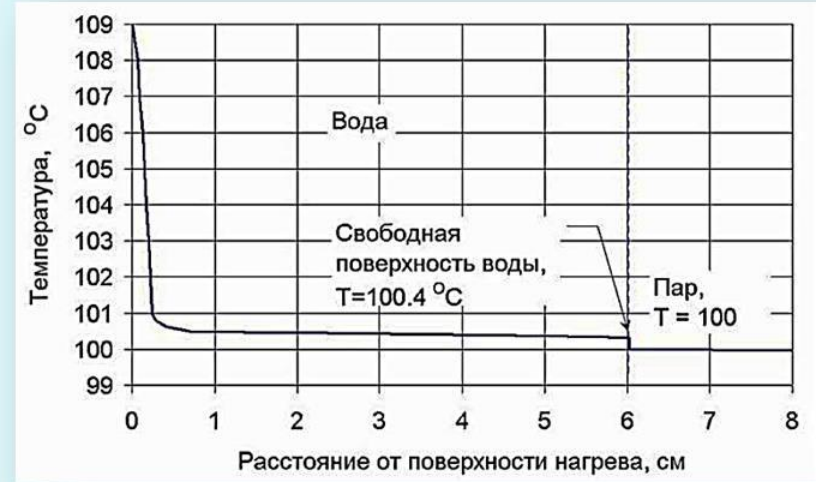
Классификация видов поверхностного кипения:

- - по термодинамическому состоянию жидкости - недогретая, перегретая;
- - по составу жидкости - одно- или многокомпонентная;
- - по роду или режиму кипения - пузырьковое или пленочное;
- - по типу конвекции - при свободной или при вынужденной;
- - по геометрии: в большом (неограниченном) или малом (ограниченном) объеме;
- - по расположению поверхности кипения: у вертикальной, наклонной или горизонтальной поверхности;
- - по изменению характеристик – стационарные или нестационарные условия;
- - по способу подвода теплоты – через стенку (постоянная температура, постоянный тепловой поток), внутренние источники теплоты, резкий или не очень сброс давления
- - по характеру – неразвитое, неустойчивое, развитое.

Стационарное поверхностное кипения в условиях подвода теплоты через поверхность нагрева

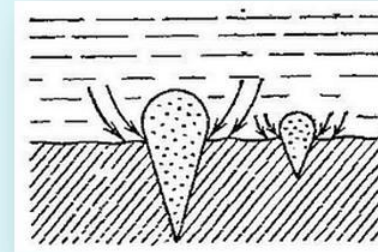
Тепловой пограничный слой – слой жидкости, прилегающий непосредственно к поверхности стенки, в пределах которого сосредоточено практически все изменение температуры жидкости: от температуры поверхности до температуры в ядре потока.

Тепловое ядро жидкости – вся остальная жидкость за пределами теплового пограничного слоя.



От конкретных условий теплообмена - перегрев жидкости $\Delta t \approx 5 \div 35 \text{ } ^\circ\text{C}$.

Паровые пузырьки зарождаются только в так называемых, центрах парообразования – микровпадинах (трещинах, кавернах и т.п.), в которых сила поверхностного натяжения жидкости и теплоотдачи в жидкость минимальна, а поверхность теплоподвода максимальна.

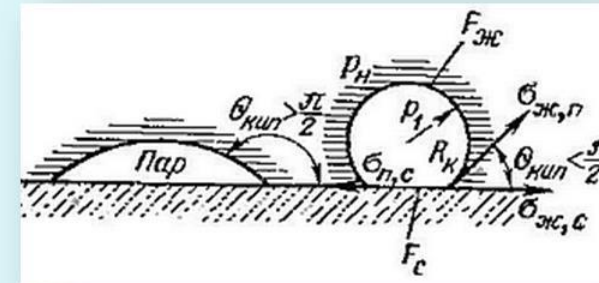


Условия отрыва – от смачиваемости поверхности и свойств жидкости.

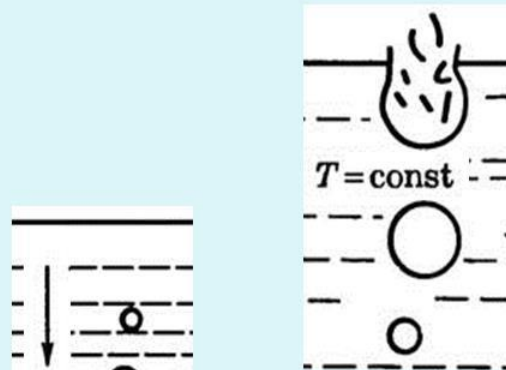
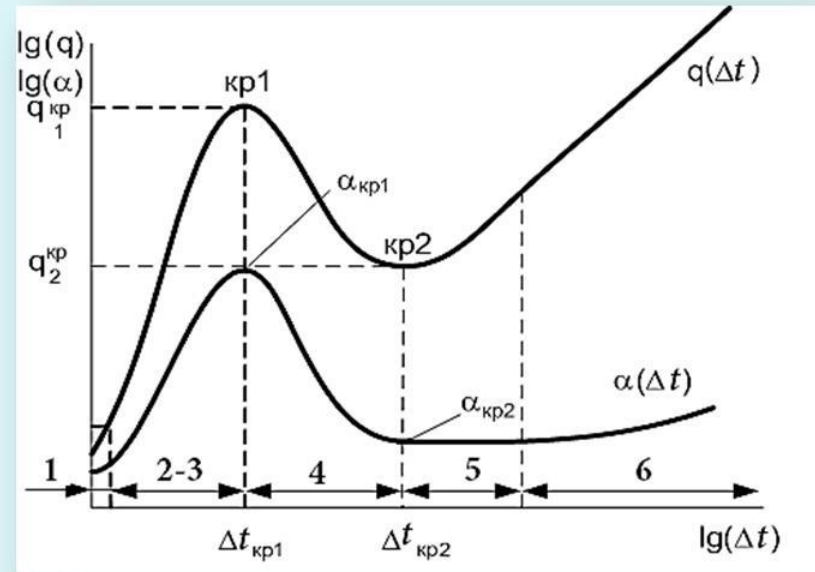
$$r_{кр} = \frac{2 \cdot \sigma}{\Delta p} \quad \Delta p = p_{п} - p_{с} = \frac{r \cdot p_{с} \cdot \Delta t}{R_{п} \cdot t_{с}^2}$$

r - теплота парообразования

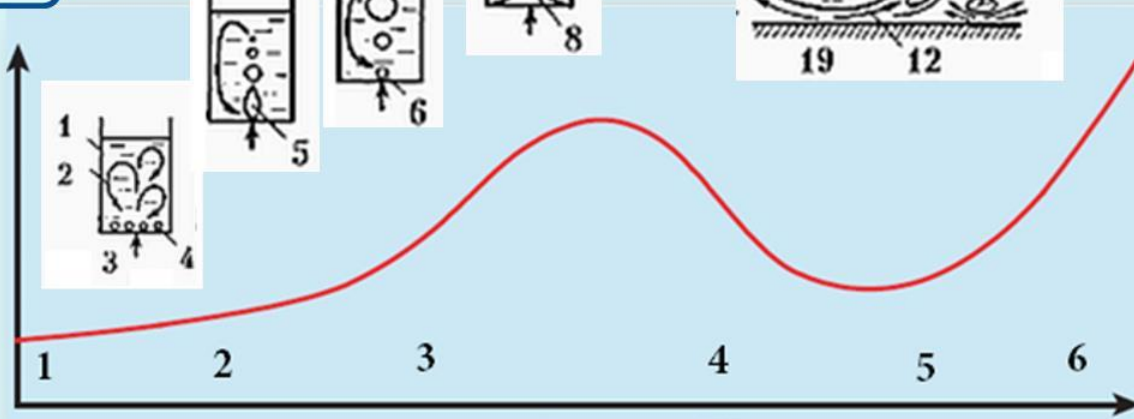
$R_{п}$ - удельная газовая постоянная



Режимы кипения в большом объеме (кривая кипения)



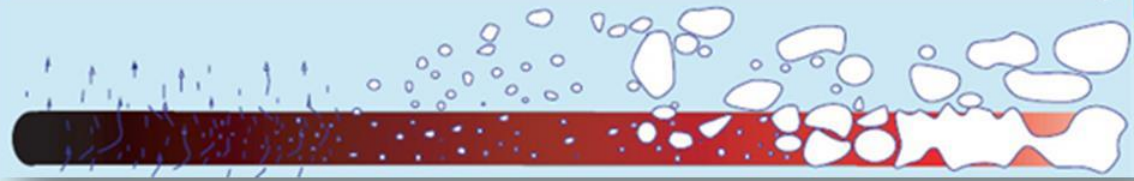
q



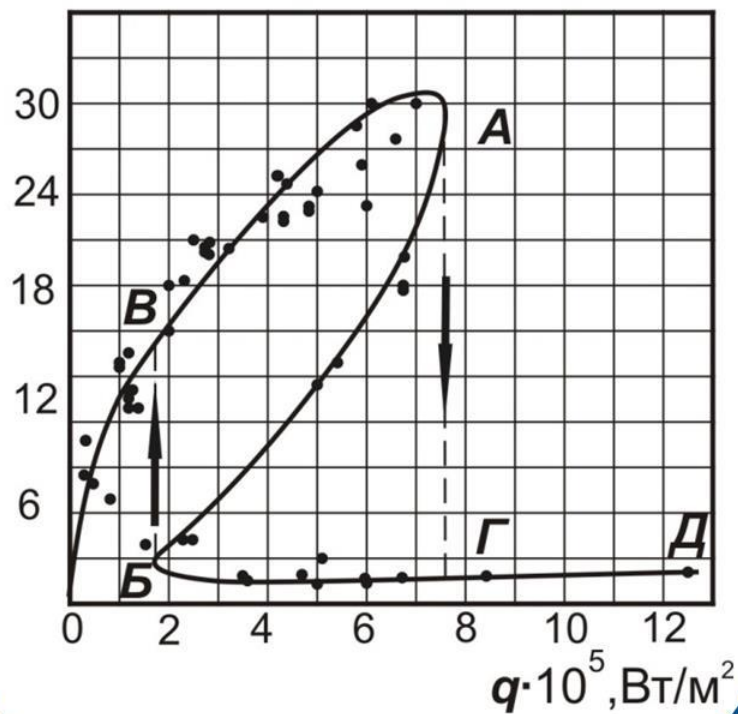
- 1 – конвективная область без кипения;
 $\alpha \sim t^n, n = 0 \div 0.33$
- 2-3 – область пузырькового кипения;
 $\alpha \sim t^n, n \approx 2$
- 4 – переходная область неустойчивого пленочного кипения;
- 5 – область пленочного кипения;
- 6 – участок пленочного кипения со значительной долей передачи тепла излучением;
 $\alpha \sim T_c^3$

Δt

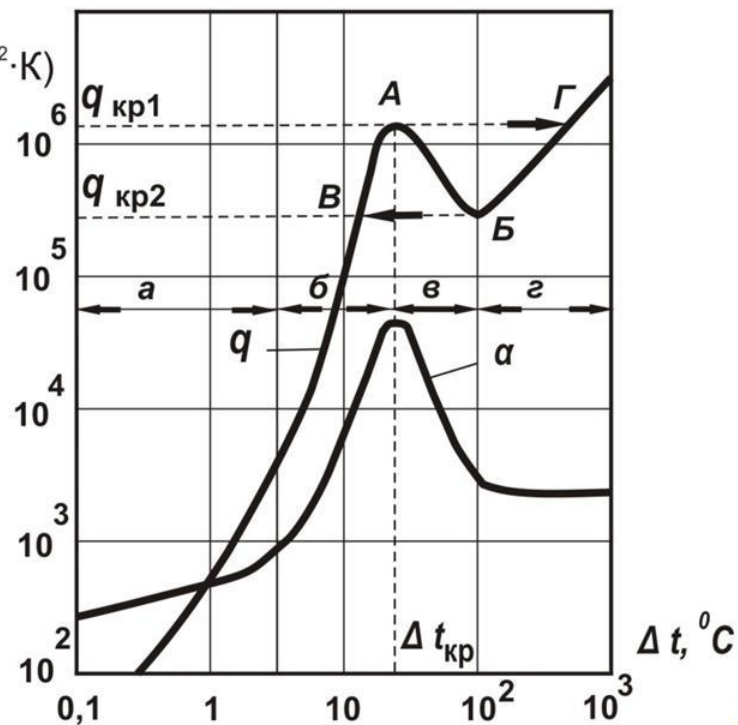
кр1, кр2 – соответственно точки первого и второго кризисов кипения



$\alpha \cdot 10^{-3}, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$

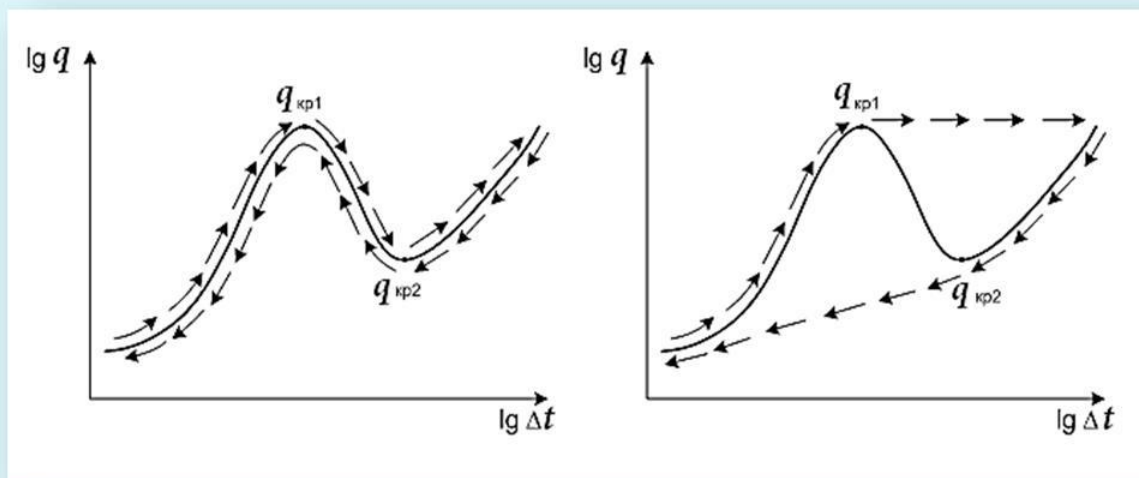


$q, \text{Вт}/\text{м}^2$
 $\alpha, \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$



В зависимости от граничных условий теплообмена на поверхности теплообмена переход от пузырькового режима к пленочному может происходить:

- следуя кривой кипения («паровой» нагрев - граничные условия I рода при регулируемой температуре стенки);
- скачкообразно («электрический» нагрев граничные условия II рода при регулируемом тепловом потоке).



Формула Кутателадзе С.С.

$$q_{кр1} = 0.14r \sqrt{\rho_{п}} \sqrt[4]{\sigma g (\rho_{ж} - \rho_{п})}$$

$$q = \frac{t_c - t_s}{\frac{\delta_{пс}}{\lambda_{пс}}}$$

При нормальном давлении:

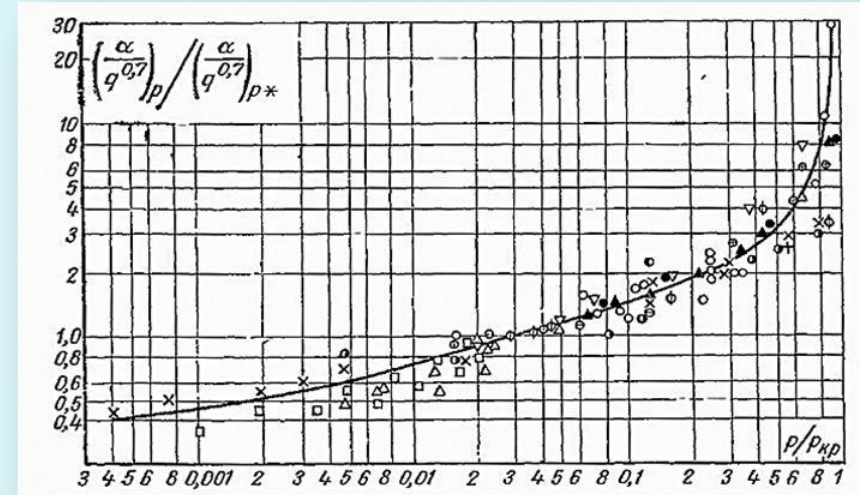
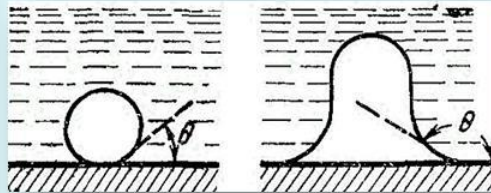
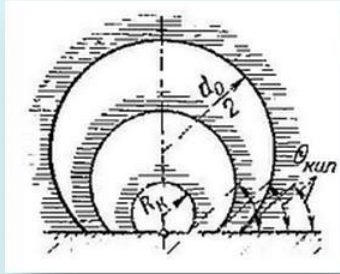
$$\delta_{пс} \approx 10 \text{ мкм}$$

$$\lambda_{пс} \approx 0.02 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda_{ж} \approx 0.68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$$

Пузырьковое кипение в большом объеме

Все основывается на экспериментальных фактах.



Теплоотдача при пузырьковом режиме:

- количеству действующих центров парообразования,
- частоте отрыва пузырей,
- скорости роста пузырей.

Первые два пропорциональны максимальному перегреву жидкости $\Delta t = t_c - t_s$ и давлению p_H , а

скорости роста пузырей определяется числом Якоби:
$$Ja = \frac{c_p \Delta t}{r} \frac{\rho_{ж}}{\rho_{п}}$$

Г.Н. Кружилин и впоследствии Д.А. Лабунцов рассмотрели пузырьковое кипение в большом объеме на горизонтальной обращенной вверх нагревающей несмачиваемой поверхности. Кружилин первым предложил описать явление безразмерными критериями, но использовал симплексы, Лабунцов подошел более строго физически и математически, при этом использовал симплексы.



Дмитрий Александрович Лабунцов – выдающийся российский ученый-теплофизик, док. т. н., проф. 1953 год – окончил МЭИ. Затем доцентом кафедры «Теоретические основы теплотехники». В 1959 – 1960 годы он преподает в Сталинобадском политехническом институте и одновременно исполняет обязанности заведующего кафедрой теплотехники. В 1960-1975 г. – ст.н.с ЭНИИ им.Г.М.Кржижановского. Стоял у истоков создания кафедры криогенной техники в МЭИ (1975 г.) Возглавлял ее 1975 – 1984 гг., а затем работал профессором на этой кафедре. С 1989 года – зав. лаб. Геотермальной энергетики ЭНИИ им. Г.М. Кржижановского. Один из создателей научный фундамент теплоэнергетики.

Занимался проблемами теплообмена, гидродинамики, термодинамики. Докторскую диссертация содержит целый комплекс теоретических моделей теплообмена при кипении и конденсации.

Д.А. Лабунцов свыше 20 лет являлся членом редакционной коллегии журнала «Теплоэнергетика», членом научных советов АН СССР, НТС Минэнерго СССР, был избран членом Научного совета

Международного Центра по тепло - и массообмену.

$$\text{Nu}_* = C \text{Re}_*^n \text{Pr}_*^{1/3}$$
$$\text{Re}_* \leq 0,01 \quad C = 0.0625, \quad n = 0.5;$$
$$\text{Re}_* > 0,01 \quad C = 0.125, \quad n = 0.65;$$
$$\text{Re}_* = 10^{-5} \div 10^{+4}, \quad \text{Pr}_* = 0.86 \div 7.6$$

$$\text{Nu}_* = \frac{\alpha \cdot l_*}{\lambda_{\text{ж}}}, \quad l_* = \frac{\sigma \rho_{\text{ж}} c_{p\text{ж}} T_s}{(r \rho_{\text{n}})^2}, \quad \text{Re}_* = \frac{w_* l_*}{v_{\text{ж}}}, \quad w_* = \frac{q_c}{r \cdot \rho_{\text{n}}}$$

w_* - скорость парообразования

q_c - плотность теплового потока

Параметры берутся при температуре насыщения для соответствующего давления жидкости.

Полуэмпирическая зависимость (погрешность может достигать 35%).

$$\alpha = 0.075 \left[1 + 10 \left(\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}} \right)^{2/3} \right] \left(\frac{\lambda_{\text{ж}}^2}{v_{\text{ж}} \sigma_{\text{ж}} T_{\text{s}}} \right)^{1/3} q_{\text{с}}^{2/3}$$

$$q_{\text{нк}} \leq q_{\text{с}} \leq q_{\text{кр1}} \quad 0.005 \leq \frac{p}{p_{\text{к}}} \leq 0.8$$

$q_{\text{с}}$ – плотность теплового потока, Вт/м²

Для воды:

$$\alpha = \frac{3.4 p_{\text{s}}^{0.18}}{1 - 0.0045 \cdot p_{\text{s}}} q_{\text{с}}^{2/3}, \quad p_{\text{s}} - \text{в бар}$$

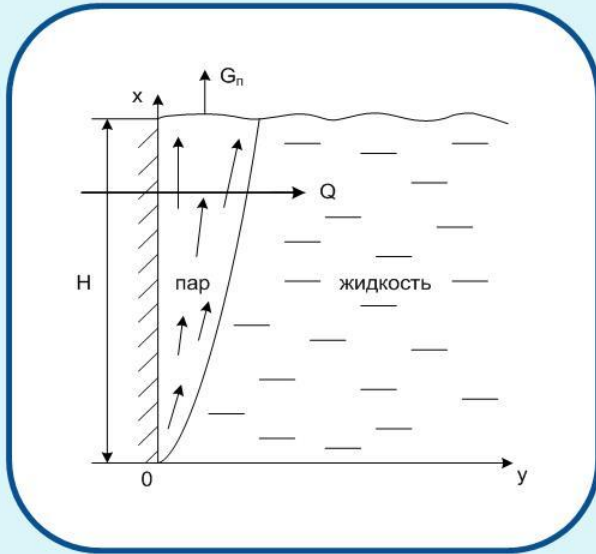
Михеев М.А. для пузырькового режима кипения и диапазона давлений $p = 0.2 \div 80$ бар для практических расчетов предложил простые формулы:

$$\alpha = 3.0 \cdot q_{\text{с}}^{0.7} \cdot p_{\text{s}}^{0.15}$$

$$\alpha = 38.7 \cdot \Delta t^{2.33} \cdot p_{\text{s}}^{0.5}$$

p_{s} – в бар

Пленочное кипение в большом объеме



Из рисунка видно, что наблюдается аналогия процессов конденсации и пленочного кипения.

Поэтому формулы для расчета коэффициента теплоотдачи при пленочном кипении имеют вид:

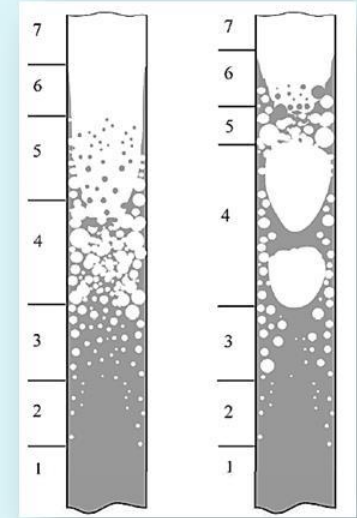
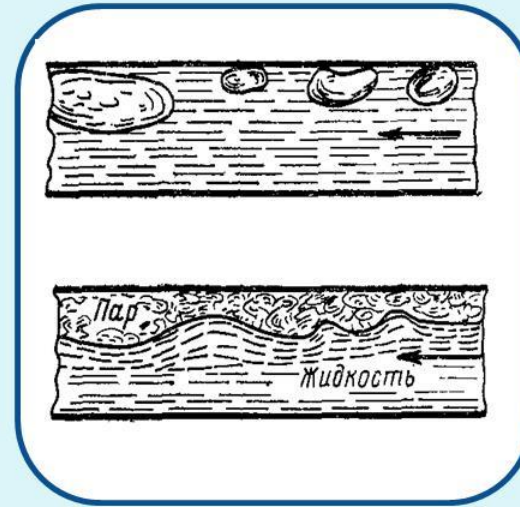
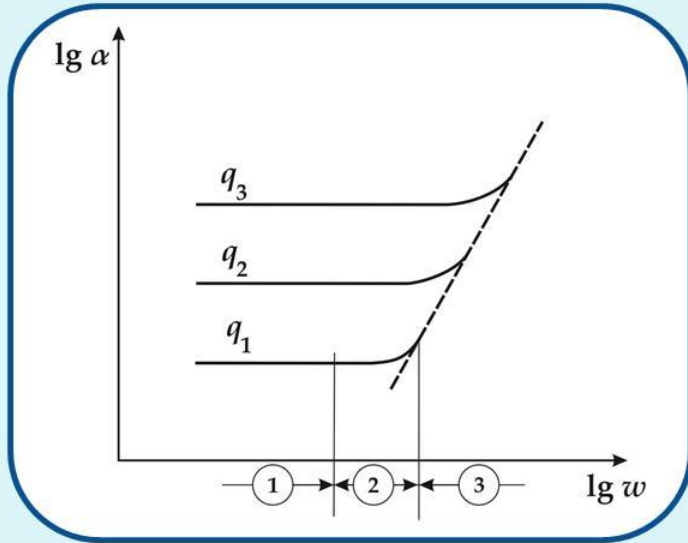
— кипение на вертикальной поверхности:

$$\alpha = 0.943 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \lambda_{\text{п}}^3}{\mu_{\text{п}} \cdot \Delta t \cdot H}}$$

— кипение на горизонтальной трубе:

$$\alpha = 0.728 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot r \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}}) \cdot \lambda_{\text{п}}^3}{\mu_{\text{п}} \cdot \Delta t \cdot d_{\text{тр}}}}$$

Расчет теплоотдачи при кипении в трубах и каналах



Методика расчета коэффициента теплоотдачи при кипении и движении двухфазных потоков в трубах и каналах заключается в следующем. На первом этапе расчета находят коэффициент теплоотдачи при кипении в большом объеме по формуле

$$\alpha_q = 3.0 \cdot q_c^{0.7} \cdot p_s^{0.15}$$

$$\alpha_q = 38.7 \cdot \Delta t^{2.33} \cdot p_s^{0.5}$$

$$\frac{\alpha_w d}{\lambda_{ж}} = \overline{Nu}_{\text{жд}} = 0.021 \cdot Re_{\text{жд}}^{0.8} \cdot Pr_{\text{ж}}^{0.43} \cdot \varepsilon_t$$

$$\alpha = \alpha_q \quad \alpha_q / \alpha_w > 2$$

$$\alpha = \alpha_w \quad \alpha_q / \alpha_w < 0.5$$

$$\alpha = \alpha_w \frac{4 \cdot \alpha_w + \alpha_q}{5 \cdot \alpha_w - \alpha_q} \quad 0.5 < \alpha_q / \alpha_w < 2$$

Физические свойства воды на линии насыщения

t °C	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^8$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	$\beta\cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma\cdot 10^4$ Н/м	Pr
10	0,0123	999,7	41,99	4,193	0,586	14,0	1299,2	1,300	0,70	744	9,3
20	0,0234	998,3	83,86	4,182	0,602	14,4	1001,5	1,003	1,82	729	6,96
30	0,0424	995,8	125,66	4,179	0,617	14,8	797,0	0,800	3,21	712	5,40
40	0,0737	992,3	167,45	4,179	0,630	15,2	651,3	0,656	3,87	695	4,32
50	0,123	988,0	209,26	4,181	0,643	15,6	544,0	0,551	4,49	678	3,54
60	0,199	983,2	251,09	4,185	0,653	15,9	463,0	0,471	5,11	661	2,97
70	0,312	977,7	292,97	4,190	0,662	16,2	400,5	0,410	5,70	644	2,54
80	0,474	971,6	334,92	4,197	0,669	16,4	351,0	0,361	6,32	627	2,20
90	0,701	965,2	376,94	4,205	0,675	16,6	311,3	0,322	6,95	609	1,94
100	1,013	958,1	419,06	4,216	0,680	16,8	279,0	0,291	7,52	590	1,73
110	1,433	950,7	461,3	4,229	0,683	17,0	252,2	0,265	8,08	570	1,56
120	1,985	942,7	503,7	4,245	0,685	17,1	230,0	0,244	8,64	550	1,43
130	2,701	934,6	546,3	4,263	0,687	17,2	211,0	0,226	9,19	529	1,31
140	3,614	925,8	589,1	4,285	0,687	17,3	195,0	0,211	9,72	508	1,22
150	4,760	916,8	632,2	4,310	0,686	17,4	181,0	0,197	10,3	487	1,14
160	6,180	907,3	675,5	4,339	0,684	17,4	169,0	0,186	10,7	466	1,07
170	7,920	897,3	719,1	4,371	0,681	17,4	158,5	0,177	11,3	444	1,02
180	10,03	886,9	763,1	4,408	0,676	17,3	149,3	0,168	11,9	422	0,97
190	12,55	876,0	807,5	4,449	0,671	17,2	141,2	0,161	12,6	400	0,94
200	15,55	864,7	852,4	4,497	0,664	17,1	133,8	0,155	13,3	378	0,91

$t, ^\circ\text{C}$	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	r $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	$\lambda\cdot 10^2$ $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^6$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	Pr
10	0,0123	0,00934	2519,4	2477,4	1,868	1,82	1043	8,45	904,7	0,87
20	0,0234	0,0173	2537,7	2453,8	1,874	1,88	579,9	8,85	511,6	0,88
30	0,0424	0,0304	2555,9	2430,2	1,883	1,94	338,9	9,26	304,6	0,90
40	0,0737	0,0512	2574,0	2406,5	1,894	2,01	207,3	9,66	188,7	0,91
50	0,123	0,0830	2591,8	2382,5	1,907	2,09	132,0	10,0	120,5	0,92
60	0,199	0,130	2609,5	2358,4	1,924	2,16	86,36	10,5	80,77	0,94
70	0,312	0,198	2626,8	2333,8	1,944	2,23	57,94	10,9	55,05	0,95
80	0,474	0,293	2643,8	2643,8	1,969	2,31	40,04	11,3	38,57	0,96
90	0,701	0,423	2660,3	2660,3	1,999	2,39	28,26	11,7	27,66	0,98
100	1,013	0,598	2676,3	2257,2	2,034	2,48	20,39	12,1	20,23	0,99
110	1,433	0,826	2691,8	2230,5	2,075	2,58	15,05	12,4	15,01	1,00
120	1,985	1,121	2706,6	2202,9	2,124	2,67	11,21	12,8	11,42	1,02
130	2,701	1,496	2720,7	2174,4	2,180	2,78	8,524	13,2	8,82	1,04
140	3,614	1,966	2734,0	2144,9	2,245	2,88	6,525	13,5	6,87	1,05
150	4,760	2,547	2746,3	2114,1	2,320	3,00	5,077	13,9	5,46	1,08
160	6,180	3,259	2757,7	2082,2	2,406	3,13	3,992	14,2	4,36	1,09
170	7,920	4,122	2768,0	2048,9	2,504	3,26	3,158	14,6	3,54	1,12
180	10,03	5,160	2777,1	2014,0	2,615	3,41	2,527	14,9	2,89	1,14
190	12,55	6,398	2784,9	1977,4	2,741	3,57	2,036	15,3	2,39	1,17
200	15,55	7,865	2791,4	1939,0	2,883	3,75	1,654	15,6	1,98	1,20