

Парогенераторы АЭС

Тема. **Теплообмен при кипении**

Основные вопросы

- Классификация режимов кипения.
- Определение границ участков с характерными условиями теплообмена.
- Рекомендации по расчету КТО.

Процесс кипения характерен только для второго контура ПГ АЭС

Кипящие экономайзеры и испарители

Вид конкретной схемы ПГ и его параметры определяют условия гидродинамики и структуру двухфазных потоков

в испарителях прямоточных ПГ кипение происходит при вынужденном движении с высокими скоростями

в испарителях с естественной циркуляцией кипение происходит при безнапорном движении с небольшими скоростями

Кипение классифицируют

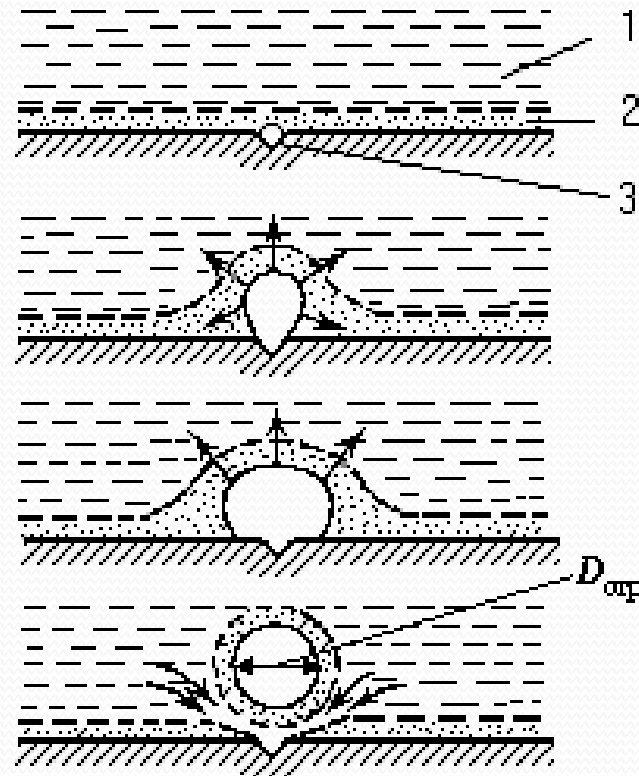
- **по месту** (в трубах, в МТП)
- **по характеру движения среды** (при вынужденном движении среды, при естественной циркуляции);
- **по режиму** (пузырьковый, пленочный)

Механизм возникновения парового пузыря на поверхности

Для возникновения парового пузыря необходим некоторый **перегрев жидкости** выше температуры насыщения, который зависит от чистоты жидкости и наличия центров парообразования.

У поверхности, от которой к жидкости подводится теплота, перегрев жидкости максимален, центрами парообразования служат неровности поверхности (впадины)

Механизм возникновения парового пузыря на поверхности



Причины повышения интенсивности теплообмена при кипении

- Во-первых, сильная турбулизация пограничного слоя за счет роста и отрыва паровых пузырей.
- Во-вторых, перенос в паровой пузырь теплоты от поверхности при испарении микроскопического слоя жидкости у основания пузыря.
- В-третьих, перенос скрытой теплоты парообразования внутри пузыря.

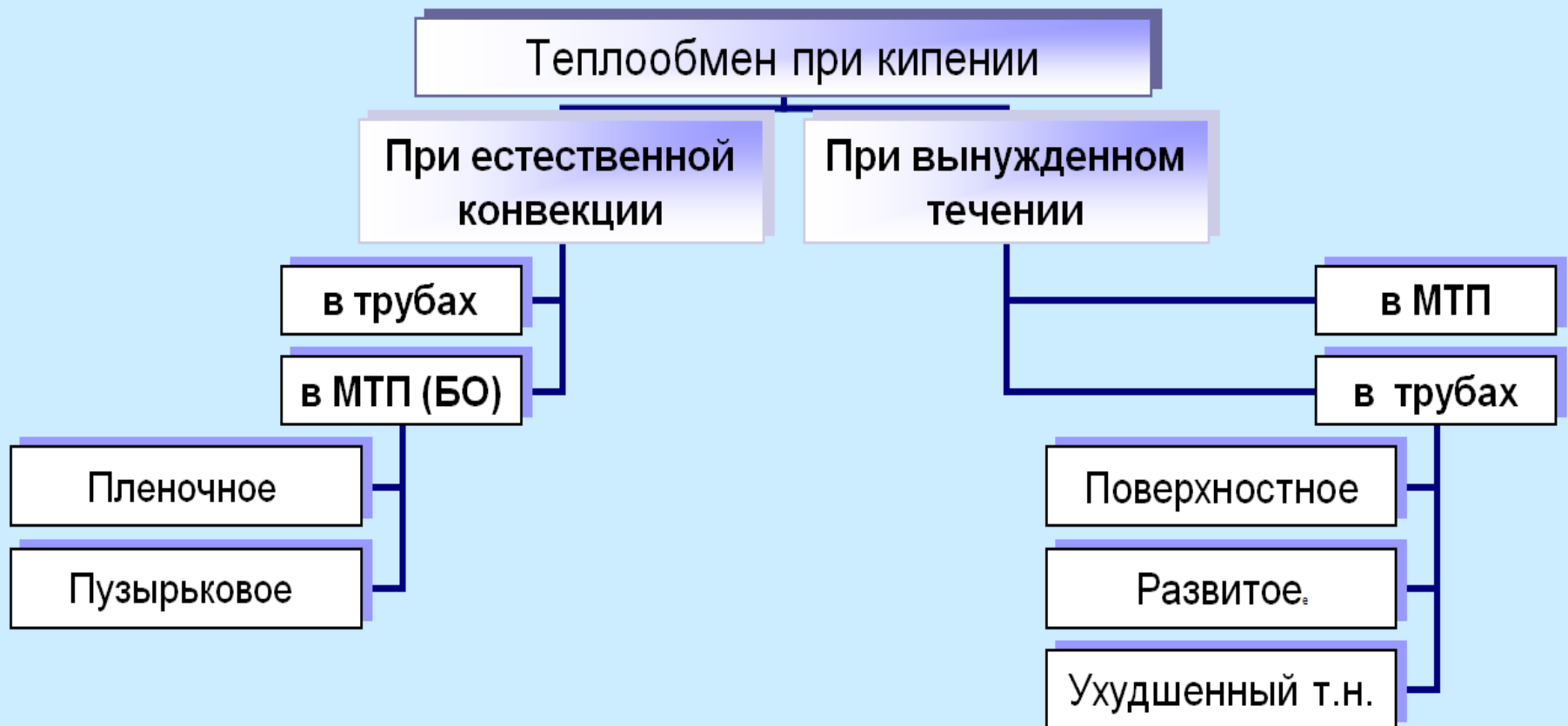
Пузырьковый режим кипения

- может иметь место **при разных структурах потока** (пузырьковая, дисперсно-кольцевая и др.);
- характеризуется **высоким значением КТО** и постоянством температуры стенки

Пленочный режим кипения

- имеет место при образовании **сплошной пленки пара** на теплообменной поверхности;
- характеризуется резким **повышением температуры стенки**

Алгоритм выбора формулы для КТО при двухфазном потоке



Кипение в МТП (в большом объеме)

Расчет КТО при кипении в большом объеме

Формула ЦКТИ

$$\alpha_{\text{ГО}} = 4,34 \cdot q^{0,7} \cdot \left(p^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} \cdot p^2 \right)$$

Формула ОКБ “Гидропресс”

$$\alpha_{\text{ГО}} = 3,07 \cdot q^{0,72} \cdot \left(p^{0,14} + 1,37 \cdot 10^{-2} \cdot p^2 \right) \left[0,49 + 0,55 \cdot (1+x) \right]$$

Условия применения $0,09 < \omega_0 < 0,55 \text{ м/с}$; $0 < q < 290 \text{ кВт/м}^2$;
 $2,2 < p < 6,4 \text{ МПа}$.

Расчет КТО при кипении в большом объеме

Формула Кузьмина А.В.

$$\alpha_{\text{БО}} = 5,728 \cdot p^{0.2} \cdot q^{0.67} \text{ при } 0,1 \leq p \leq 3 \text{ МПа};$$

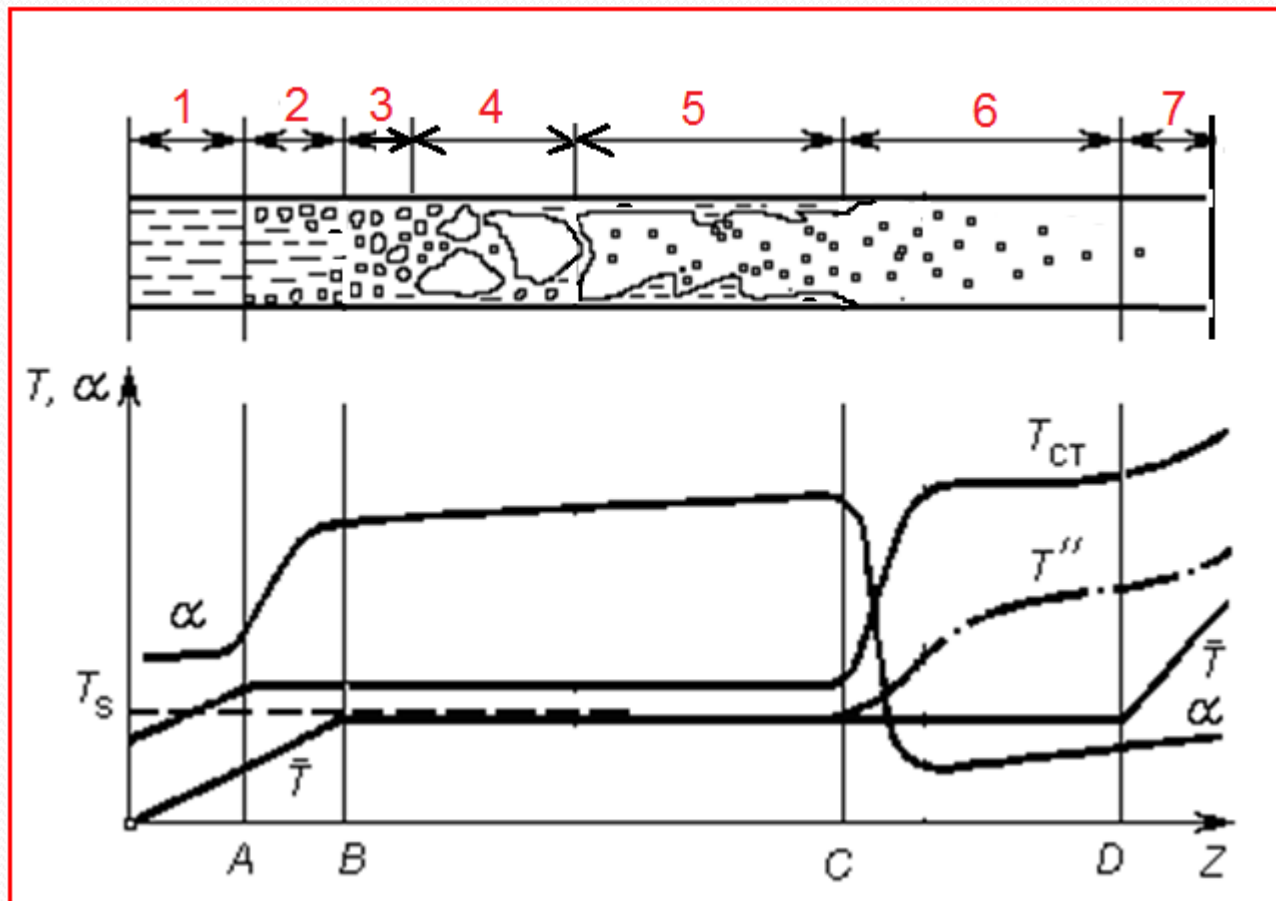
$$\alpha_{\text{БО}} = 3,195 \cdot p^{0.75} \cdot q^{0.67} \text{ при } 3 < p \leq 20 \text{ МПа.}$$

Кипение в трубах

Кипение в трубах

1. При вынужденном движении.
2. При естественной конвекции

Режимы течения двухфазной смеси и характерные участки теплообмена



Характерные режимы **течения**

1 – однофазный поток (некипящая вода);

2...6 – двухфазный поток:

2, 3 – пузырьковая структура потока;

4 – снарядный (пробковый) режим;

5 – дисперсно-кольцевой режим;

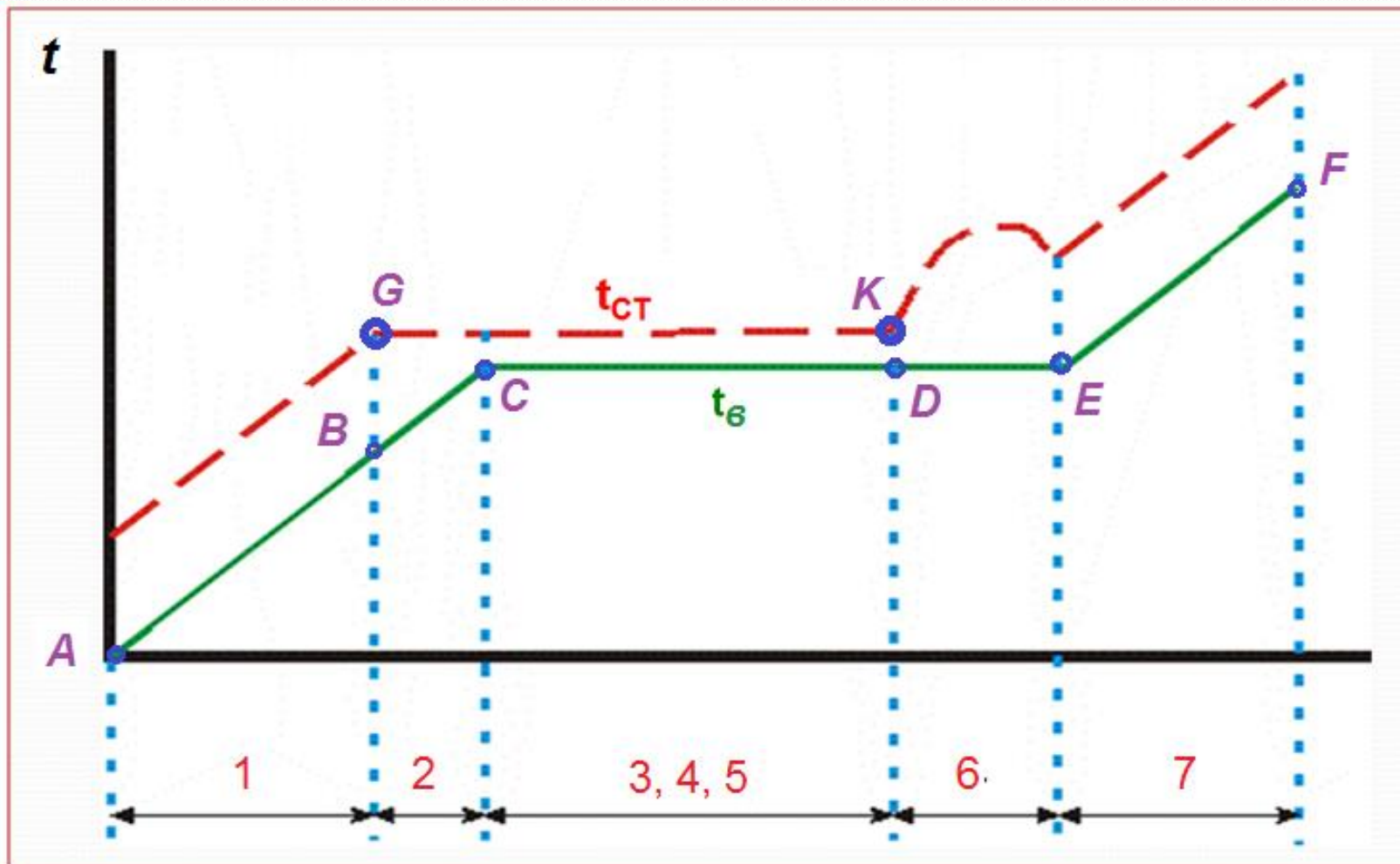
6 – дисперсный;

7 – однофазный поток (перегретый пар)

Характерные участки **теплообмена**

- 1 (**A-B**) – конвективный теплообмен (некипящая вода);
- 2 (**B-C**) – участок поверхностного кипения;
- 3...5 (**C-D**) – участок пузырькового (развитого кипения);
- 6 (**D-E**) – участок ухудшенного теплообмена
- 7 (**E-F**) – конвективный теплообмен (перегретый пар)

Типы характерных участков теплообмена



Определение границ участков с характерными условиями теплообмена

- начало участка *поверхностного* кипения, т. В;
- начало участка *ухудшенного* теплообмена, т. D

Начало участка поверхностного кипения

При достижении температурой стенки, омываемой потоком воды, некоторого значения, превышающего температуру насыщения на определенную величину Δt_{HK} на поверхности имеет место образование пузырьков пара - процесс кипения.

Этот перегрев Δt_{HK} зависит от:

- параметров потока (скорости, температуры, давления);
- материала и состояния поверхности (шероховатость);
- наличия растворенных или взвешенных примесей.

Для чистых, смачивающих поверхность жидкостей из предложена зависимость

$$\Delta t_{HK} = (t_{cm} - t_s)_{HK} = \left(\frac{8 \cdot \sigma \cdot q \cdot T_s}{\lambda \cdot r \cdot \rho''} \right) \quad (1)$$

Эта формула дает нижнюю границу перегревов, необходимых для начала кипения.

Начало участка поверхностного кипения

Удобно определять границу начала пузырькового кипения не через температуру поверхности t_{cm} (эта величина заранее неизвестна), а в виде зависимости **между**

недогревом до t_s



$$(t_s - t_e)_{HK} = f(q)$$

плотностью теплового потока q



$$q_{HK} = f(t_s - t_e)$$

Существует множество рекомендаций, которые можно разделить на две группы.

Начало участка поверхностного кипения

К **первой** группе относятся соотношения, полученные совместным решением уравнения (1) или его модификации с уравнением конвективного теплообмена

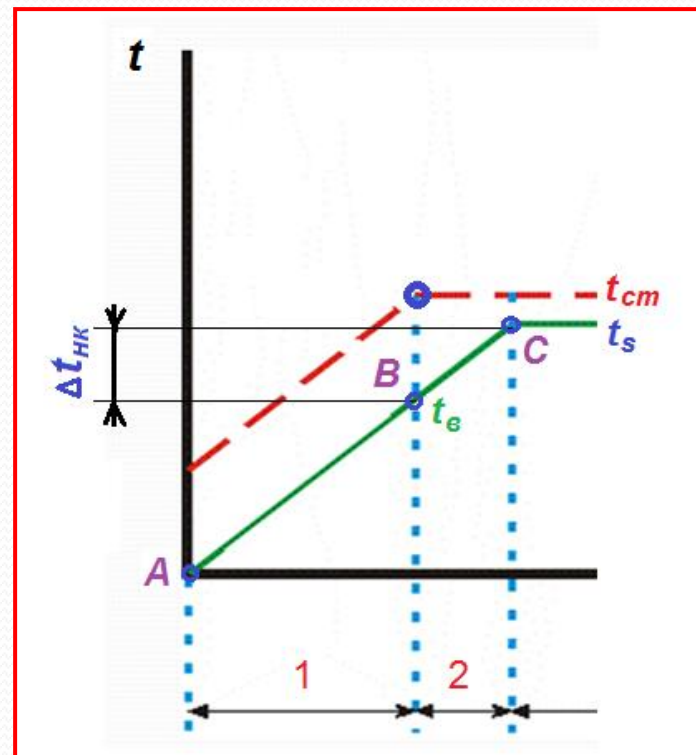
$$\Delta t_{HK} = (t_{cm} - t_s)_{HK} = \left(\frac{8 \cdot \sigma \cdot q \cdot T_s}{\lambda \cdot r \cdot \rho''} \right)$$

$$q = \alpha_{конв} (t_{cm} - t_s)$$

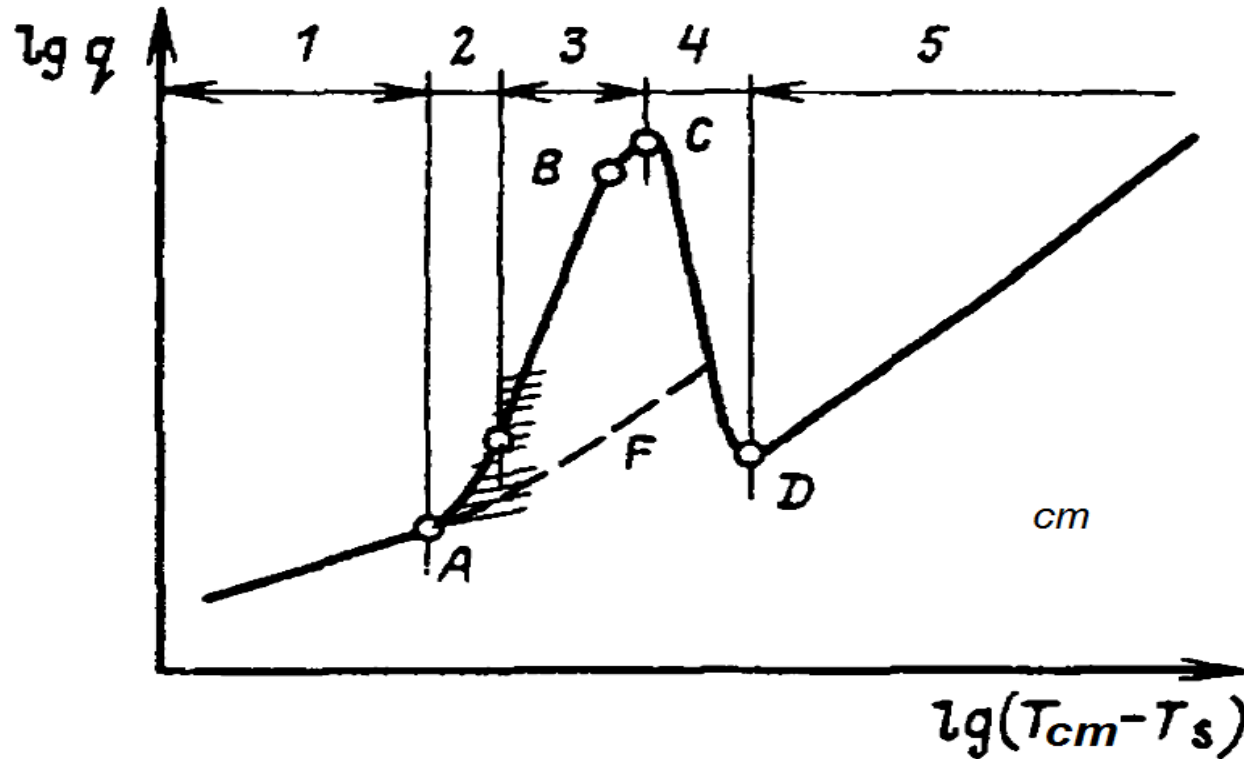
В результате получают

$$q_{HK} = \alpha_{конв} \left[(t_s - t_s) + \Delta t_{HK} \right]$$

$$(t_s - t_s)_{HK} = \frac{q}{\alpha_{конв}} - \Delta t_{HK}$$



Начало участка поверхностного кипения



Ко **второй** группе относятся рекомендации, использующие факт **плавного** изменения коэффициентов теплообмена при переходе от конвекции к поверхностному кипению

Начало участка поверхностного кипения (т. А)

$$q = \alpha_{\text{конв}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}})$$

$$q = \alpha_{\text{рк}} \cdot (t_{\text{ст}} - t_{\text{в}})$$

$$\Delta t_{\text{нк}} = t_s - t_{\text{ж}} = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{конв}} - \alpha_{\text{рк}}} \right)$$

$$\Delta t_{\text{нк}} = t_s - t_{\text{в}} = q \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{конв}} - \alpha_{\text{рк}}} + R_{\text{отл}} \right)$$

Начало участка поверхностного кипения

Другие выражения для определения границы зоны поверхностного кипения.

Поверхностное кипение, характеризуемое постоянством температуры кипящей среды по длине канала, начинается при достижении определенной величины теплосодержания потока

$$\Delta h_{нк} = h' - h_{нк} = 0,3 \cdot q^{1,1} \cdot d_{Г}^{0,2} \cdot (\rho \omega)^{-0,9} \cdot (\rho''/\rho')^{0,3}$$

где h - в кДж/кг; q - плотность теплового потока, Вт/м²; d - диаметр канала, м; p - давление, МПа; $\rho \omega$ - массовая скорость, кг/(м²·с).

Начало участка поверхностного кипения

Начало поверхностного кипения в узких кольцевых каналах наступает при

$$\Delta t_{нк} = \frac{20,7 \cdot q \cdot p^{0,43} \cdot d_e^{0,23}}{w_0}$$

где q - в МВт/м²; p - в МПа;

d_e - гидравлический диаметр канала, м; w_0 - скорость циркуляции, м/с

Начало участка ухудшенного теплообмена

$$x_{zp} = 1 - 0,86 \cdot \exp \left[- \frac{19}{(\rho\omega) \cdot \sqrt{d_{\Gamma}} / (\rho' \cdot \sigma)} \right]$$

$$x_{zp} = \left(\frac{8 \cdot 10^{-3}}{d_{\Gamma}} \right)^{0,15} \cdot \left[0,39 + 1,6 \cdot p - 2,12 \cdot p^2 + 0,72 \cdot p^3 \right] \cdot \left(\frac{\rho\omega}{10^3} \right)^{-0,5}$$

Примечание. В последней формуле давление в **бар**.

Теплообмен при вынужденном движении кипящей воды в трубах

- Наряду с недогревом и тепловой нагрузкой необходимо учитывать влияние **скоростных характеристик** потока на процесс кипения;
- при **больших паросодержаниях** необходимо также учитывать **возрастание** скорости потока из-за изменения его структуры;
- в **закризисной** зоне (на участке ухудшенного теплообмена) дополнительно учитывают тепломассообмен **на поверхности канала** (на обогреваемой стенке трубы)

КТО при вынужденном движении воды в каналах (*участок поверхностного кипения*)

$$\alpha/\alpha_{\bar{\alpha}} = \left\{ 1 + \left[\alpha_{\bar{\alpha}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{конв}}} - \frac{t_S - \bar{t}_B}{q} \right) \right]^{-3/2} \right\}^{2/3}$$

КТО при вынужденном движении воды в каналах (*зона развитого кипения*)

Формула Дженсена

$$\alpha_{тр} = \sqrt{\alpha_{конв}^2 + (0,7 \cdot \alpha_{бo})^2}$$

Формула ЦКТИ

$$\alpha_{рк} = \sqrt{\alpha_{конв} + 0,5 \cdot \alpha_{бo}^2 \cdot \left[1 + 7 \cdot 10^{-9} \cdot \left(\frac{r \cdot \omega_{см} \cdot \rho'}{q} \right)^{1,5} \right]}$$

$$\omega_{см} = \rho \omega \cdot \left(\frac{x}{\rho''} + \frac{1-x}{\rho'} \right)$$

КТО при вынужденном движении воды в каналах (*зона ухудшенного теплообмена*)

Формула Миропольского

$$Nu = 0,023 \cdot \left\{ Re'' \cdot Pr_{cm} \cdot \left[x + \frac{\rho''}{\rho'} \cdot (1-x) \right] \right\}^{0,8} \cdot Y;$$

$$Y = 1 - 0,1 \cdot \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right)^{0,4} \cdot (1-x)^{0,4};$$

$$Nu'' = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda''}; \quad Re'' = \frac{\rho \omega \cdot d}{\mu''}$$

$$x = \frac{x_{zp} + 1}{2}$$

КТО при движении перегретого пара в каналах (*конвективный участок*)

С увеличением температуры стенки коэффициент теплоотдачи снижается в основном из-за уменьшения теплоемкости c_p и числа Прандтля в пристенном слое.

Для расчета теплоотдачи в прямых трубах используется формула

$$Nu_n = 0,028 Re_n^{0,8} Pr_n^{0,4} \left(\frac{\rho_{ст}}{\rho_n} \right)^{1,15}$$

где «п» - относящийся к пару;

«ст» - относящийся к стенке;

Структура расчетных выражений для КТО (для рабочего тела)

| № п/п | Название зоны (участка) | Общий вид уравнения для коэффициента теплоотдачи | Область существования |
|-------|--|--|---------------------------|
| 1 | экономайзер (однофазная конвекция жидкости) | $\alpha_{конв} = f(Re, Pr)$ | $t_{СТ} < t_{н.к}$ |
| 2 | зона кипения <u>недогретой</u> до t_s жидкости (поверхностное кипение) | $\alpha_{н.к} = f(\alpha_{конв}, \alpha_{бo} \text{ или } \alpha_{p.к}, t_b - t_{СТ})$ | $t_{СТ} > t_{н.к}; x < 0$ |
| 3 | зона кипения парожидкостной смеси (развитое кипение) | $\alpha_{p.к} = f(p, \rho_w, x, \alpha_{конв}, \alpha_{бo})$ | $0 \leq x < x_{зр}$ |
| 4 | зона ухудшенного теплообмена | $\alpha_{ум} = f(p, \rho_w, x, x_{зр}, t_{СТ})$ | $x_{зр} \leq x \leq 1$ |
| 5 | зона перегрева (однофазная конвекция пара) | $\alpha_{конв} = f(Re, Pr, t_{СТ})$ | $x > 1$ |

Кризис теплообмена

Кризисом теплообмена при кипении называют явление резкого ухудшения теплообмена на теплопередающей поверхности, ведущее к быстрому возрастанию ее температуры.

Максимальный тепловой поток, имеющий место непосредственно перед кризисом теплообмена называют **критическим тепловым потоком**.

Механизм возникновения кризиса

- Кризис изучается уже 40-50 лет.
- Главный вывод – кризис теплообмена связан с режимом течения в канале

Основные режимы течения (по мере роста x)

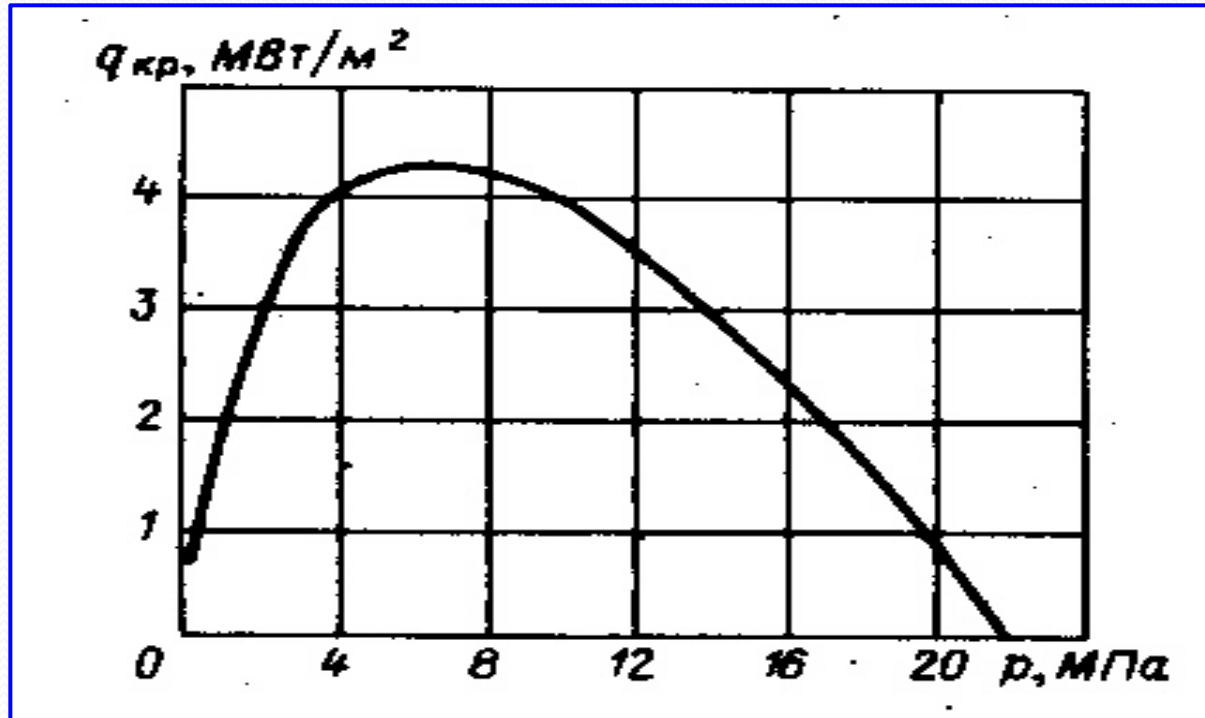
- Пузырьковый.
- Снарядный (пробковый).
- Дисперсно-кольцевой.
- Дисперсный.

Закризисные режимы: пленочный (обращенный дисперсно-кольцевой) и дисперсный.

Типы кризисов теплообмена

- Кризис теплообмена в большом объеме.
- Кризис теплообмена при вынужденном течении.

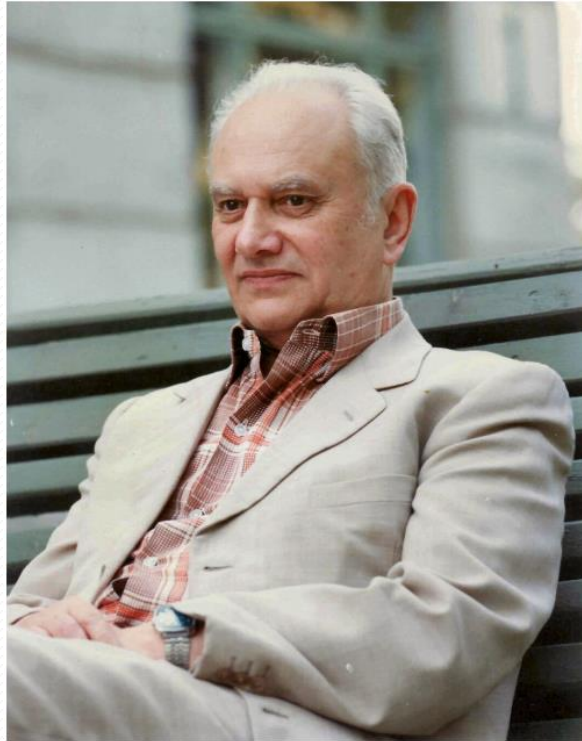
Кризис теплообмена в большом объеме



Формула С.С.Кутателадзе

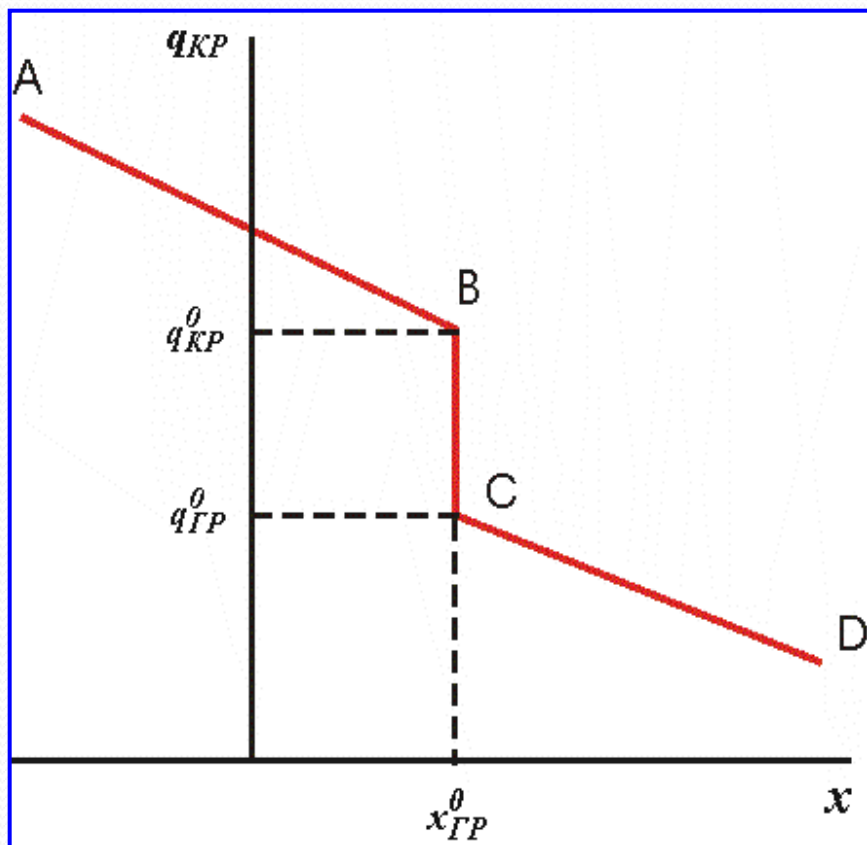
$$q_{кр} = 0,14 \cdot r \cdot \sqrt{g \cdot \rho''} \cdot \sqrt[4]{\sigma \cdot (\rho' - \rho'')}$$

Кутателадзе С.С.



31.07.1914 -21.03.1986

Кризис теплообмена при вынужденном течении теплоносителя



Участок AB — кризис теплообмена 1-го рода.
Линия BC — кризис теплообмена 2-го рода.
Линия CD — кризис орошения

Кризис теплообмена 1-го рода

Режим ухудшения теплоотдачи при котором на поверхности трубок образуется паровая пленка, т.е. при переходе от пузырькового кипения к пленочному, называется *кризисом теплообмена первого рода*.

Характерной величиной для этого кризиса является *критический тепловой поток*.

Факторы, определяющие величину $Q_{кр}$

- Паросодержание (относительная энтальпия).
- Массовая скорость $\rho\omega$.
- Давление.
- Форма и размеры поверхности теплообмена.

Методы расчета кризиса теплообмена 1-го рода (*критический поток*)

Пучки гладких стержней

$$q_{KP} = 0,65 \cdot (\rho\omega)^{0,2} \cdot (1-x)^{1,2} \cdot (1,3 - 4,36 \cdot 10^{-2} \cdot p) \pm 20\%$$

$$p = 3 \dots 10 \text{ МПа}; \quad \rho\omega = 380 \dots 4000 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с}); \quad x = -0,2 \dots 0,25;$$

$$d = 5 \dots 14 \text{ мм}; \quad s - d = 1,7 \dots 4,6 \text{ мм}$$

Методы расчета кризиса теплообмена 1-го рода

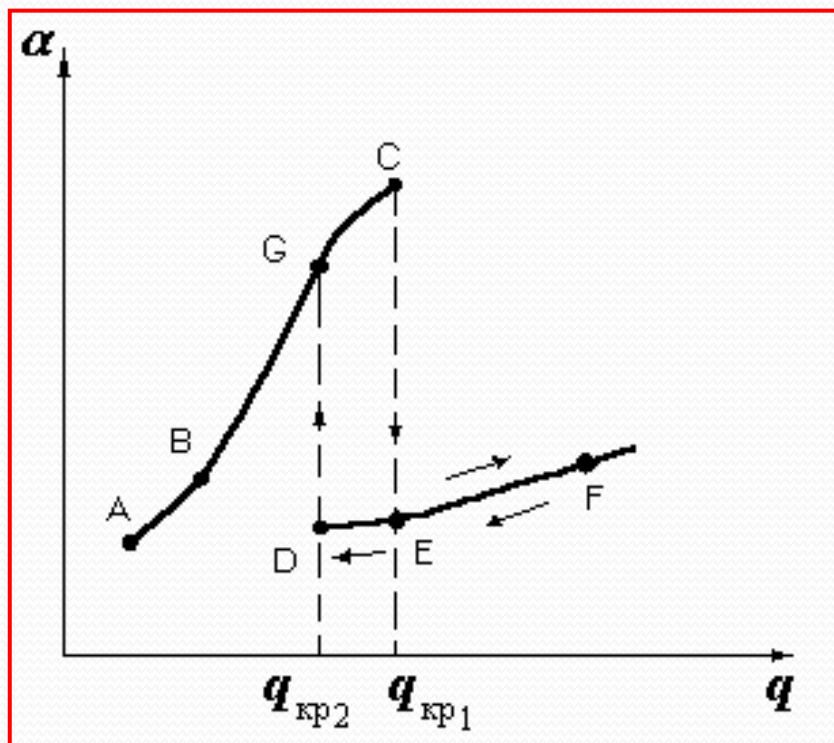
- Все вышеприведенные формулы – эмпирические.
- Выражения получены для равномерно обогреваемых стержней.

Кризис теплообмена 2-го рода

Режим ухудшения теплоотдачи из-за разрушения жидкой пленки при переходе от дисперсно-кольцевого режима течения к дисперсному называется *кризисом теплообмена второго рода*.

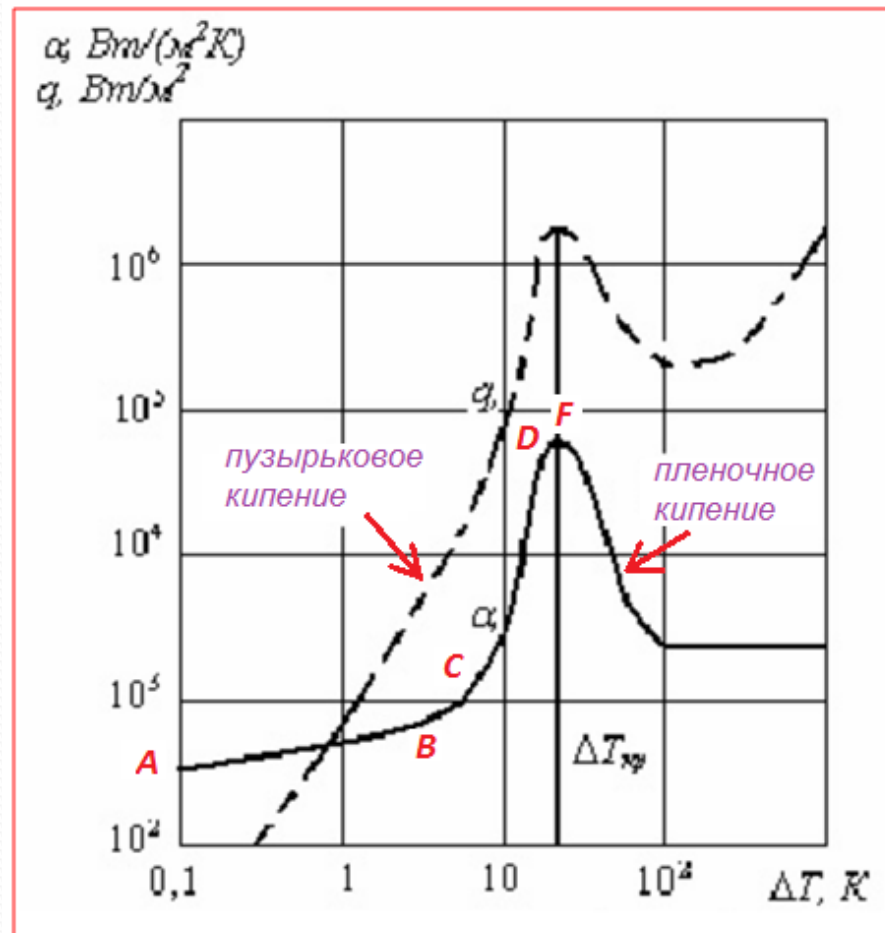
Характерной величиной для этого кризиса является *граничное расходное паросодержание*

Изменение коэффициента теплоотдачи для разных режимов кипения



AB - свободная конвекция;
B - начало пузырькового кипения;
B' - начало развитого пузырькового кипения;
C' - точка отклонения режима от пузырькового кипения;
C - точка первого кризиса кипения;
D - точка второго кризиса кипения

Изменение коэффициента теплоотдачи для разных режимов кипения



Кризис теплообмена 2-го рода

Граничное паросодержание не зависит от плотности теплового потока, а определяется состоянием двухфазного потока, таким образом, кризис второго рода может возникнуть *и при малых тепловых потоках.*

Пути исключения кризиса теплообмена 2-го рода:

- увеличение недогрева;
- повышение давления;
- снижение массовой скорости

Кризис теплообмена 2-го рода (*граничное паросодержание*)

$$x_{ГР} = 1 - 0,86 \cdot \exp\left(-\frac{19}{We}\right)$$

$$We = \frac{(\rho\omega)^2 \cdot d_{Г}}{\rho' \cdot \sigma}$$

Участок ухудшенного теплообмена (отложения)

Результаты металлографических исследований внутренней поверхности теплообменных труб

| Металлографические показатели | Температурные зоны | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|---|---------------------------|-----------------------------|
| | Зона доупаривания (от – до) | Зона ухудшенного теплообмена (от – до) | Зона кипения (от – до) | Зона подогрева (от – до) |
| Толщина оксидной пленки, мкм | 0,82 - 12,65 | 0,68 - 5,7 | 0,98 - 2,58 | 1,36 - 4,35 |
| Толщина отложений, мкм | 11,83 - 96,97 | 7,52 - 71,55 | 5,71 - 36,86 | 13,19 - 25,02 |
| Глубина язв, мкм | 9 - 430 | 5 - 450 | не обнаружено | не обнаружено |



Спасибо за внимание