



ТЕПЛОМАССОБМЕН

Лекция 14. Расчёт теплообменных аппаратов (ТА)

Г.И.Пальчёнок

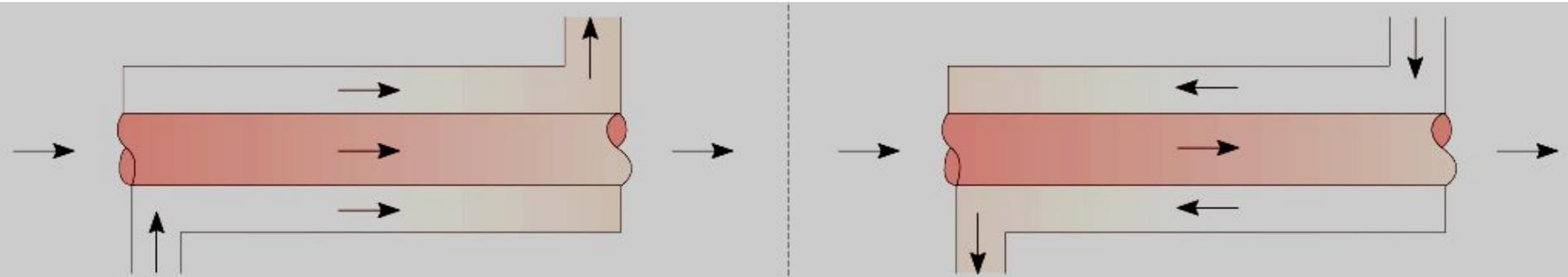
ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ (ТА)

– устройства в которых теплота передаётся от одной среды ("горячего" теплоносителя, поверхности твёрдого тела) к другой ("холодному" теплоносителю).

По принципу действия теплообменники делятся на:

- 1] **Поверхностные** – процесс теплообмена связан с поверхностью твёрдого тела:
 - **Рекуперативные** – горячий и холодный теплоносители разделены твёрдой стенкой, через которую в *стационарном* режиме передаётся теплота;
 - **Регенеративные** – одна и та же поверхность *теплоаккумулирующей насадки* попеременно омывается то горячим, то холодным теплоносителями.
- 1] **Смесительные (контактные)** – теплообмен осуществляется при *прямом контакте* и *смешении* горячего и холодного теплоносителей.
- 1] **Комбинированные (контактно-поверхностные)**
- 1] **С внутренними источниками тепла** (эл. нагреватели, ядерные реакторы – только "холодный" теплоноситель)

Рекуперативный поверхностный ТА типа "труба в трубе"

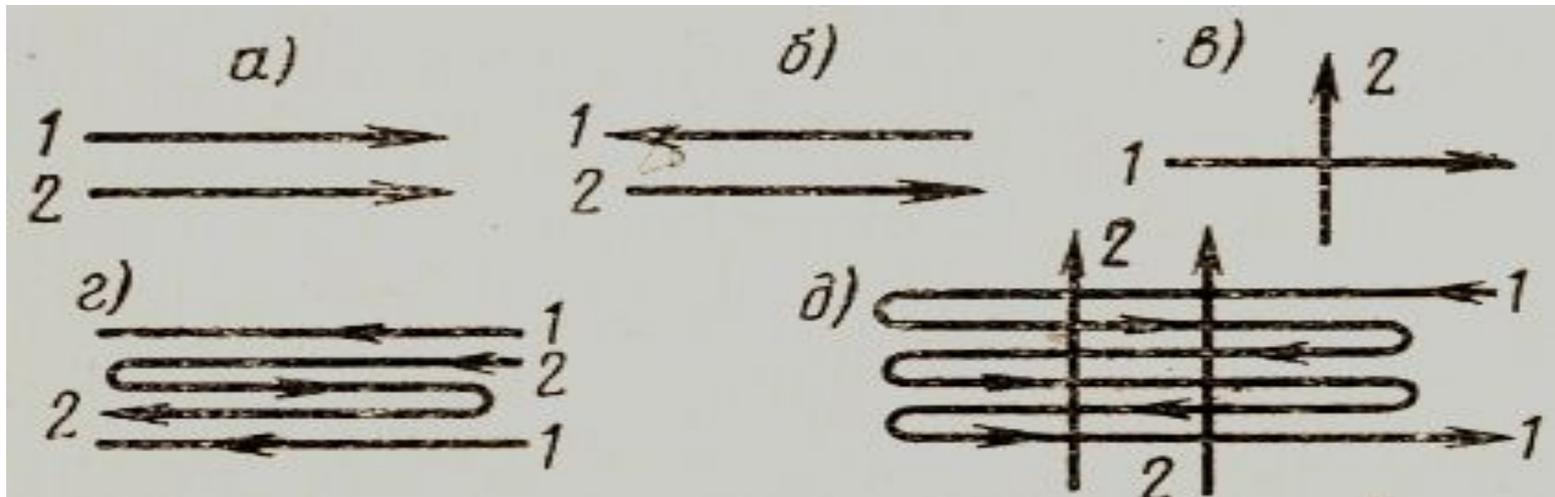


а) Прямоток

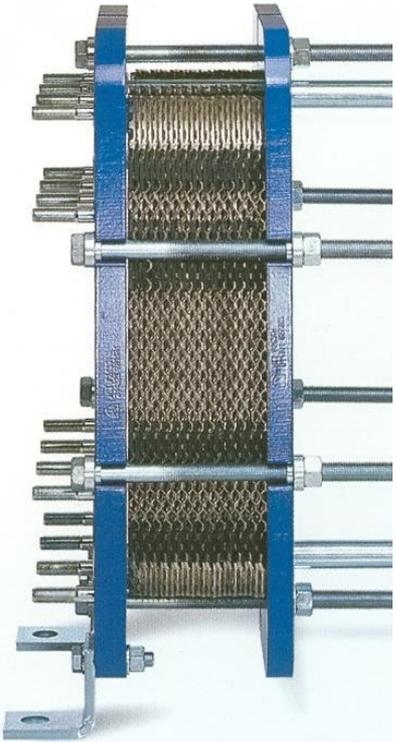
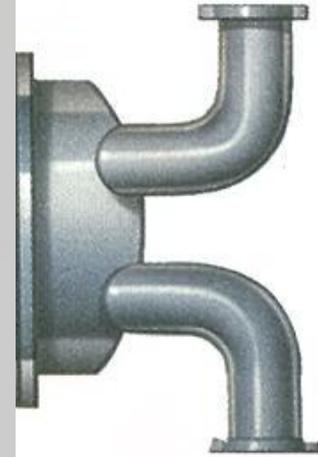
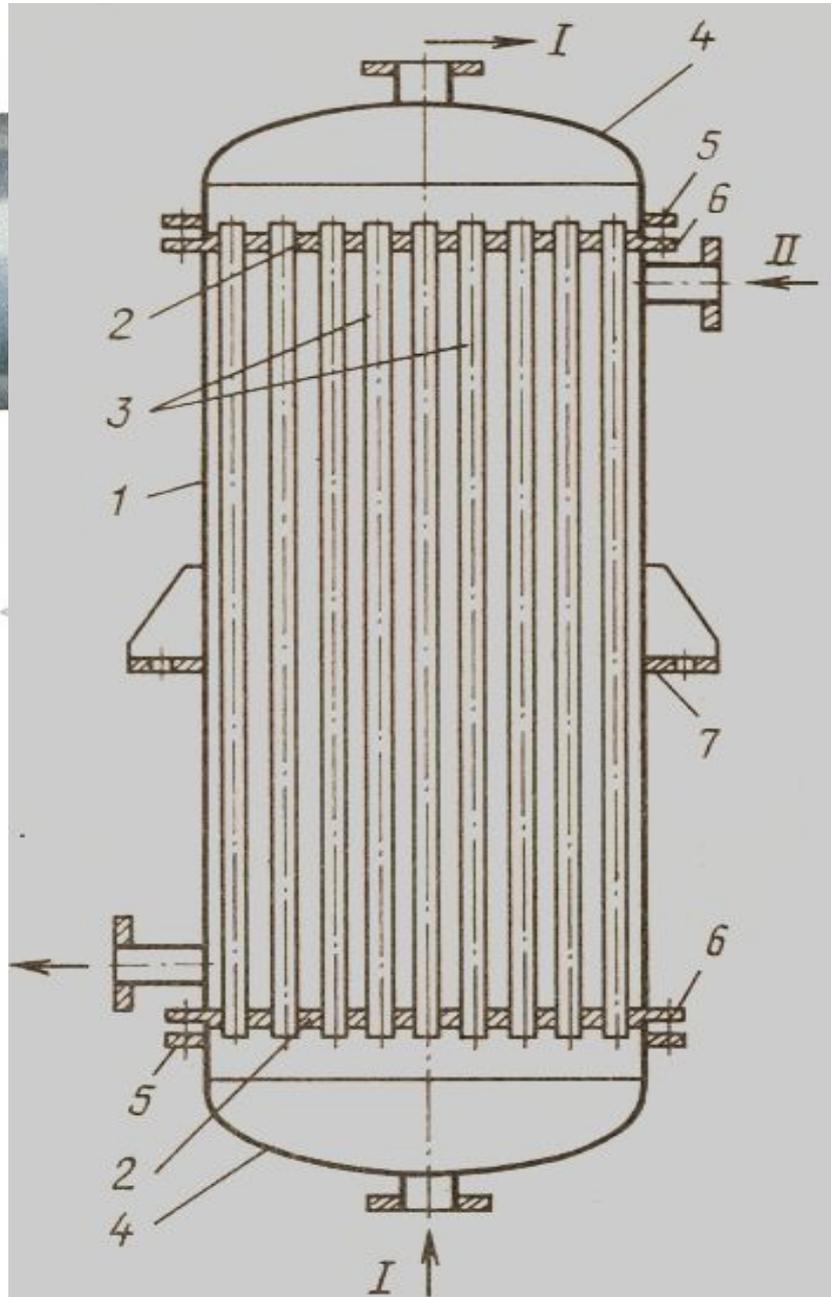
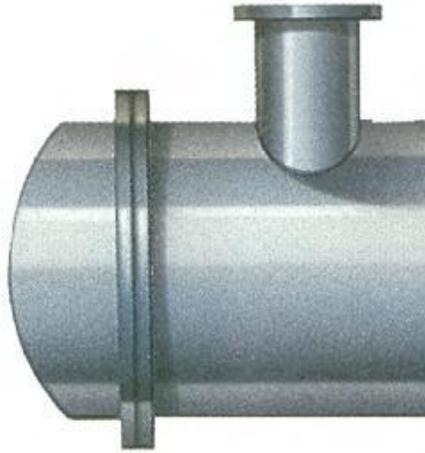
б) Противоток

в) Перекрёстный ток;

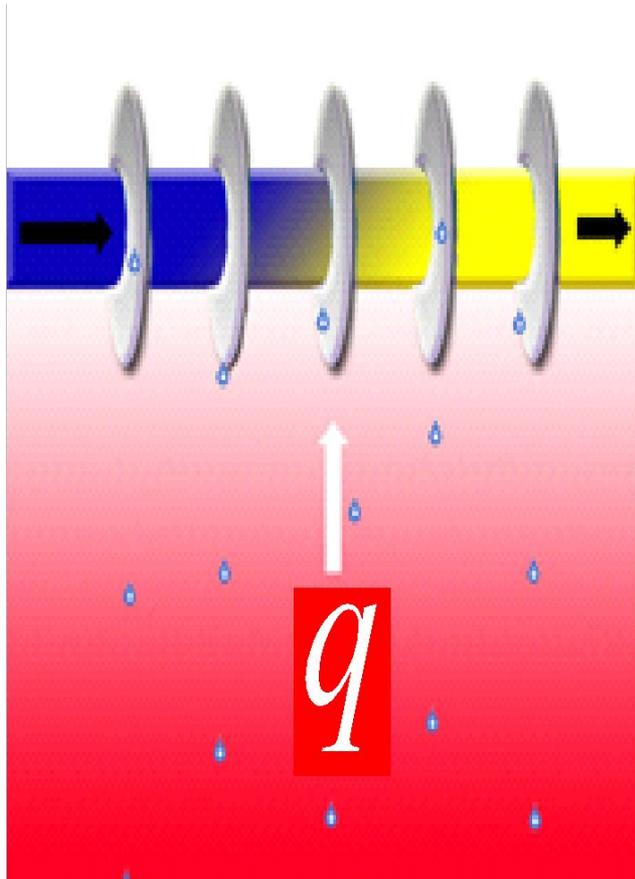
г, д) Комбинированные схемы



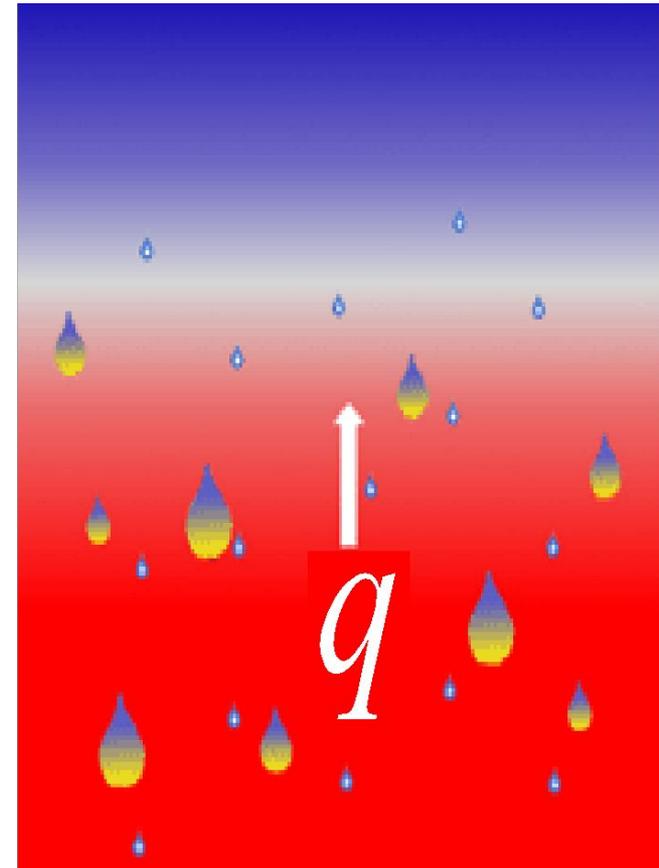
Кожухотрубчатый и пластинчатый поверхностные ТОО



Конденсация пара в продуктах сгорания в ТА поверхностного и смесительного типов

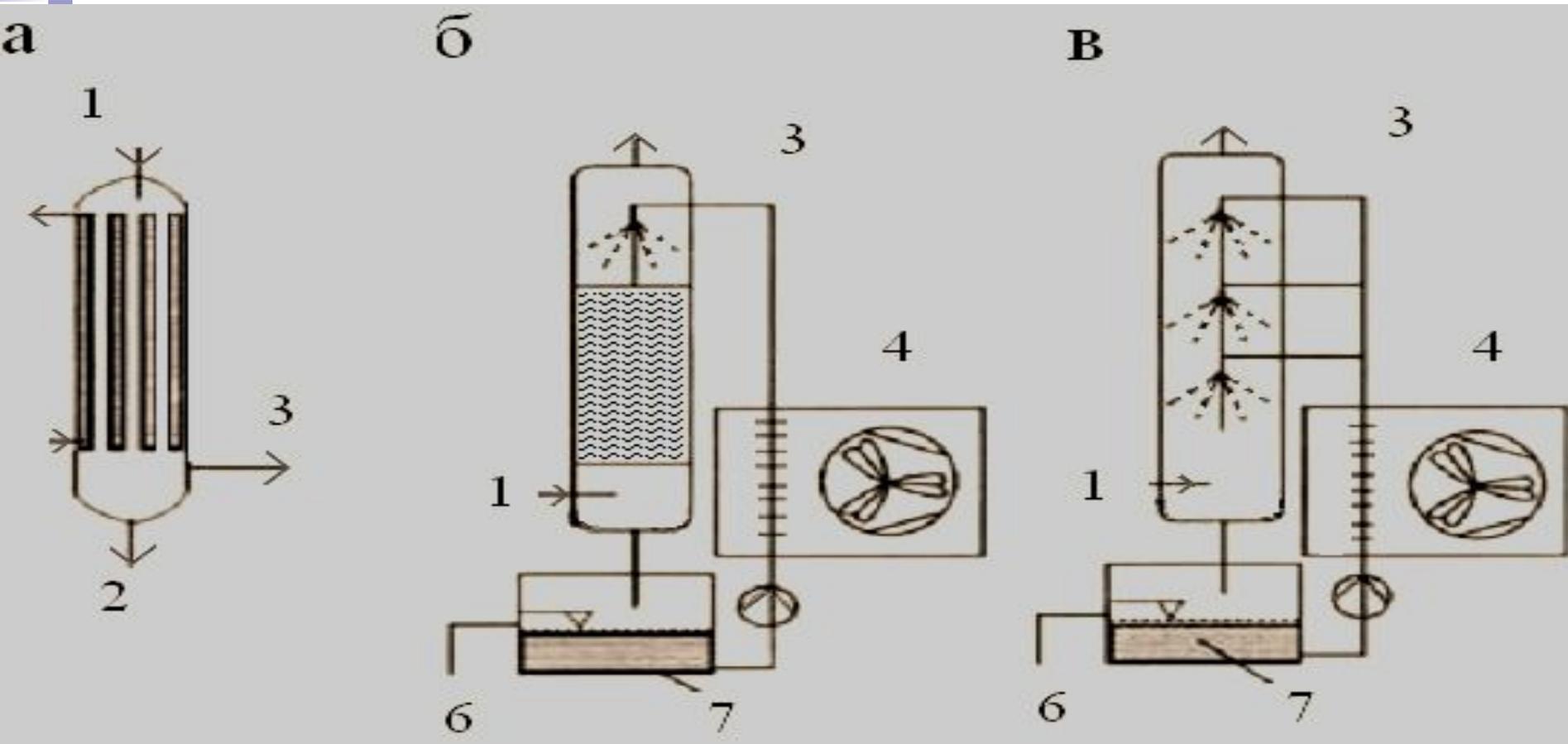


а) Рекуперативный
теплообменник
 $k = 50-60 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$



б) Смесительный (контактный)
теплообменник
 $k = 4500-5500 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{К})$

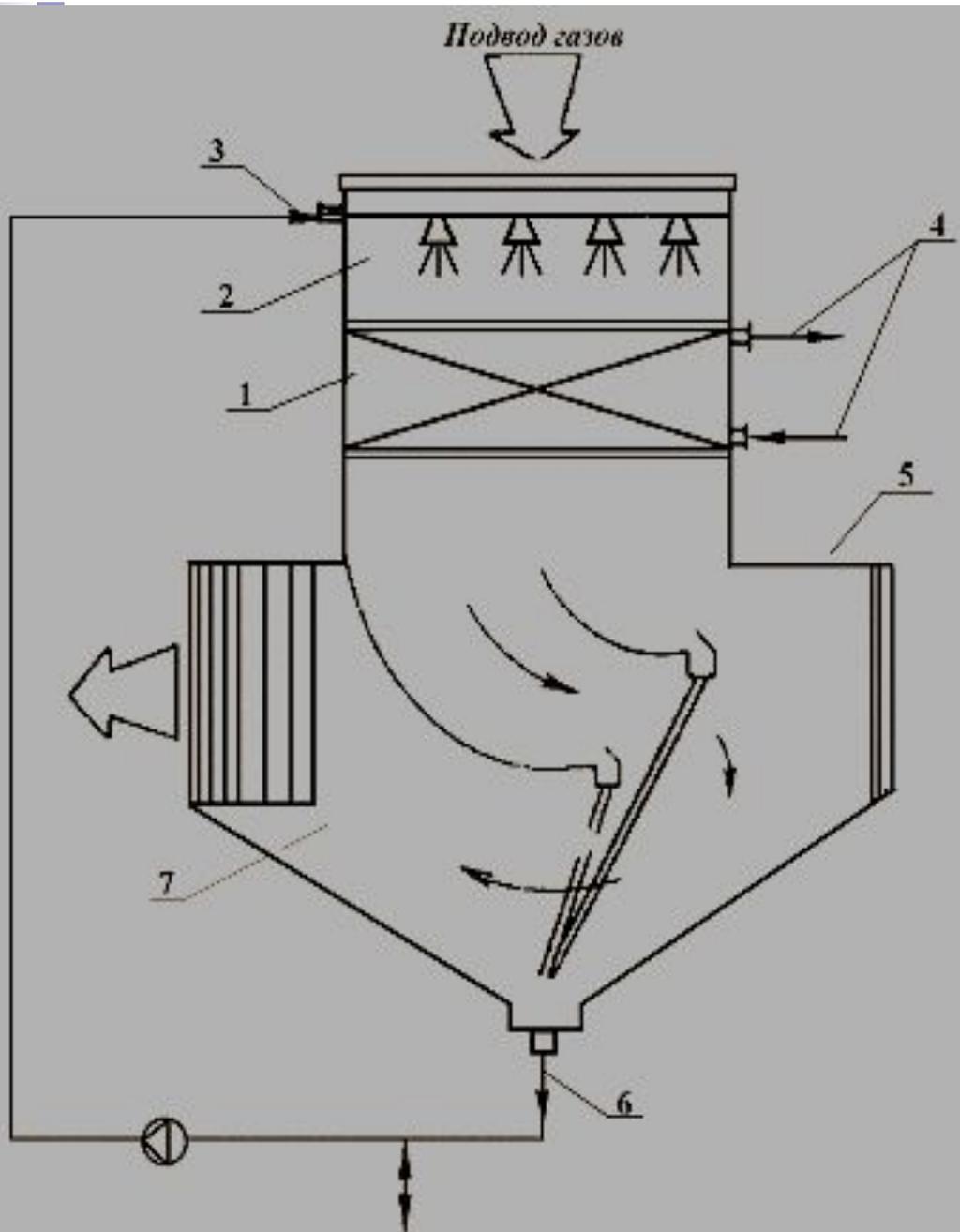
Глубокое охлаждение дымовых газов котлов



**а – поверхностный теплообменник (рекуператор),
б – контактный теплообменник (скруббер) с насадкой ,
в – контактный теплообменник инжекционного типа;**

1 – влажный газ, 2 – конденсат; 3 – осушенный газ; 4 – воздушный калорифер; 6 – перелив конденсата; 7 – циркулирующая вода

Контактный Теплообменник с Активной Насадкой – КТАН



Интенсификация теплообмена с газовой стороны: **контактное** охлаждение газа водой в камере орошения и **поверхностное** – на трубах активной насадки

- 1 – активная насадка (трубчатый рекуператор);
- 2 – камера орошения;
- 3 – подвод орошающей воды;
- 4 – подвод и отвод нагреваемой воды;
- 5 – корпус;
- 6 – отвод орошающей воды;
- 7 – сепаратор влаги

КТАН универсален:

- утилизатор тепла уходящих газов;
- нагреватель воздуха.

Общие принципы теплового расчёта теплообменников

Проектный (конструктивный) тепловой расчёт проводится при разработке нового аппарата с целью *определения поверхности теплообмена* для передачи *необходимого количества теплоты* при известных расходах и температурах теплоносителей.

Поверочный расчёт выполняется для имеющегося аппарата с заданной поверхностью и имеет целью определить *количество переданной теплоты* и *конечные температуры рабочих жидкостей*.

С теплотехнической точки зрения, независимо от назначения и конструктивных особенностей, все теплообменники предназначены для передачи теплоты от одного теплоносителя к другому, *движущемуся*, теплоносителю.

Общий подход, который лежит в основе теплового расчёта любого ТО аппарата: **совместное решение уравнений**

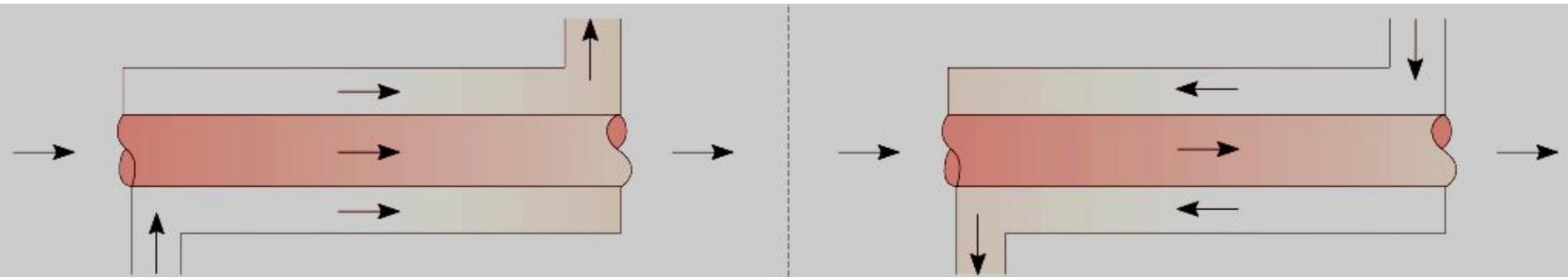
- **теплопередачи и**
- **теплового баланса.**

Уравнение теплового баланса

Рассматриваем *рекуперативный* теплообменник, работающий в *стационарном* режиме при постоянном давлении.

Считаем заданными и неизменными **массовые расходы** **горячего** (индекс 1) и **холодного** (индекс 2) теплоносителей G_1 и G_2 (кг/с) .

Теплота *первичного* теплоносителя полностью воспринимается *вторичным* (пренебрегаем тепловыми потерями)



$$Q = G_1 c_{p1} (t_1' - t_1'') = G_2 c_{p2} (t_2'' - t_2')$$

В практических расчётах используется средняя (в интервале температур от t' до t'') удельная теплоёмкость c_p , Дж/(кг·К).

$\delta t_1 = (t_1' - t_1'')$; $\delta t_2 = (t_2'' - t_2')$ – полные изменения (перепады) температур теплоносителей в ТО.

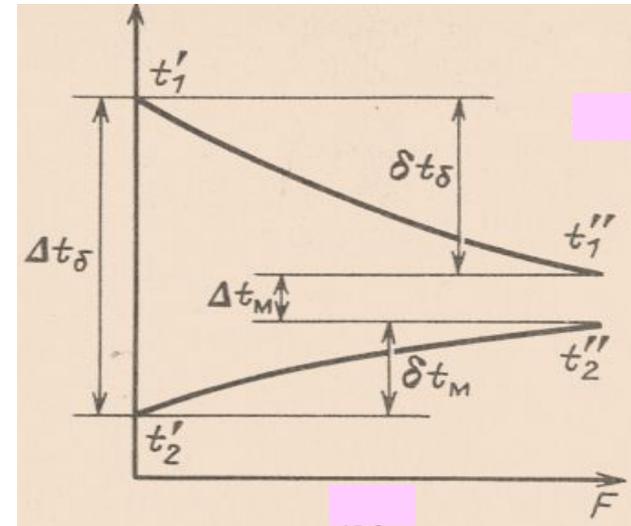
Расходная (полная) теплоёмкость потока или водяной эквивалент

$$W_{\text{и}} C_{\text{гр}} \text{ Вт/К} = \frac{Q}{t'' - t'} = \frac{Q}{\delta t}$$

– это количество теплоты, которое нужно подвести к потоку теплоносителя, чтобы нагреть его на 1 градус.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

Отношение перепадов температур теплоносителей обратно пропорционально отношению их водяных эквивалентов.



Следствие 1. При равенстве водяных эквивалентов теплоносителей их перепады температур также равны

$$W_1 = W_2 \Rightarrow \delta t_1 = \delta t_2, \quad t_2'' - t_2' = t_1' - t_1''$$

$$W = \frac{Q}{\delta t}$$

Следствие 2.

$$\frac{W_1}{W_2} = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_1''} = \frac{\delta t_2}{\delta t_1}$$

Если теплоноситель, например, горячий находится в процессе изменения агрегатного состояния (пример: насыщенный пар конденсируется при $t_1 = t_{\text{насыщ}} = \text{const}$), то

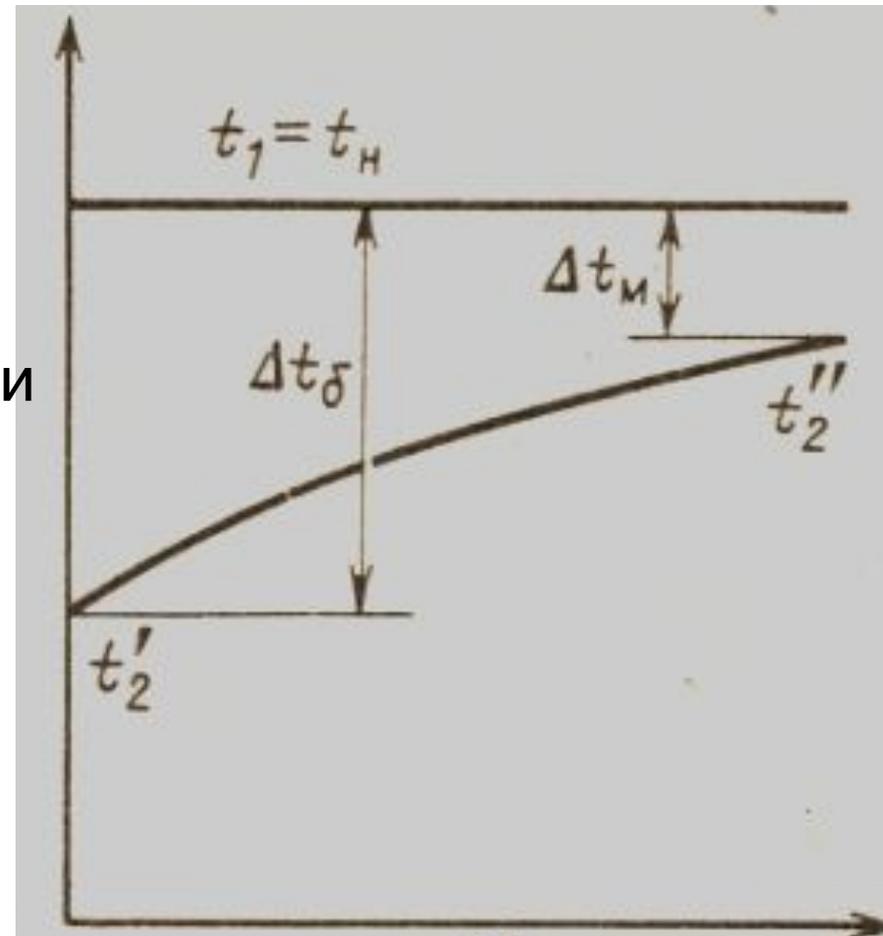
$$\delta t_1 = t_1' - t_1'' = 0$$

$$W_1 = \frac{Q}{\delta t_1} = \infty$$

Близкая картина складывается при условии $W_1 \gg W_2$

$$Q = D_{\text{II}} r x = G_2 c_{p2} \delta t_2$$

D_{II} – массовый расход пара,
 x – степень сухости пара.

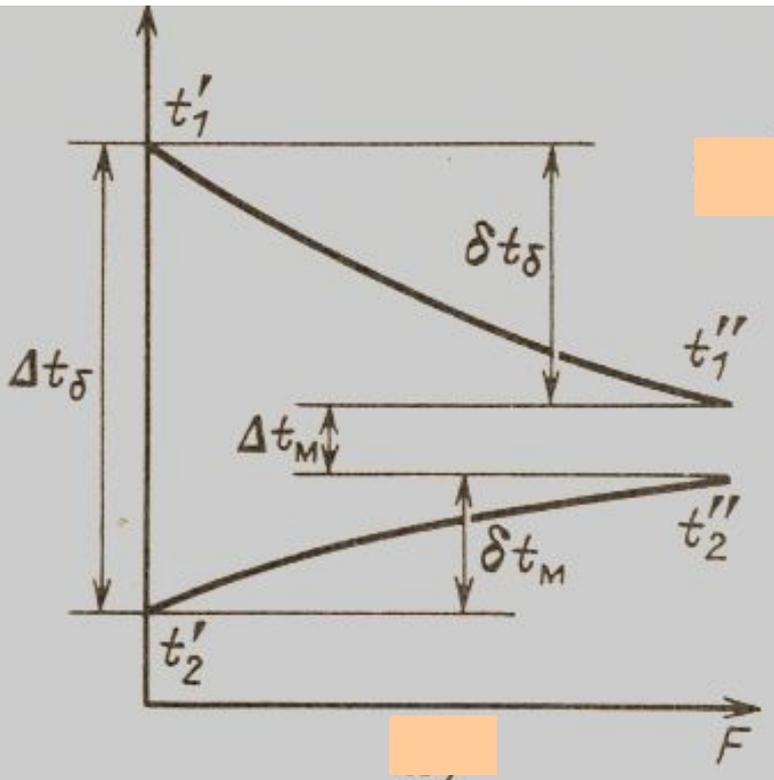


Уравнение теплопередачи

При постоянных температурах теплоносителей t_1 и t_2

$$Q = k(t_1 - t_2)F = k \cdot \Delta t \cdot F \text{ Вт}$$

В общем случае температуры и коэффициент теплопередачи изменяются по поверхности обмена и могут быть приняты постоянными только на элементарной площадке dF



$$dQ = k \cdot \Delta t \cdot dF,$$

$$Q = \int_0^F k \cdot \Delta t \cdot dF.$$

Для решения последнего уравнения необходимо знать законы изменения k и Δt по F .

Средние к-т теплопередачи и температурный напор

В большинстве случаев коэффициент теплопередачи изменяется незначительно и может быть принят постоянными. При существенном изменении его усредняют

$$k_{cp} = \frac{k_1 F_1 + k_2 F_2 + k_3 F_3 + \dots + k_n F_n}{\sum_{i=1}^n F_i} = \frac{\sum_{i=1}^n k_i F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \text{ Вт/ м (К}^2 \text{)}$$

Тогда

$$Q = k_{cp} \int_0^F \Delta t \cdot dF = k_{cp} \cdot F \left(\frac{1}{F} \int_0^F \Delta t \cdot dF \right) =$$

$$Q = k_{cp} \Delta t_{cp} F \quad \Rightarrow \quad F = \frac{Q}{k_{cp} \Delta t_{cp}}.$$

Средний температурный напор

Рассмотрим простейший рекуперативный прямоточный ТО

$$dQ = k \cdot \Delta t \cdot dF$$

$$dQ = -W_1 dt_1 = W_2 dt_2$$

$$dt_1 = -\frac{dQ}{W_1}, dt_2 = \frac{dQ}{W_2}$$

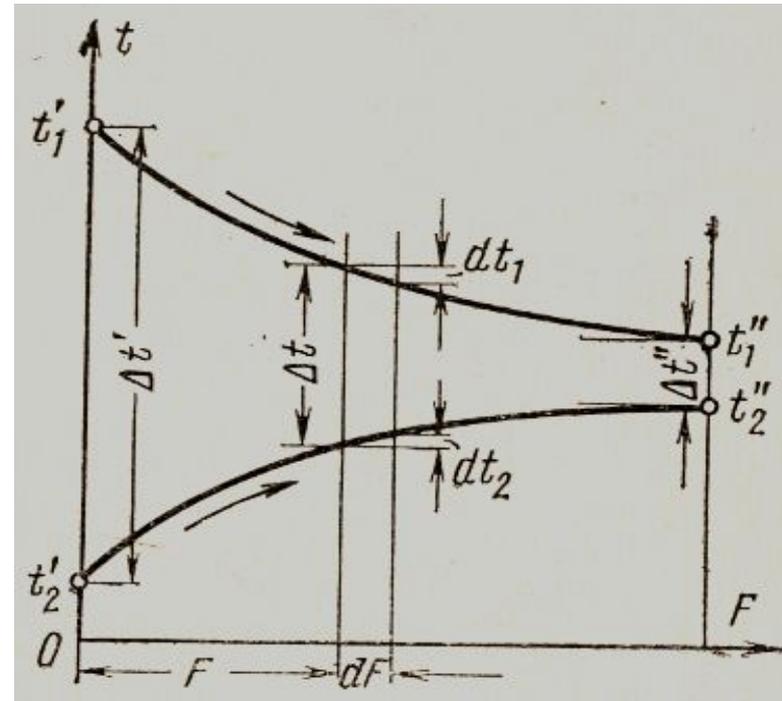
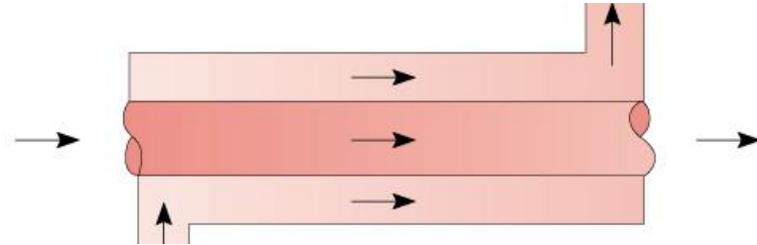
$$d(\Delta t) = d(t_1 - t_2) = dt_1 - dt_2 = -m \cdot dQ$$

$$m = \left(\frac{1}{W_1} + \frac{1}{W_2} \right)$$

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -m \cdot k \cdot dF$$

$$\int_{\Delta t'}^{\Delta t} \frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -m \cdot k \int_0^F dF \Rightarrow$$

$$\Delta t = \Delta t' e^{-m k F}$$

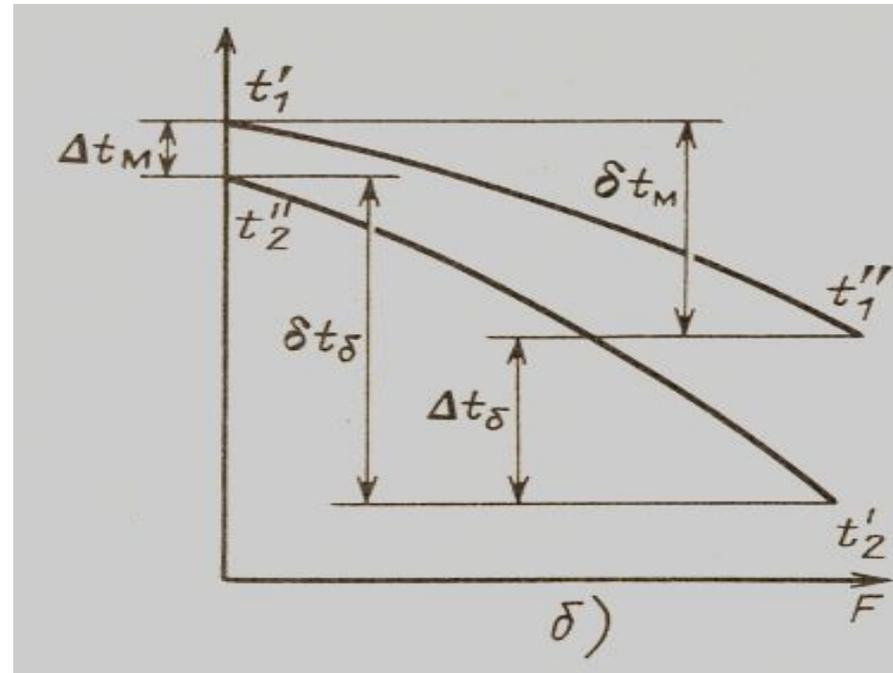
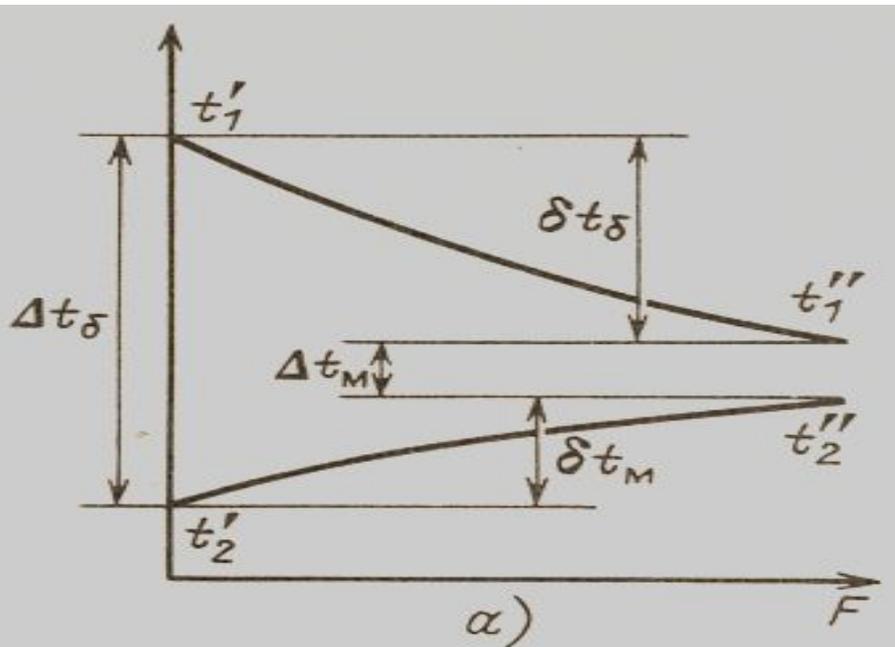


Среднелогарифмический температурный напор

Усредняем температурный напор по всей поверхности

$$\Delta t_{cp}^{прям} = \frac{1}{F} \int_0^F \Delta t dF = \frac{\Delta t' - \Delta t''}{\ln(\Delta t' / \Delta t'')}$$

$$\Delta t_{cp}^{против} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln(\Delta t_{\delta} / \Delta t_m)}$$

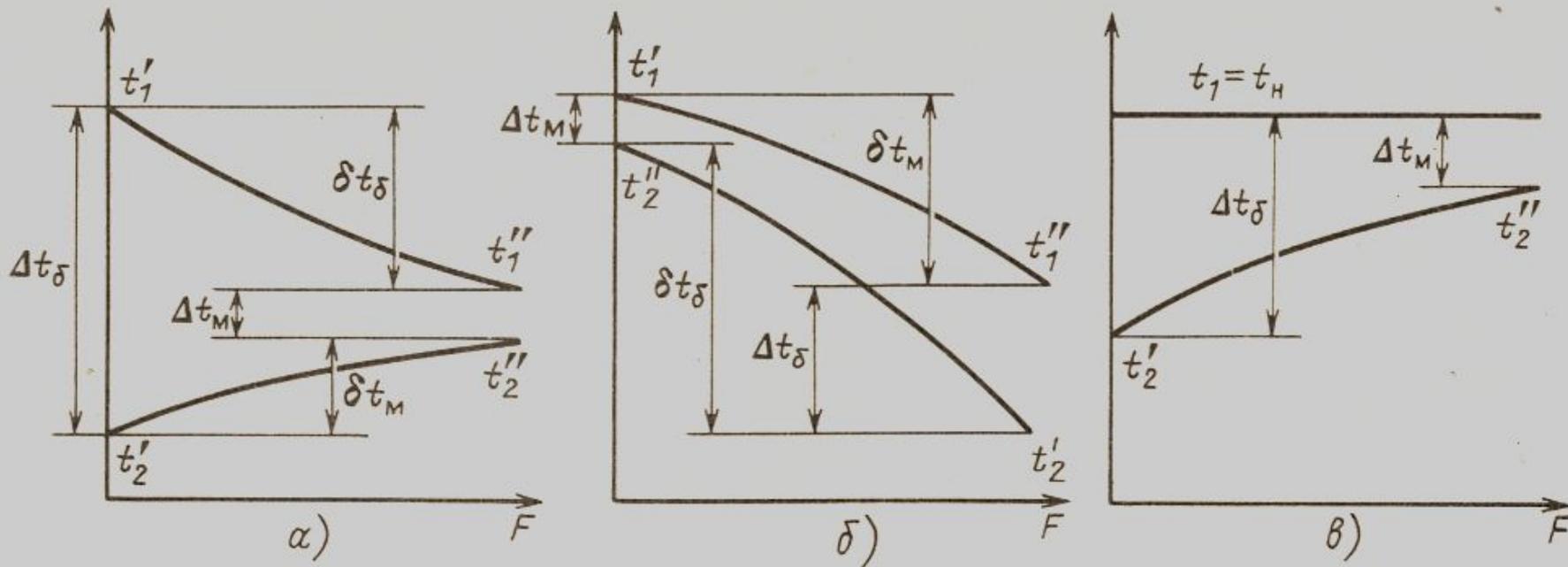


$$m = (1/W_1 + 1/W_2)$$

$$m = (1/W_1 - 1/W_2)$$

Схема движения теплоносителей в ТО

оказывает решающее влияние на изменение их температур вдоль поверхности обмена



а) **прямоток:**

$t_2'' < t_1''$; температурный напор изменяется сильнее, чем в (б).

б) **противоток:** средний температурный напор выше, чем в (а).

в) прямо- и противоток эквивалентны (**изменение агрегатного состояния или $W_1 \gg W_2$**).

Средний температурный напор – специальные случаи

Температуры теплоносителей незначительно изменяются по поверхности теплообмена ($\Delta t_M / \Delta t_{\sigma} \geq 0.6$)

$$\Delta t_{cp} \approx \frac{1}{2} (\Delta t_{\sigma} + \Delta t_M) \pm 3\%$$

В теплообменнике-конденсаторе, где горячий теплоноситель – сухой насыщенный пар превращается в насыщенную жидкость, т.е. конденсируется при $t_1 = t_H = const$

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_2'' - t_2'}{\ln \frac{t_H - t_2'}{t_H - t_2''}} = \frac{t_2'' - t_2'}{\ln (\Delta t_{\sigma} / \Delta t_M)}$$

В теплообменнике-испарителе, где холодный теплоноситель – насыщенная жидкость превращается в сухой насыщенный пар, т.е. испаряется при $t_2 = t_H = const$

$$\Delta t_{cp} = \frac{t_1' - t_1''}{\ln \frac{t_1' - t_H}{t_1'' - t_H}} = \frac{t_1' - t_1''}{\ln (\Delta t_{\sigma} / \Delta t_M)}$$

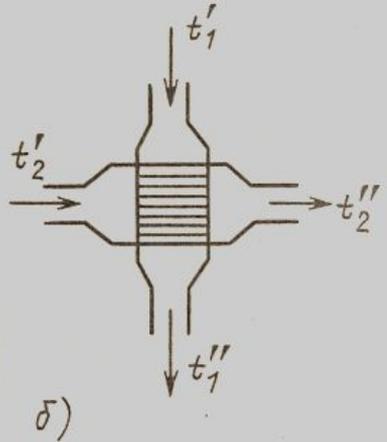
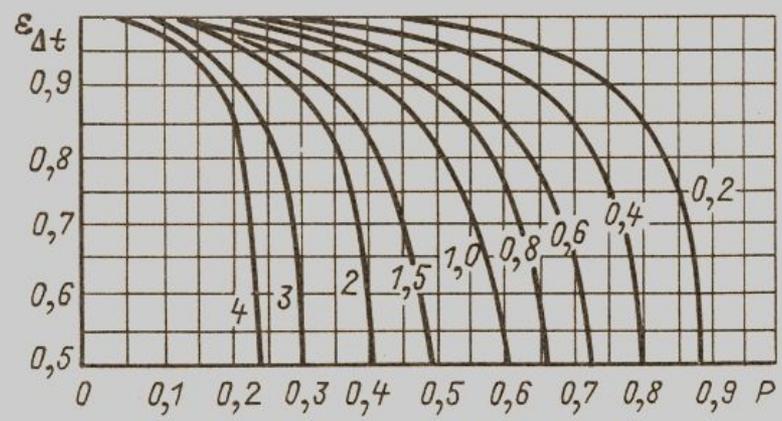
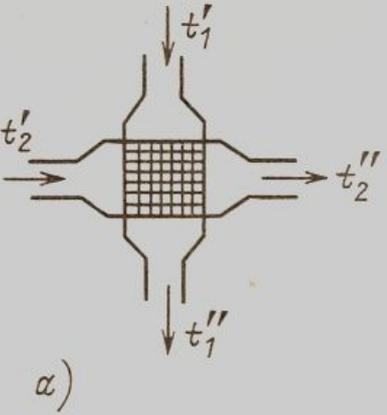
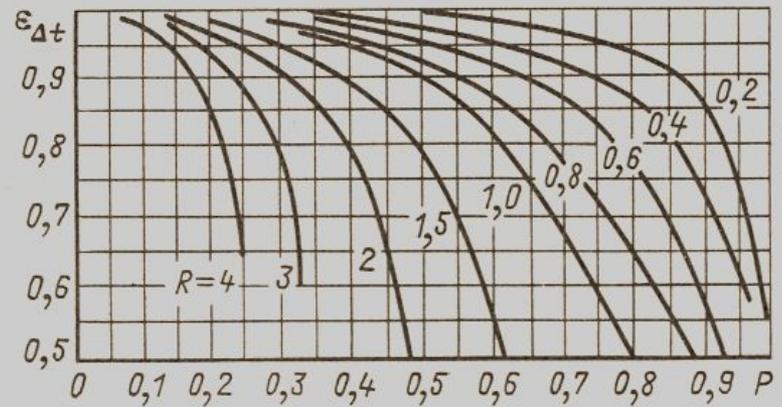
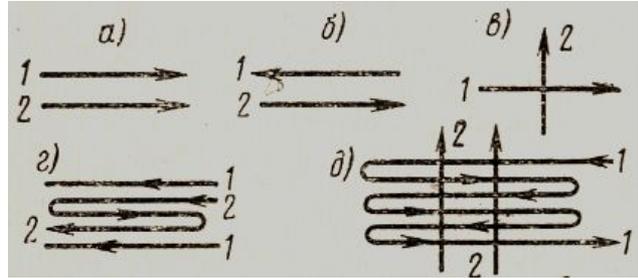
Сложные схемы движения жидкостей

$$\Delta t_{cp} = \Delta t_{cp}^{прот} \varepsilon_{\Delta t}$$

$$\Delta t_{cp}^{прот} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_m}{\ln(\Delta t_{\delta} / \Delta t_m)}$$

$$P = \frac{t_2'' - t_2'}{t_1' - t_2'} = \frac{\delta t_2}{\Delta t_{max}} < 1$$

$$R = \frac{t_1' - t_1''}{t_2'' - t_2'} = \frac{\delta t_1}{\delta t_2} = \frac{W_2}{W_1}$$



Методика конструктивного расчёта рекуператора

1. Определяется средний температурный напор $\Delta t_{\text{ср}}$.

2. Определяются средние температуры теплоносителей (ср. арифметическая – для теплоносителя с большим водяным эквивалентом $W_{\text{б}}$; $t_{\text{ср.м}} = t_{\text{ср.б}} \pm \Delta t_{\text{ср}}$ – с меньшим $W_{\text{м}}$).

3. По средним температурам теплоносителей находятся их теплофизические свойства.

4. Расчет выполняется *методом последовательных приближений (итераций)*. Задаётся ориентировочное значение коэффициента теплопередачи k_0 (*нулевое приближение*).

5. Рассчитывается площадь поверхности аппарата $F_0 = Q/(k_0 \Delta t_{\text{ср}})$.

6. Выбирается стандартный теплообменник с ближайшим $F > F_0$ и рассчитываются средние скорости течения теплоносителей, коэффициенты теплоотдачи с горячей и холодной сторон, коэффициент теплопередачи *с учетом загрязнения стенки* и температура стенки труб / пластин.

7. Уточняется площадь поверхности теплообменника (допустимое расхождение с результатом предыдущего приближения 5%).

Поверочный расчёт

Имеется готовый теплообменник (или его проект).

Заданы: F , k , W_1 , W_2 , t_1' , t_2' .

Найти: Q , t_1'' , t_2'' .

Приближённое решение:
(малые изменения t -р)

$$Q = W_1 (t_1' - t_1'') = W_2 (t_2'' - t_2')$$

$$t_1'' = t_1' - Q / W_1$$

$$t_2'' = t_2' + Q / W_2$$

Принимаем *линейный закон* изменения t (F)

$$Q = kF \left(\frac{t_1' + t_1''}{2} - \frac{t_2'' + t_2'}{2} \right)$$

$$Q = kF \left(t_1' - \frac{Q}{2W_1} - t_2' - \frac{Q}{2W_2} \right)$$

$$\frac{Q}{kF} + \frac{Q}{2W_1} + \frac{Q}{2W_2} = t_1' - t_2'$$

\Rightarrow

$$Q = \frac{t_1' - t_2'}{\frac{1}{kF} + \frac{1}{2W_1} + \frac{1}{2W_2}}$$

Точные решения

Для конкретной схемы движения теплоносителей используется экспоненциальный закон изменения температурного напора вдоль поверхности теплообмена

$$\Delta t'' = \Delta t' e^{-m k F}$$

Прямоток:

$$\delta t_1 = t'_1 - t''_1 = (t'_1 - t'_2) \frac{1 - \exp\left[-\frac{kF}{W_1} \left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right)\right]}{\left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right)}$$

$$\delta t_1 = (t'_1 - t'_2) \cdot \Pi \left(\frac{W_1}{W_2}, \frac{kF}{W_1} \right)$$

$$\delta t_2 = t''_2 - t'_2 = (t'_1 - t'_2) \cdot \frac{W_1}{W_2} \Pi$$

$$Q_{\Pi} = W_1 \delta t_1 = W_1 (t'_1 - t'_2) \cdot \Pi$$

Функция Π для удобства расчётов заранее рассчитана и затабулирована.

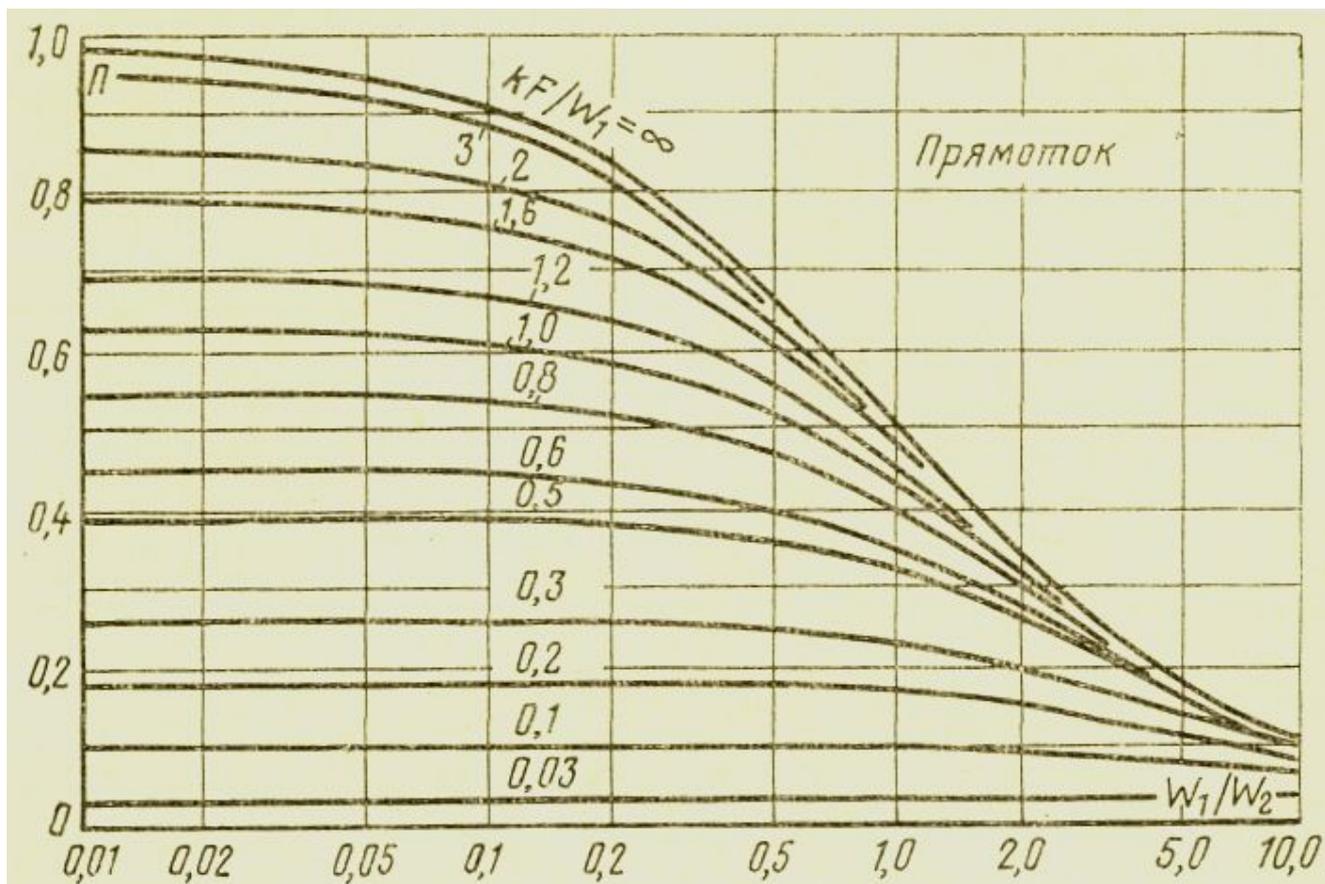


Рис. 8-4. $\Pi = f(W_1/W_2; kF/W_1)$ — вспомогательная функция для расчета конечной температуры при прямотоке.

Противоток:

$$\delta t_1 = t'_1 - t''_1 = \frac{1 - \exp\left[-\frac{kF}{W_1}\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right)\right]}{1 - \frac{W_1}{W_2} \exp\left[-\frac{kF}{W_1}\left(1 - \frac{W_1}{W_2}\right)\right]}$$

$$\delta t_1 = (t'_1 - t'_2) \cdot Z\left(\frac{W_1}{W_2}, \frac{kF}{W_1}\right)$$

$$\delta t_2 = t''_2 - t'_2 = (t'_1 - t'_2) \cdot \frac{W_1}{W_2} Z$$

$$Q_Z = W_1 \delta t_1 = W_1 (t'_1 - t'_2) \cdot Z$$

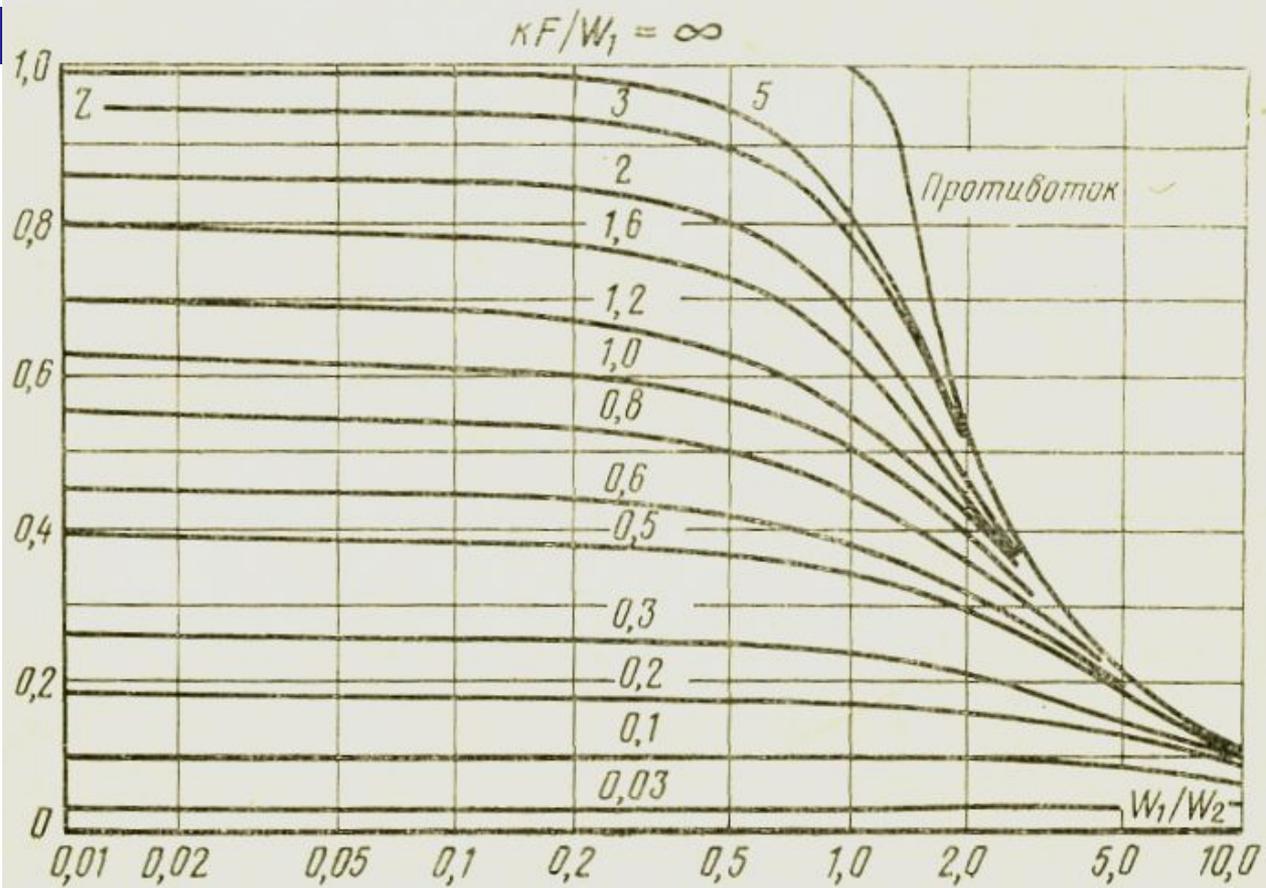


Рис. 8-5. $Z = f(W_1/W_2; kF/W_1)$ — вспомогательная функция для расчета конечной температуры при противотоке.

Частный случай $W_1 = W_2 = W$:

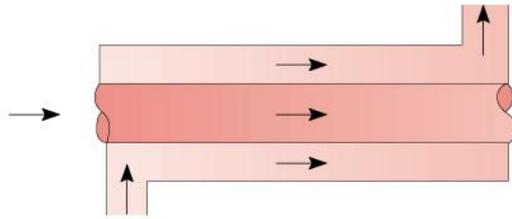
$$\delta t_1 = t_1' - t_1'' = (t_1' - t_2') / (1 + W / kF)$$

$$\delta t_2 = t_2'' - t_2' = (t_1' - t_2') / (1 + W / kF)$$

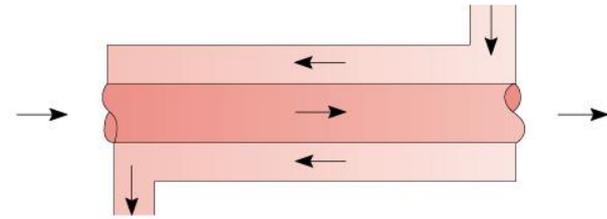
$$Q_Z = (t_1' - t_2') W / (1 + W / kF)$$

Сравнение прямотока и противотока

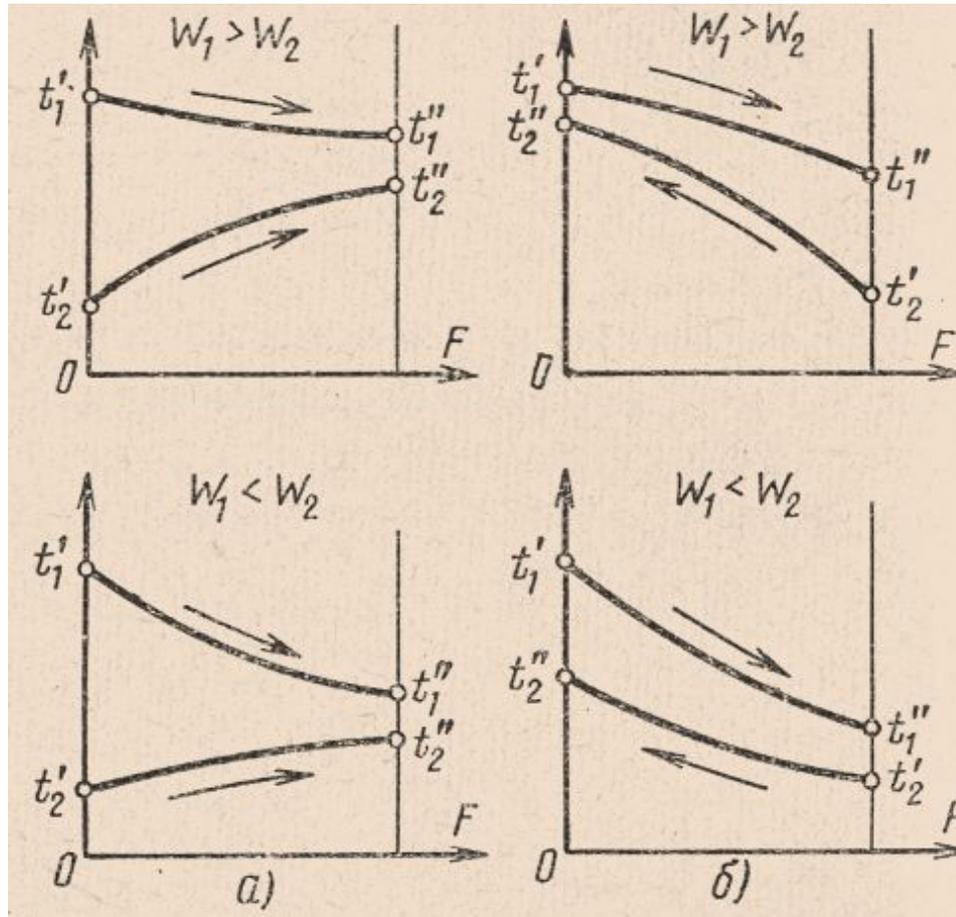
$$\Delta t = \Delta t' e^{-m k F}$$



$$m = (1/W_1 + 1/W_2)$$



$$m = (1/W_1 - 1/W_2)$$



$m=0 \rightarrow$
 $\Delta t = \text{const}$

Сравнение прямотока и противотока

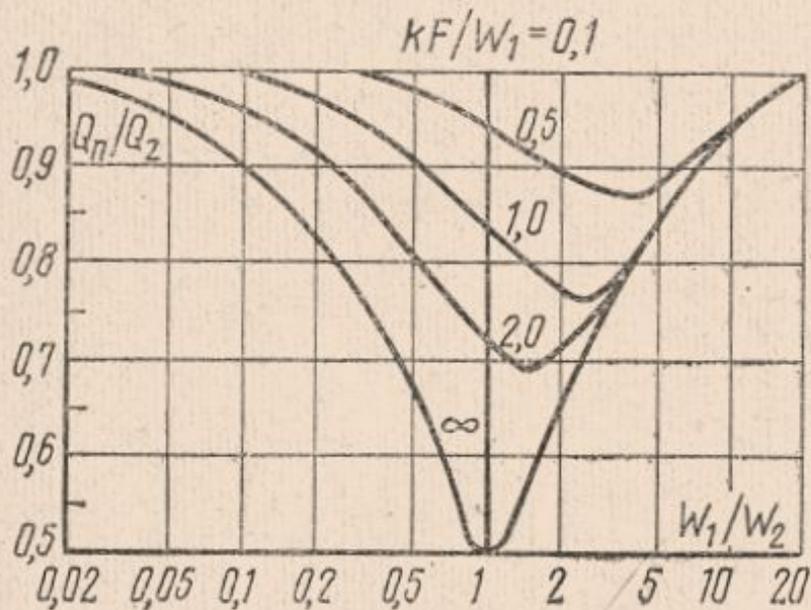
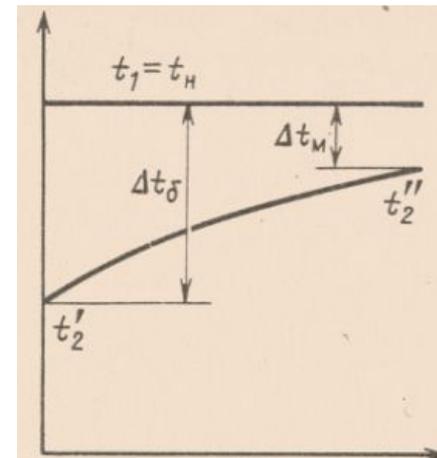


Рис. 8-6. $Q_{\text{П}}/Q_{\text{З}} = f(W_1/W_2; kF/W_1)$ — сравнение прямотока и противотока.

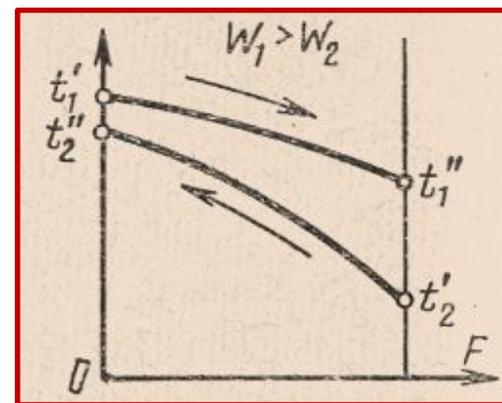
Во всех остальных случаях противоток теплотехнически эффективнее, хотя может привести к перегреву поверхности на "горячей" стороне.

Равноценны при

$$1) \quad W_1/W_2 < 0.05; \quad W_1/W_2 > 10$$



$$2) \quad kF/W_1 (W_1/W_2) \leq 0.1$$



Тепловая эффективность теплообменника

Тепловой эффективностью теплообменного аппарата η называется отношение теплового потока Q , передаваемого в рассматриваемом аппарате, к тепловому потоку $Q_{ид}$, который передавался бы в тех же условиях **в идеальном теплообменнике** с бесконечно большой площадью теплообмена

$$\eta = \frac{Q}{Q_{ид}} = \frac{W_1 \delta t_1}{W_{\min} (t'_1 - t'_2)} = \frac{W_2 \delta t_2}{W_{\min} (t'_1 - t'_2)}$$

$$W_{\min} = \min(W_1, W_2)$$

В идеальном теплообменнике реализуется максимально возможный перепад температур: холодный теплоноситель нагревается до начальной температуры горячего теплоносителя.

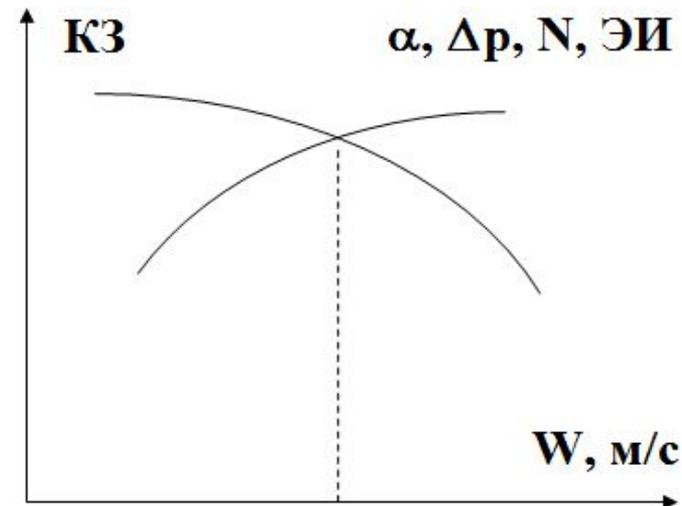
Гидродинамический расчёт ТО аппаратов

Задачи ГР:

- 1) определение гидродинамического сопротивления – потери давления теплоносителей при прохождении через ТО,
- 2) выбор **оптимальных скоростей** теплоносителей по условиям теплообмена и затрат энергии на транспорт сред,
- 3) выбор оборудования прокачки теплоносителей.

Между теплопередачей и потерей давления существует тесная физическая и экономическая связь. Чем выше скорость среды, тем

- 1) интенсивнее теплообмен, компактнее аппарат, меньше капитальные затраты;
- 2) выше гидродинамическое сопротивление, расход энергии на прокачку и эксплуатационные затраты;
- 3) вывод – поиски компромисса (оптимума).



Расчёт мощности на перемещение среды

$$N = \frac{V \Delta p}{\eta_H} = \frac{G \Delta p}{\rho \eta_H}$$

V – объёмный расход среды, м³/с;

G – массовый расход среды, кг/с;

Δp – полное гидродинамическое сопротивление, Па (Н/м²);

ρ – плотность среды кг/м³;

η_H – КПД насоса (вентилятора).

$$\Delta p = \sum \Delta p_{\text{трение}} + \sum \Delta p_{\text{местн.сопр.}} + \sum \Delta p_{\text{ускор.потока}}$$

$$\Delta p_{\text{трение}} = \xi \frac{l}{d_{\text{гидр}}} \frac{\rho w^2}{2}; \quad d_{\text{гидр}} = \frac{4s}{\rho}; \quad \xi = f(\text{Re})$$

$$\Delta p_{\text{местн.сопр.}} = \zeta \frac{\rho w^2}{2};$$

$$\Delta p_{\text{ускорение}} = \rho_2 w_2^2 - \rho_1 w_1^2$$

– следствие изменения объёма теплоносителя при неизменном сечении канала

Литература

1. И.Е. Идельчик. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение. 1992.
2. С.С. Кутателадзе. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат. 1990.

Тепловой расчёт регенеративного ТО

Теплообменная поверхность попеременно омывается горячим и холодным теплоносителями.

τ_1 – период нагрева, с

τ_2 – период охлаждения, с

$\tau = \tau_1 + \tau_2$ – полный период (цикл).

Реальный процесс – нестационарный, рассчитывается методами математического моделирования; в практических расчётах используются осреднённые за время цикла величины.

Уравнение теплопередачи

$$Q = k_u (\bar{t}_1 - \bar{t}_2)$$

Q – количество теплоты, переданное за время цикла, Дж/(м²·цикл)

k_u – к-т теплопередачи, Дж/(м²·К·цикл)

\bar{t}_1, \bar{t}_2 средние температуры горячего (за τ_1) и холодного (за τ_2) теплоносителей

КПД регенеративного ТО

Количество теплоты, отданное горячим теплоносителем поверхности за период нагрева, равно количеству теплоты, полученному холодным теплоносителем за период охлаждения

$$Q_1 = \alpha_1 \tau_1 (\bar{t}_1 - \bar{t}_{c1}) = \alpha_2 \tau_2 (\bar{t}_{c2} - \bar{t}_2) = Q_2$$

В *идеальном* регенераторе принимается $\bar{t}_{c1} = \bar{t}_{c2}$

$$k_{\text{ц}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \tau_1} + \frac{1}{\alpha_2 \tau_2}}$$

Для *реального* регенератора вводится КПД, рассчитываемый по специальным номограммам

$$k_{\text{ц}} = k_{\text{ц ид}} \eta$$