

## Обозначения:

$T_{г1}, T_{г2}, T_{гср}$  – температура горячего теплоносителя, на входе, на выходе и средняя;

$T_{х1}, T_{х2}, T_{хср}$  – температура холодного теплоносителя, на входе, на выходе и средняя;

$P_{г1}, P_{г2}, P_{гср}$  – давление горячего теплоносителя, на входе, на выходе и средняя;

$P_{х1}, P_{х2}, P_{хср}$  – давление холодного теплоносителя, на входе, на выходе и средняя;

$C_p$  – теплоемкость теплоносителя;  $U$  – скорость;  $W$  – водяной эквивалент;

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости;  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости;

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $k$  – коэффициент

теплопередачи;  $\xi$  – коэффициент гидравлического сопротивления;  $\rho$  – плотность;

$\Theta$  – эффективность ТА;  $\Delta P$  – гидравлическое сопротивление;  $\delta P$  – относительная потеря давления;

$Nu$  – число Нуссельта;  $Re$  – число Рейнольдса;  $Pr$  – число Прандтля;  $NTU$  – число единиц переноса;

Величины, описывающие конструкцию:

$F$  – площадь ( $F_{тп}$  – теплообменной поверхности;  $F_{вх}$  – входного патрубка;  $F_{вых}$  – выходного патрубка;  $F_{ф}$  – фронта матрицы);

$V$  – объем ( $V_{та}$  – теплообменного аппарата;  $V_{гм}$  – матрицы по горячей стороне;

$V_{хм}$  – матрицы по холодной стороне;  $V_{тп}$  – теплообменной поверхности);

$m^{хм}$  – масса ( $m_{та}$  – теплообменного аппарата;  $m_{тп}$  – теплообменной поверхности);

$d$  – эквивалентный диаметр ( $d_{гэ}$  – по горячей стороне;  $d_{хэ}$  – по холодной стороне);

$\delta$  – толщина теплообменной поверхности;

$l$  – длина ( $l_{та}$  – теплообменного аппарата;  $l_{г}$  – каналов по горячей стороне;  $l_{х}$  – каналов по холодной стороне)

# Исходные данные для проектирования

Технические требования

Техническое задание

Технические требования по назначению

Технические требования по применению

Технические требования по эффективности

Требования к конструкции

Технические требования по эргономике

Технические требования по экологии

# Исходные данные для проектировочного расчета.

Технические требования по назначению

Технические требования по эффективности

Требования к конструкции

Вид (вещество) теплоносителей: воздух, вода, газ (состав), жидкость (состав), ...

Исходные параметры теплоносителей:  $T_{г1}$ ,  $P_{г1}$ ,  $G_{г1}$ ,  $T_{х1}$ ,  $P_{х1}$ ,  $G_{х1}$

Требования по эффективности:  $\Theta$ ;  $\delta P_{г}$ ;  $\delta P_{х}$

1. Принимается общая концепция теплообменного аппарата

2. Определяются водяные эквиваленты теплоносителей:

$$W_r = G_{r1} \times C_{pr1}; W_x = G_{x1} \times C_{px1};$$

3. Определяются в первом приближении параметры теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата:

$$\text{если } W_r > W_x, \text{ то } T_{x2} = T_{x1} + (T_{r1} - T_{x1}) \times \Theta;$$

$$T_{r2} = T_{r1} - (T_{x2} - T_{x1}) \times W_x / W_r;$$

$$P_{x2} = P_{x1} \times (1 - \delta P_x); P_{r2} = P_{r1} \times (1 - \delta P_r);$$

4. Определяются в первом приближении средние значения параметров теплоносителей:

$$T_{r\text{ср}} = (T_{r2} + T_{r1})/2; T_{x\text{ср}} = (T_{x2} + T_{x1})/2;$$

$$P_{r\text{ср}} = (P_{r2} + P_{r1})/2; P_{x\text{ср}} = (P_{x2} + P_{x1})/2;$$

5. Задаются в первом приближении скорости теплоносителей:  $\underline{v}_{\Gamma\text{ср}}$ ;  $\underline{v}_{\text{хср}}$ ; (для капельных жидкостей 0,3 – 3 м/с для газов 5 – 30 м/с);

6. Справочные данные:  $C_p$ ;  $q$ ;  $\nu$ ;  $\mu$ ;  $\lambda$ ;  $Pr$ ; ...

7. Определяются критерии подобия:

$$Re = \underline{v} \times d / \nu; Re_{\Gamma} = \underline{v}_{\Gamma\text{ср}} \times d_{\text{э}\Gamma} / \nu_{\Gamma\text{ср}}; Re_x = \underline{v}_{\text{хср}} \times d_{\text{э}x} / \nu_{\text{хср}};$$

$$Nu = f(Re, Pr);$$

8. Определяются коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопередачи:

$$\alpha_{\Gamma} = Nu_{\Gamma} \times \lambda_{\Gamma} / d_{\Gamma\text{э}}; \alpha_x = Nu_x \times \lambda_x / d_{\text{э}x}; k = 1 / (1/\alpha_{\Gamma} + \delta_{\text{тп}} / \lambda_{\text{тп}} + 1/\alpha_x);$$

9. Два метода расчета площади теплообменной поверхности:

1

2

По среднему температурному напору

По числу единиц переноса

9.1. Определяется средний температурный напор:

Среднеарифметический

$$\Delta T_{cp} = ((T_{r1} - T_{x2}) + (T_{r2} - T_{x1}))/2;$$

или среднелогарифмический

$$\Delta T_{cp} = ((T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1}))/\ln((T_{r1} - T_{x2})/(T_{r2} - T_{x1}));$$

9.2. Определяется площадь теплообменной поверхности:

$$F_{\text{тп}} = (T_{x2} - T_{x1}) \times W_x / k / \Delta T_{cp};$$

9.1. Определяется необходимое число единиц переноса:

$$NTU = f(\Theta; \text{конструктивной схемы})$$

9.2. Определяется площадь теплообменной поверхности:

$$F_{\text{тп}} = NTU \times W_x / k;$$



Рис. 1. Схема противоточного теплообменника



Рис. 2. Схема теплообменника с параллельным однонаправленным движением теплоносителей

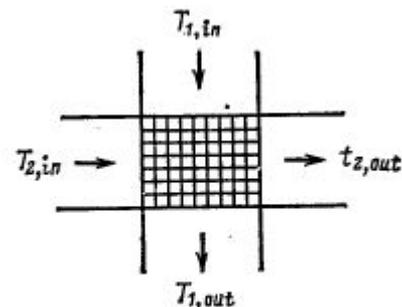


Рис. 3. Схема теплообменника с перекрестным током теплоносителей

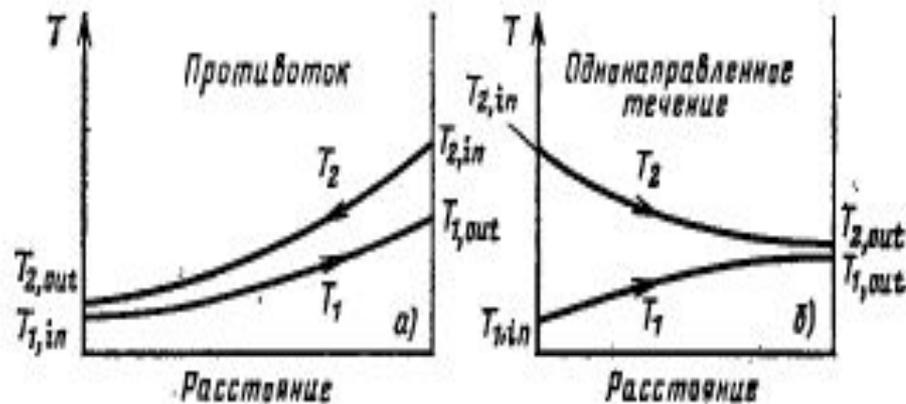


Рис. 1. Распределение температур в противоточном теплообменнике (а) и в теплообменнике с однонаправленным движением теплоносителей (б)

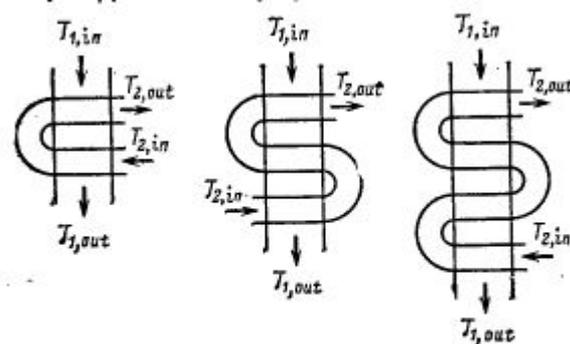


Рис. 4. Схема теплообменников со смешанным движением теплоносителей (перекрестный ток с противотоком)

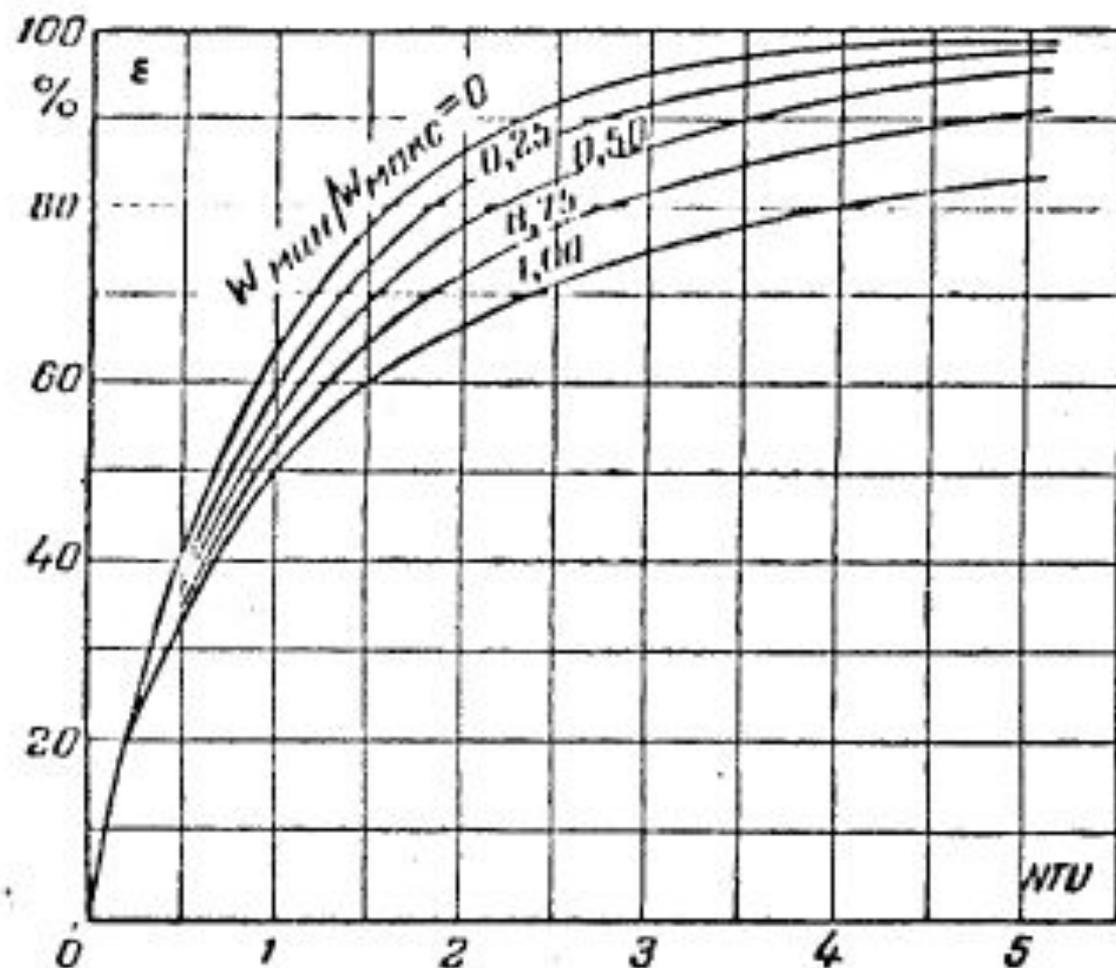
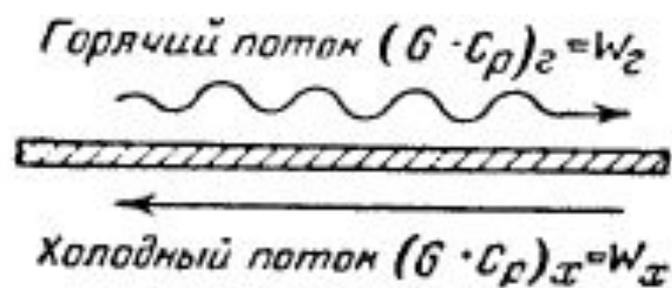
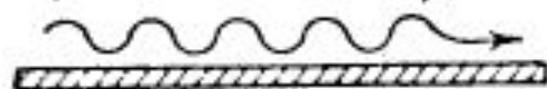


Рис. 9. Характеристика противоточного теплообменника.  
 $NTU_{\max} = kF/W_{\min}$ .

Горячий поток  $(W \cdot c_p)_g = W_a$



Холодный поток  $(W \cdot c_p)_x = W_x$

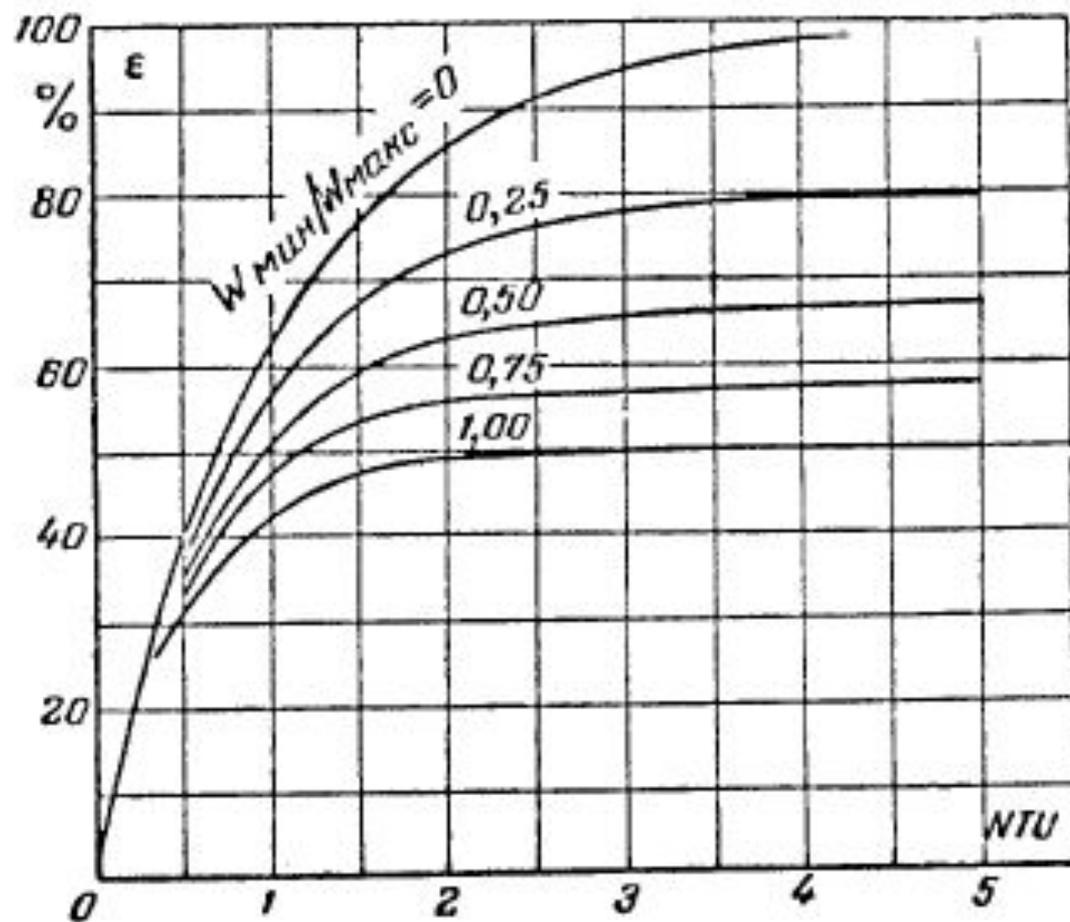


Рис. 10. Характеристика прямоточного теплообменника.

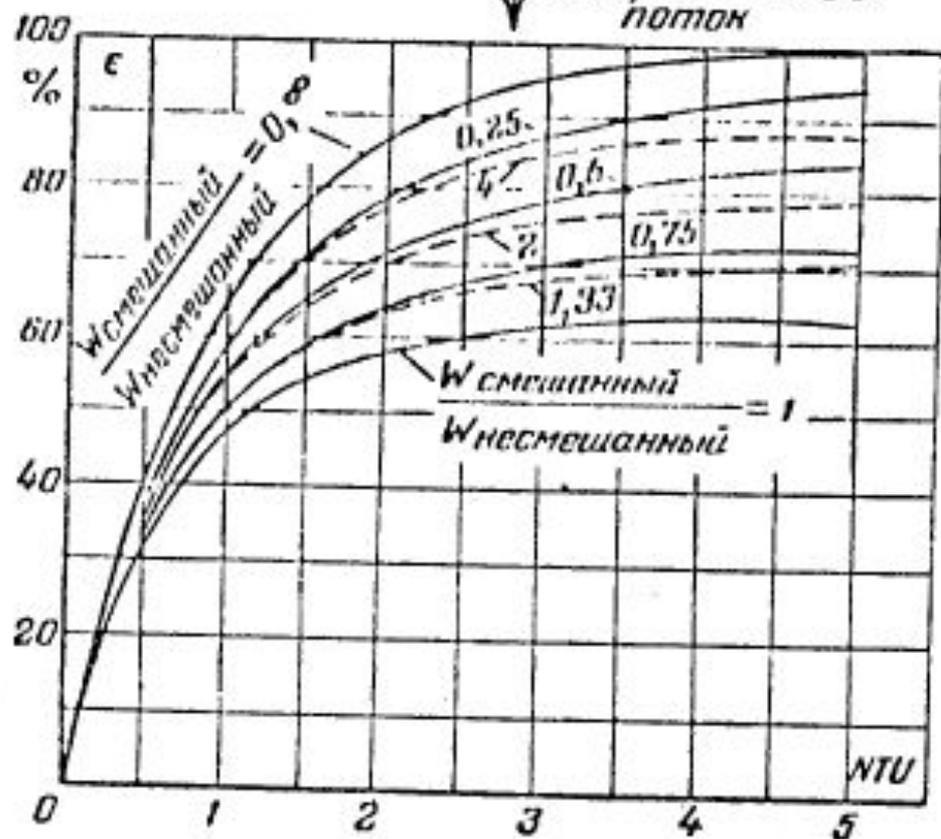
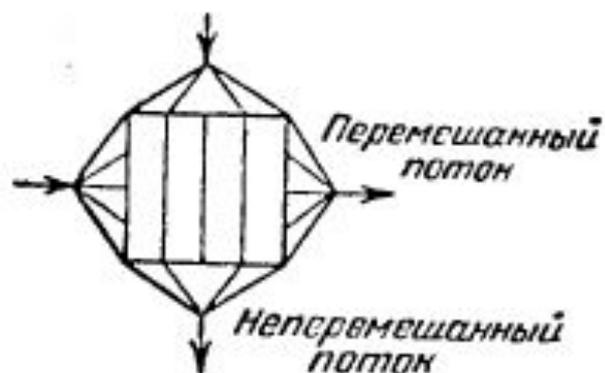


Рис. 11. Характеристика перекрестноточного теплообменника (один поток перемешивается).

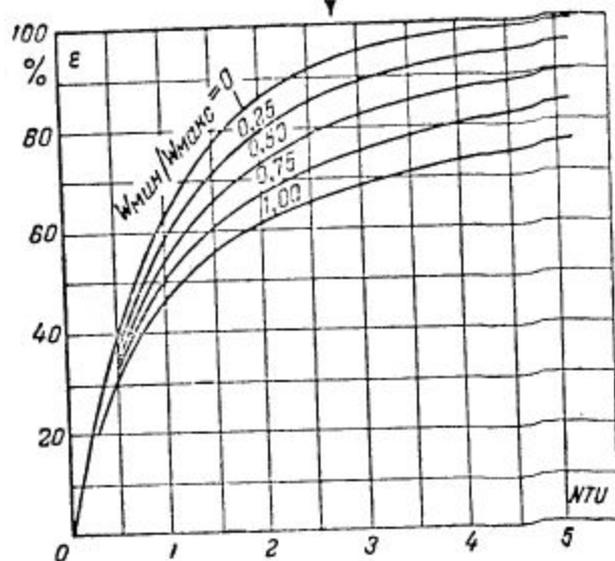
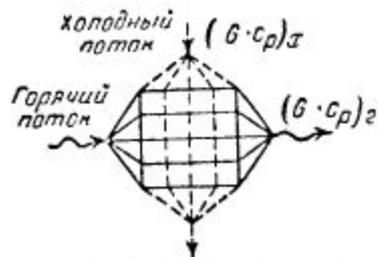


Рис. 12. Характеристика перекрестноточного теплообменника (оба потока не перемешиваются).

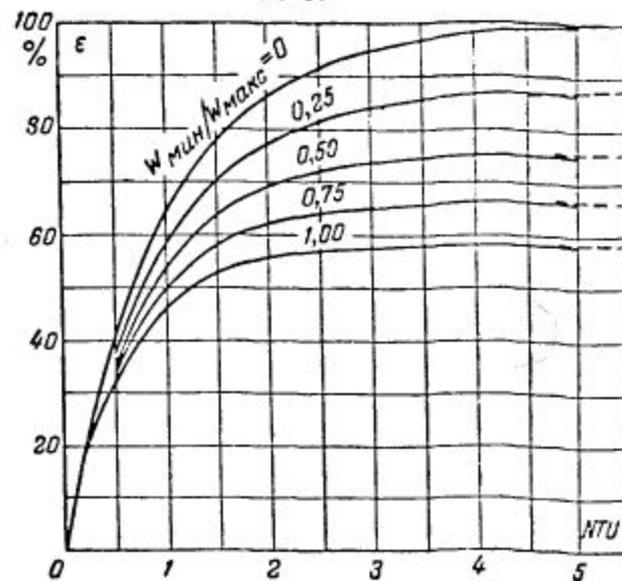


Рис. 13. Характеристика прямоточно-противоточного теплообменника по схеме 1—2.

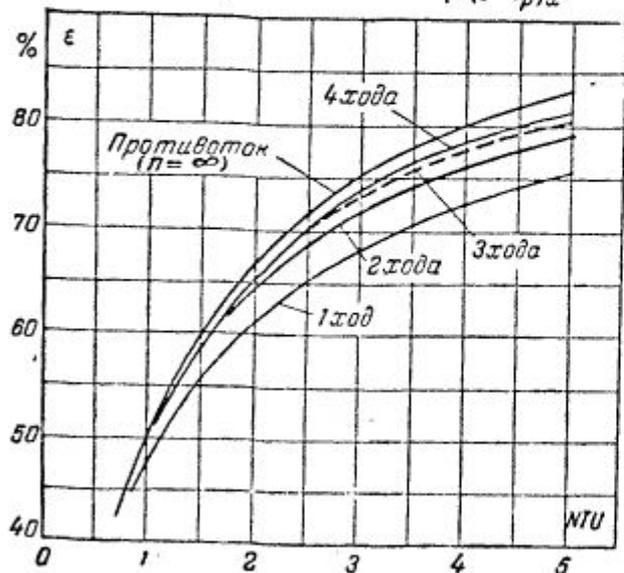
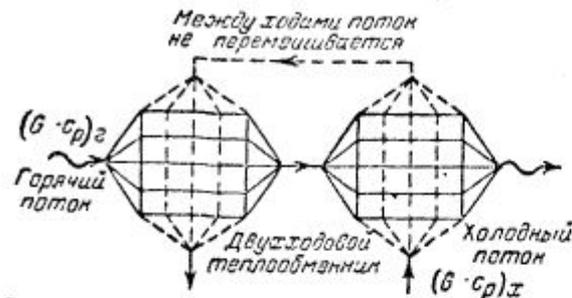


Рис. 14. Характеристика многоходового перекрестно-противоточного теплообменника.  $W_{\min}/W_{\max} = 1$ .

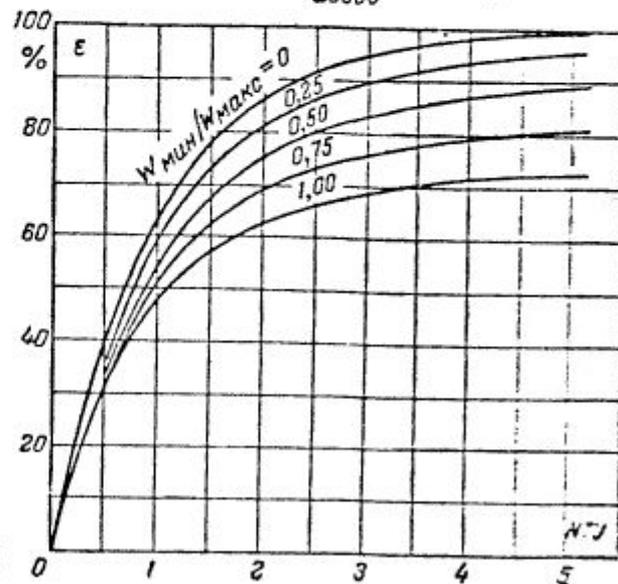
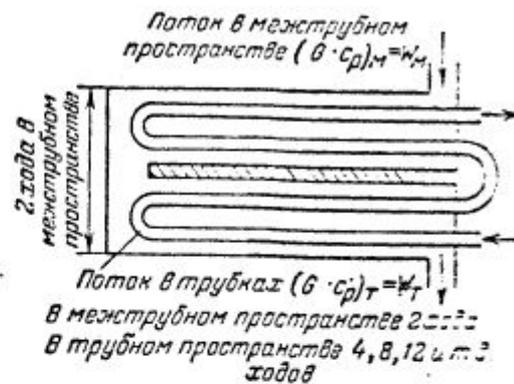


Рис. 15. Характеристика многоходового противоточного теплообменника по схеме 2—4.

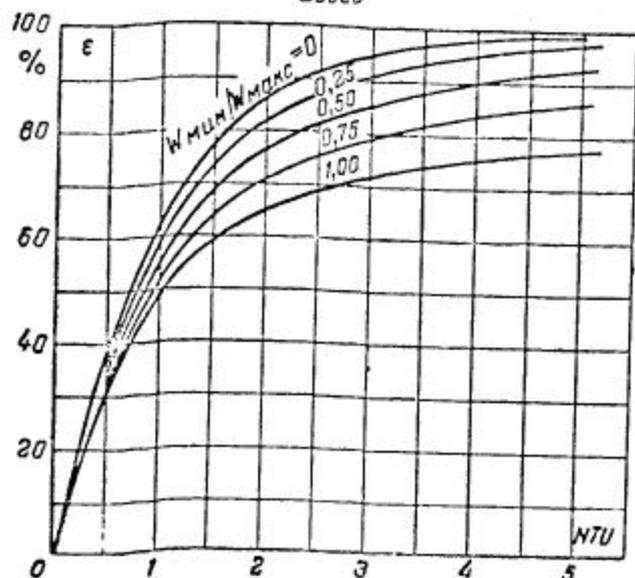


Рис. 16. Характеристика многоходового противоточного теплообменника по схеме 3—6.

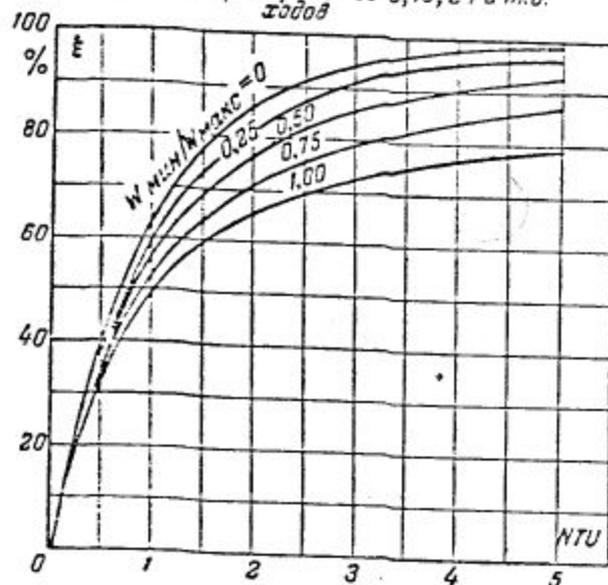


Рис. 17. Характеристика многоходового противоточного теплообменника по схеме 4—8.

10. Определяются основные конструктивные показатели:

$$\begin{aligned}V_{\text{ТП}} &= F_{\text{ТП}} \times \delta_{\text{ТП}}; & m_{\text{ТП}} &= V_{\text{ТП}} \times \rho_{\text{ТП}}; \\V_{\text{ГМ}} &= F_{\text{ТП}} \times d_{\text{ГЭ}}/4; & V_{\text{ХМ}} &= F_{\text{ТП}} \times d_{\text{ХЭ}}/4; & V_{\text{та}} &= V_{\text{ГМ}} + V_{\text{ХМ}}; \\F_{\text{фГ}} &= G_{\text{гср}}/\rho_{\text{гср}}/\underline{V}_{\text{гср}}; & F_{\text{фХ}} &= G_{\text{хср}}/\rho_{\text{хср}}/\underline{V}_{\text{хср}}; \\l_{\text{Г}} &= V_{\text{ГМ}}/F_{\text{фГ}}; & l_{\text{Х}} &= V_{\text{ХМ}}/F_{\text{фХ}};\end{aligned}$$

11. Определяются скорости течения теплоносителей в элементах раздающей системы:

$$\underline{V}_{\text{Гi}} = G_{\text{Гi}}/\rho_{\text{Гi}}/F_{\text{фГi}}; \quad \underline{V}_{\text{Хi}} = G_{\text{Хi}}/\rho_{\text{Хi}}/F_{\text{фХi}};$$

12. Определяются коэффициенты гидравлического сопротивления:

$$\xi = f(\text{Re}, \text{формы каналов}); \quad \xi_{\text{Г}} = f(\text{Re}_{\text{Г}}); \quad \xi_{\text{Х}} = f(\text{Re}_{\text{Х}}); \quad \xi_{\text{Гi}} = f(\text{Re}_{\text{Гi}}); \quad \xi_{\text{Хi}} = f(\text{Re}_{\text{Хi}});$$

13. Определяются гидравлические сопротивления:

$$\Delta P = (\ell / d_3) \times \xi \times \rho \times (V)^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{гм}} = (\ell_{\text{г}} / d_{\text{эг}}) \times \xi_{\text{гср}} \times \rho_{\text{гср}} \times (V_{\text{гср}})^2 / 2;$$

$$(V_{\text{хср}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{хм}} = (\ell_{\text{х}} / d_{\text{эх}}) \times \xi_{\text{хср}} \times \rho_{\text{хср}} \times$$

$$\Delta P_{\text{ги}} = \xi_{\text{ги}} \times \rho_{\text{ги}} \times (V_{\text{ги}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{хи}} = \xi_{\text{хи}} \times \rho_{\text{хи}} \times (V_{\text{хи}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{г}} = \Delta P_{\text{гм}} + \sum \Delta P_{\text{ги}};$$

$$\Delta P_{\text{х}} = \Delta P_{\text{хм}} + \sum \Delta P_{\text{хи}};$$

14. Определяются относительные потери давления:

$$\delta P_{\text{г}} = \Delta P_{\text{г}} / P_{\text{г1}};$$

$$\delta P_{\text{х}} = \Delta P_{\text{х}} / P_{\text{х1}};$$

# Расчеты с целью определения характеристик теплообменников (прямая задача)

Исходные данные для определения характеристик теплообменников:

Вид (вещество) теплоносителей: воздух, вода, газ (состав), жидкость (состав)

Исходные параметры теплоносителей:  $T_{г1}, P_{г1}, G_{г1}, T_{х1}, P_{х1}, G_{х1}$

Полное описание конструкции:

$F_{тп}; F_{вх}; F_{вых}; F_{фг}; F_{фх}; d_{гэ}; d_{хэ}; \delta_{тп}; \ell_{г}; \ell_{х};$

1. Принимается общая концепция теплообменного аппарата

2. Определяются водяные эквиваленты теплоносителей:

$$W_r = G_{r1} \times C_{pr1}; W_x = G_{x1} \times C_{px1};$$

3. Определяются в первом приближении параметры теплоносителей на выходе из теплообменного аппарата:

$$\text{если } W_r > W_x, \text{ то } T_{x2} = T_{x1} + (T_{r1} - T_{x1}) \times \Theta;$$

$$T_{r2} = T_{r1} - (T_{x2} - T_{x1}) \times W_x / W_r;$$

$$P_{x2} = P_{x1} \times (1 - \delta P_x); P_{r2} = P_{r1} \times (1 - \delta P_r);$$

4. Определяются в первом приближении средние значения параметров теплоносителей:

$$T_{r\text{ср}} = (T_{r2} + T_{r1})/2; T_{x\text{ср}} = (T_{x2} + T_{x1})/2;$$

$$P_{r\text{ср}} = (P_{r2} + P_{r1})/2; P_{x\text{ср}} = (P_{x2} + P_{x1})/2;$$

5. Определяются скорости теплоносителей:

$$\underline{v}_{\text{гср}} = G_{\text{гср}} / \rho_{\text{гср}} / F_{\text{фг}};$$

$$\underline{v}_{\text{хср}} = G_{\text{хср}} / \rho_{\text{хср}} / F_{\text{фх}};$$

6. Справочные данные:  $C_p$ ;  $\rho$ ;  $\nu$ ;  $\mu$ ;  $\lambda$ ;  $Pr$ ; ...

7. Определяются критерии подобия:

$$Re = \underline{v} \times d / \nu; Re_{\Gamma} = \underline{v}_{\text{гср}} \times d_{\text{эГ}} / \nu_{\text{гср}}; Re_x = \underline{v}_{\text{хср}} \times d_{\text{эх}} / \nu_{\text{хср}};$$

$$Nu = f(Re, Pr);$$

8. Определяются коэффициенты теплоотдачи и коэффициент теплопередачи:

$$\alpha_{\Gamma} = Nu_{\Gamma} \times \lambda_{\Gamma} / d_{\Gamma\text{э}}; \alpha_x = Nu_x \times \lambda_x / d_{x\text{э}}; k = 1 / (1/\alpha_{\Gamma} + \delta_{\text{ТП}} / \lambda_{\text{ТП}} + 1/\alpha_x);$$

## 9. Два метода расчета температур теплоносителей на выходе из ТА:

1

2

По среднему температурному напору

По числу единиц переноса

9.1. Определяется средний температурный напор:

Среднеарифметический

$$\Delta T_{cp} = ((T_{r1} - T_{x2}) + (T_{r2} - T_{x1}))/2;$$

или среднелогарифмический

$$\Delta T_{cp} = ((T_{r1} - T_{x2}) - (T_{r2} - T_{x1}))/\ln((T_{r1} - T_{x2})/(T_{r2} - T_{x1}));$$

9.2. Определяются температуры теплоносителей на выходе из ТА:

$$Q_{та} = k \times F_{тп} \times \Delta T_{cp};$$

$$Q_{та} = (T_{x2} - T_{x1}) \times W_x; \quad Q_{та} = (T_{r1} - T_{r2}) \times W_r;$$

$$T_{x2} = T_{x1} + Q_{та} / W_x; \quad T_{r2} = T_{r1} - Q_{та} / W_r;$$

9.3. Определяется эффективность ТА:

$$\Theta = (T_{x2} - T_{x1}) / (T_{r1} - T_{x1});$$

9.1. Определяется число единиц переноса:

$$NTU = k \times F_{тп} / W_{min};$$

$$NTU = k \times F_{тп} / W_x;$$

9.2. Определяется эффективность ТА:

$$\Theta = f(NTU; \text{конструктивной схемы})$$

9.3. Определяются температуры теплоносителей на выходе из ТА:

$$T_{x2} = T_{x1} + (T_{r1} - T_{x1}) \times \Theta;$$

$$T_{r2} = T_{r1} - (T_{x2} - T_{x1}) \times W_x / W_r;$$

13. Определяются гидравлические сопротивления:

$$\Delta P = (\ell / d_3) \times \xi \times \rho \times (V)^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{гм}} = (\ell / d_{\text{эр}}) \times \xi_{\text{гср}} \times \rho_{\text{гср}} \times (V_{\text{гср}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{хм}} = (\ell / d_{\text{эх}}) \times \xi_{\text{хср}} \times \rho_{\text{хср}} \times$$

$$(V_{\text{хср}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{гi}} = \xi_{\text{гi}} \times \rho_{\text{гi}} \times (V_{\text{гi}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{xi}} = \xi_{\text{xi}} \times \rho_{\text{xi}} \times (V_{\text{xi}})^2 / 2;$$

$$\Delta P_{\text{г}} = \Delta P_{\text{гм}} + \sum \Delta P_{\text{гi}};$$

$$\Delta P_{\text{х}} = \Delta P_{\text{хм}} + \sum \Delta P_{\text{xi}};$$

14. Определяются относительные потери давления:

$$\delta P_{\text{г}} = \Delta P_{\text{г}} / P_{\text{г1}};$$

$$\delta P_{\text{х}} = \Delta P_{\text{х}} / P_{\text{х1}};$$

15. Определяются давления теплоносителей на выходе из ТА:

$$P_{\text{х2}} = P_{\text{х1}} \times (1 - \delta P_{\text{х}}); P_{\text{г2}} = P_{\text{г1}} \times (1 - \delta P_{\text{г}});$$

$$\frac{dq}{dF} = k(t_r - t_x).$$

$$Q = kF \epsilon_{\Delta t} \Delta t_{\text{лог}},$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}$$

$$\bar{\Delta t} = \frac{(t_1' - t_2'') - (t_1'' - t_2')}{\ln \frac{t_1' - t_2''}{t_1'' - t_2'}}.$$

$$\alpha = \text{Nu} \times \lambda / d_3$$

$$\text{Nu} = f(\text{Pr}, \text{Gr}, \text{Re}, M, \gamma)$$

$$\text{Nu} = C_1 \text{Gr}^{m_1} \text{Pr}^{n_1},$$

$$\text{Nu} = C_2 \text{Re}^{m_2} \text{Pr}^{n_2},$$

$$\text{Re} = v \times d_3 / \nu$$

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\eta c_p}{\kappa},$$

$$d_3 = 4 \times F_\phi / \Pi$$

$$E = \frac{1 - \exp\left[-\left(1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}\right) \frac{kF}{C_{min}}\right]}{1 + \frac{C_{min}}{C_{max}}}.$$

$$E = f\left(\frac{C_{min}}{C_{max}}; \kappa\right),$$

где  $\kappa = \frac{kF}{C_{min}}$  - безразмерный коэффициент теплопередачи,

$$\Delta p = \zeta \frac{\rho w^2}{2},$$

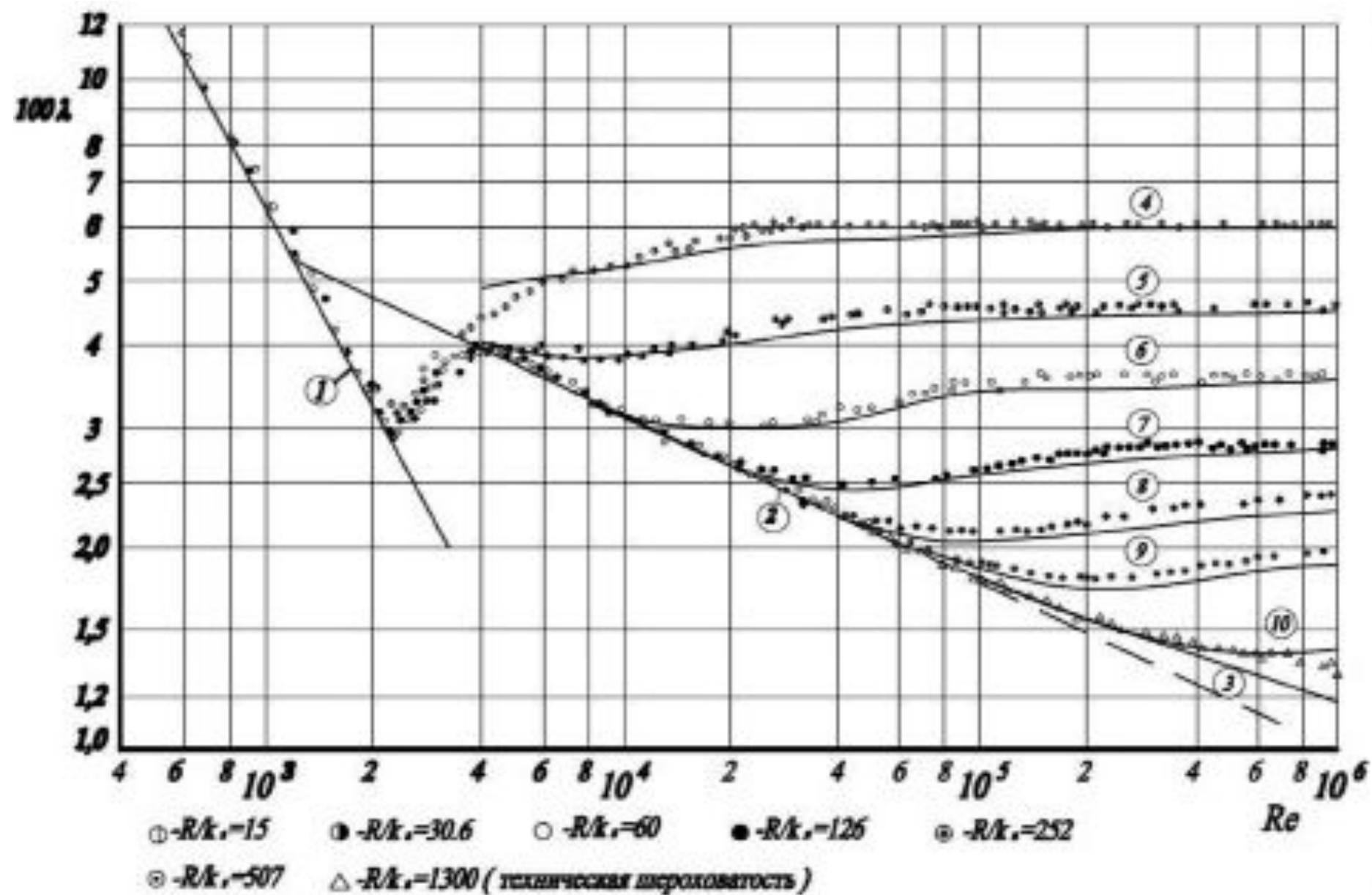
$$\Delta h = \zeta \frac{w^2}{2g}.$$

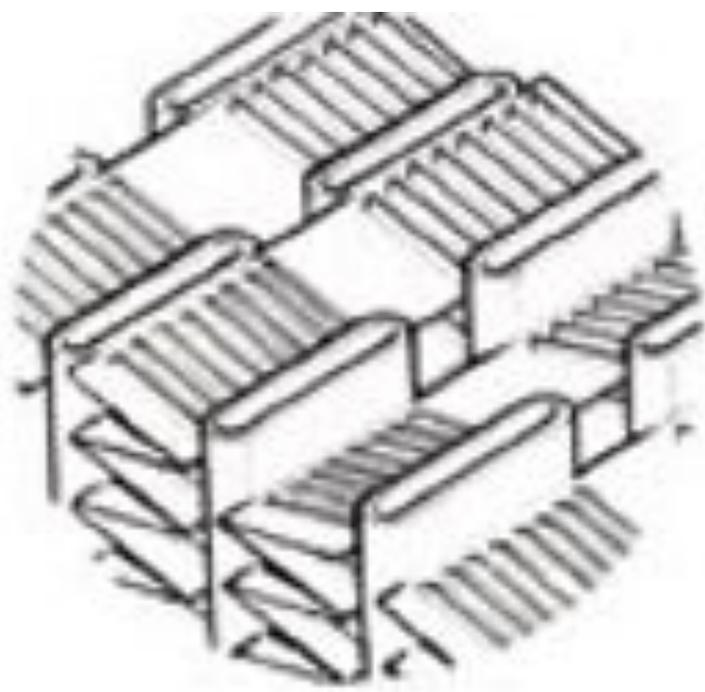
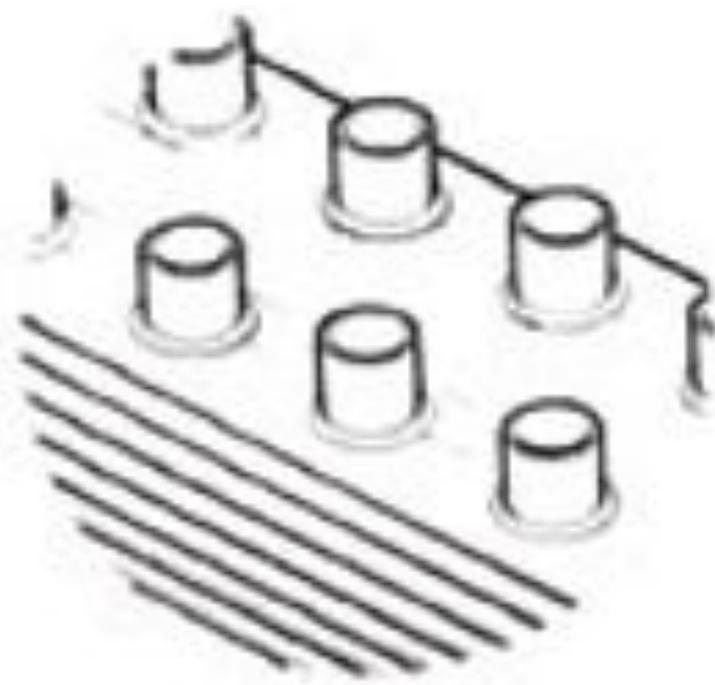
Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям/ Под ред. М. О. Штейнберга.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.; Машиностроение, 1992.— 672 с: ил.

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho w^2}{2}; \quad \lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad \lambda = \frac{0,3164}{\sqrt[4]{\text{Re}}}$$

Кейс В.М., Лондон А.Л. Компактные теплообменники. М.-Л.: Энергоатомиздат, 1982.

Тихонов А.М. Регенерация тепла в авиационных ГТД. -М.: Машиностроение, 1977. - 210 с.







Engine Oil Cooling

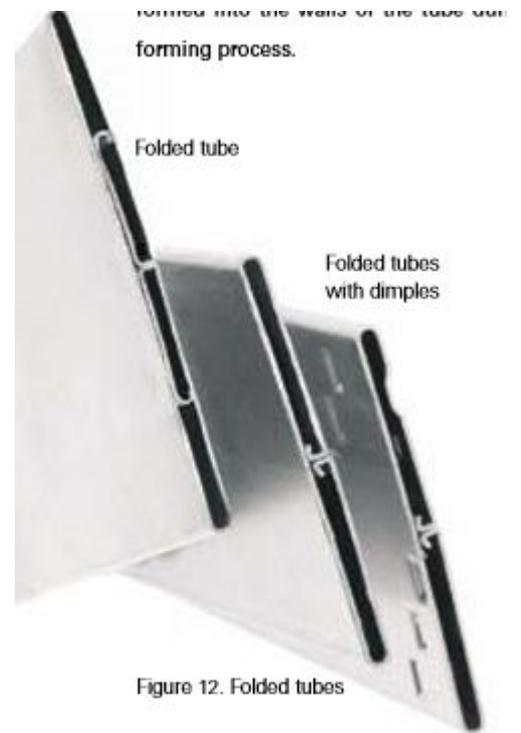


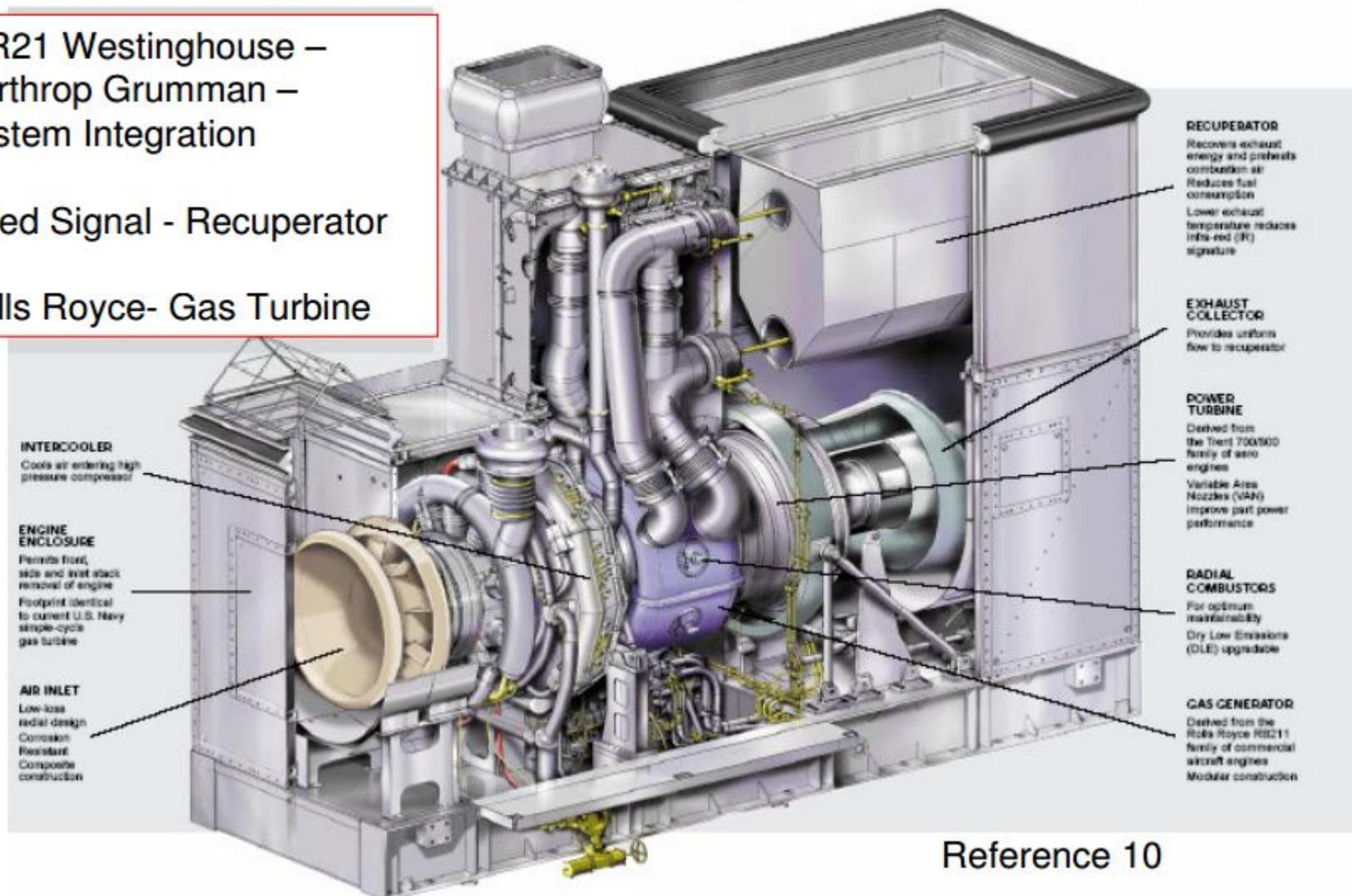
Figure 12. Folded tubes

# 20 MW Navy Propulsion – the WR21 Intercooled Recuperated Gas Turbine

WR21 Westinghouse –  
Northrop Grumman –  
System Integration

Allied Signal - Recuperator

Rolls Royce- Gas Turbine



Reference 10

Solar Turbines Centaur-50,  
**The only commercial Industrial recuperated gas turbine engine**

4 to 5 MW

