

# Примеры решения задач

(расчётно-графическая работа №1)

## *Методические рекомендации выполнения расчётно-графической работы*

Студенты получают задания на выполнение расчётно-графической работы и берут их из персонального сайта [Официальный сайт Борисов Ю.А.](#). На кафедре также имеются печатные экземпляры.

При выполнении своих вариантов студенты используют приведённые на сайте примеры решения задач.

В процессе выполнения заданий студенты также используют справочный материал, лекции, усваивают основные понятия технической термодинамики и теплотехники, используют основные уравнения законов термодинамики для расчётов термодинамических процессов в теплотехнических устройствах; расчётов процессов теплопередачи в термодинамических системах по предложенному алгоритму; используют инварианты термодинамического подобия; выполняют расчёты передачи теплоты в различных теплообменных аппаратах; учатся выполнять расчёты параметров теплоотдачи в теплотехнических устройствах. При решении задач студенты усваивают и закрепляют понятия технической термодинамики и теплотехники, физических величин, характеризующих эти понятия (температуры, давления, внутренней энергии, энтропии и др.), их обозначений и единиц измерения.

Необходимым условием сдачи зачёта по расчётно-графической работе является собеседование с преподавателем по двум-трём задачам, объяснение студентом методики решения задачи (т.е. её воспроизведения), умение ответить на несколько простых вопросов преподавателя.

Примеры решения задач по **теплотехнике**. **Контрольная работа №1**.

Задача №1

Решение :

Дано:

$$\delta_c = 16 \text{ мм} = 0,016 \text{ м},$$

$$\delta_H = 0,9 \text{ мм} = 0,9 * 10^{-3} \text{ м},$$

$$\alpha_1 = 35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{ч}},$$

$$\alpha_2 = 3600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{ч}},$$

$$t_1 = 700^\circ\text{C},$$

$$t_4 = 120^\circ\text{C},$$

$$t_5 = 120^\circ\text{C},$$

$$\lambda_c = 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{C}},$$

$$\lambda_H = 1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} * \text{C}}.$$

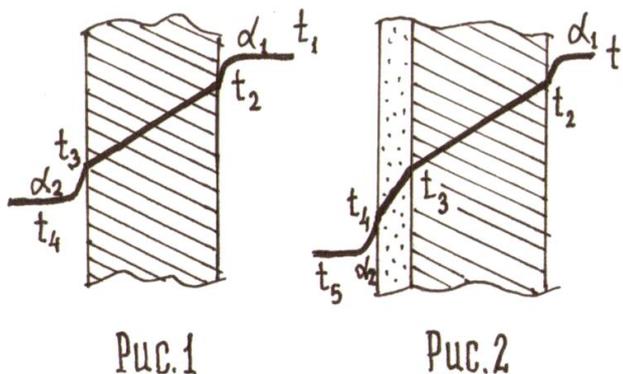


Схема приведена на рис. 1.

$$1. K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{35} + \frac{0,016}{50} + \frac{1}{3600}} = \frac{1}{0,0292} = 34,2 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{C}} \right).$$

Удельный тепловой поток:

$$q_1 = K_1(t_1 - t_4) = 34,2(700 - 120) = 19840 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right).$$

$$K_1 = ? \quad q_1 = ? \quad t_2 = ? \quad t_3 = ?$$

$$K_2 = ? \quad q_2 = ? \quad t_2 = ? \quad t_4 = ?$$

Определяем температуры:

$$1) q_1 = \alpha_1(t_1 - t_2); t_2 = t_1 - \frac{q_1}{\alpha_1} = 700 - \frac{19840}{35} = 133(^\circ\text{C});$$

$$2) q_1 = \frac{\lambda_c}{\delta_c}(t_2 - t_3); t_3 = t_2 - \frac{q_1 * \delta_c}{\lambda_c} = 133 - \frac{19840 * 0,016}{50} = 126,5(^\circ\text{C});$$

$$3) q_1 = \alpha_2(t_4 - t_3); t_3 = \frac{q_1}{\alpha_2} + t_4 = \frac{19840}{3600} + 120 = 126(^\circ\text{C}).$$

Схема теплопередачи приведена на рис. 2.

$$2. K_2 = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} + \frac{\delta_H}{\lambda_H} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{35} + \frac{0,016}{50} + \frac{0,9 * 10^{-3}}{1} + \frac{1}{3600}} = \frac{1}{0,03} = 33,3 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{C}} \right);$$

$$q_2 = K_2(t_1 - t_5) = 33,3(700 - 120) = 19314 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right);$$

$$1) t_2 = t_1 - \frac{q_1}{\alpha_1} = 700 - \frac{19314}{35} = 148(^\circ\text{C});$$

$$2) t_3 = t_2 - \frac{q_2 * \delta_c}{\lambda_c} = 148 - \frac{19314 * 0,016}{50} = 142(^\circ\text{C});$$

$$3) t_4' = 142 - \frac{19314 * 0,9 * 10^{-3}}{1} = 125(^{\circ}\text{C});$$

$$4) t_4 = \frac{19314}{3600} + 120 = 125,5(^{\circ}\text{C}).$$

Ответ: 1.  $K_1 = 34,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^{\circ}\text{C}}$ ;  $q_1 = 19840 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;  $t_2 = 133^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3 = 126^{\circ}\text{C}$ .

2.  $K_2 = 33,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^{\circ}\text{C}}$ ;  $q_2 = 19314 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;  $t_2 = 148^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3 = 142^{\circ}\text{C}$ ;  $t_4 = 125,5^{\circ}\text{C}$ .

### Задача №2.

#### Дано:

Пятирядный пучок труб

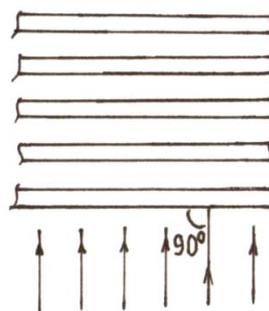
при поперечном его  
обтекании.

$$t_{\text{воз}} = 500^{\circ}\text{C},$$

$$w = 11,3 \frac{\text{м}}{\text{с}},$$

$$d = 82 \text{мм} = 0,082 \text{ м}.$$

### Решение :



При многорядном расположении труб (5-ти рядное шахматное расположение труб) критерий Нуссельта вычисляется:

$$Nu = 0,27 * c_z * Re^{0,6}$$

$$\alpha = ?$$

При пятирядном пучке шахматного расположения  $c_z = 0,9$ .

$$Nu = 0,27 * 0,9 * Re^{0,6}; Re = \frac{w * d * \rho}{\mu};$$

$$\rho_{\text{в}} = 1,293 * \frac{273}{773} = 0,457 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right);$$

$$Re = \frac{w * d * \rho}{\mu} = \frac{11,3 * 0,082 * 0,457}{0,035 * 10^{-3}} = 12,1 * 10^3 \text{ при } 500^{\circ}\text{C } \mu = 0,035 * 10^{-3} \text{ Па * с}.$$

$$Nu = 0,27 * 0,9 * (12,1 * 10^3)^{0,6} = 0,243 * 281,6 = 68,43.$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = \frac{Nu * \lambda}{d} = \frac{68,43 * 0,0575}{0,082} = 47,9 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^{\circ}\text{C}} \right).$$

Ответ:  $\alpha = 47,9 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^{\circ}\text{C}}$

### Задача №3

### Решение :

Дано:

$$d = 200 \text{ мм} = 0,2 \text{ м},$$

$$t_c = 180 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_B = 25 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Коэффициент теплопередачи через стенку определяется:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_c}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_B}} = \alpha_B, \text{ т. к.}$$

$q = ?$

$\alpha_B$  - коэффициент теплоотдачи воздуху.

$$\frac{1}{\alpha_1} \approx 0 \text{ и } \frac{\delta_c}{\lambda_{ст}} \approx 0$$

В таком случае, для одиночной горизонтальной трубы, критерий  $Nu$  определяется :

$Nu = 0,5(Gr * Pr)^{0,25} * (Pr/Pr_{ст})^{0,25}$ , здесь  $Pr/Pr_{ст}$  - не рассчитывается, т.е  $Pr/Pr_{ст} = 1$ .  $Gr$  лучше определять по номограмме (Павлов, стр. 563 и 160), а критерий  $Pr$ - по нашей таблице (Приложение 4). Тогда  $Nu = 90$ ,  $\lambda$  берем из приложения 3.

$$\text{Отсюда: } \alpha_B = \frac{Nu * \lambda}{d} = \frac{90 * 2,44 * 10^{-2}}{0,22} = 9,98 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ\text{C}}.$$

Удельный тепловой поток (или потери тепла) будет:  $q = K(180 - 25) = 9,98 * 155 = 1550 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ\text{C}}.$

$$\text{Ответ: } q = 1550 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * ^\circ\text{C}}.$$

#### Задача №4

#### Решение :

##### Дано:

$$t_1 = 380 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\varepsilon_1 = 0,62,$$

$$\varepsilon_2 = 0,35,$$

$$\varepsilon_3 = 0,22.$$

---

$$E_1 = ? \quad E_2 = ?$$

Излучательная способность тела определяется законом Стефана – Больцмана:

$$E_0 = C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4,$$

где  $C_0 = 5,7 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$  - коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $[E_0] = \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$ ;

если - серое тело, то:  $E = \varepsilon E_0$ , или  $C = C_0 \varepsilon$ , т.е.

$$E = \varepsilon C_0 \left( \frac{T}{100} \right)^4.$$

Если тела два в виде плоскостей, то:

$$1) E_1 = C_{1,2} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right], \text{ здесь } C_{1,2} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{5,7}};$$

$C_1 = 0,62 * 5,7 = 3,53$ ;  $C_2 = 0,35 * 5,7 = 1,75$ ;  $C_3 = 0,22 * 5,7 = 1,25$ . Тогда:

$$E_1 = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} - \frac{1}{5,7}} \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{0,679} (1818 - 84,3) = \frac{1733}{0,679} = 2552 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

- 2) Во втором случае, когда между плоскостями помещают листовой экран, то его температура будет близка к комнатной, т.е. ко 2-й плоскости и тогда теплообмен между экраном и 2-й плоскостью будет отсутствовать, т.к.  $T_1 \approx T_2$ . Если пойти другим путем и не учитывать отдачу тепла от экрана, то это будет противоречить объективным данным, т.к. тогда надо считать температуру экрана равной

абсолютному нулю, чего не может быть.

$$E_2 = \frac{1}{\frac{1}{C_1=3,53} + \frac{1}{C_3=1,25} - \frac{1}{5,7}} \left[ \left( \frac{653}{100} \right)^4 - \left( \frac{303}{100} \right)^4 \right] = \frac{1}{1,19} 1818 = 1998 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ:  $E_2 < E_1$ , т.е. теплообмен уменьшается, т.к.  $\varepsilon_3 < \varepsilon_2$ , т.е. поглощательная способность экрана меньше, чем 2-й плоскости.

### Задача №5.

### Решение :

Дано:

$$V_H = 15 * 10^3 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}} = 4,17 \frac{\text{м}^3}{\text{с}},$$

$$K = 23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{град}},$$

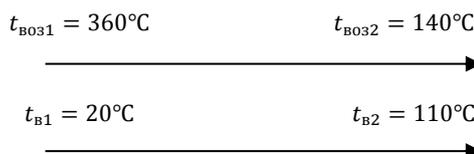
$$t_{\text{в0з1}} = 360^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{в0з2}} = 140^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{в1}} = 20^\circ\text{C},$$

$$t_{\text{в2}} = 110^\circ\text{C}.$$

1) Прямоточное движение теплоносителей



Найдем среднюю температуру:

$$F = ?$$

$$\text{Если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} < 2, \text{ то } \Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_M}{2};$$

$$\text{Если } \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M} > 2, \text{ то } \Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{2,3 * \lg \frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}};$$

$$\text{определим } \frac{\text{ВХОД } \Delta t_6}{\text{ВЫХОД } \Delta t_M} = \frac{340}{30} = 12,33 > 2;$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{340 - 30}{2,3 * \lg \frac{340}{30}} = \frac{310}{2,3 * 1,054} = 127,9^\circ\text{C}.$$

Количество теплоты, отдаваемое воздухом:

$$Q_1 = \alpha_1 * F(t_{\text{в0з1}} - t_{\text{в0з2}}), \text{ т. е. } Q_1 \sim F;$$

Количество теплоты, получаемое водой:

$$Q_2 = \alpha_2 * F(t_{\text{в2}} - t_{\text{в1}}), \text{ т. е. } Q_2 \sim F;$$

$$\text{Объемный расход воздуха } V = w * F, \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

$$\text{Массовый расход воздуха } G = w * F * \rho, \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \text{ или } G = V * \rho = 4,17 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} * 0,863 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 3,60 \frac{\text{кг}}{\text{с}}; \text{ здесь}$$

$$\rho_{\text{возд}} = 1,293 * \frac{273}{403} = 0,863 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3},$$

$$c_{\text{мол}} = 29 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль*град}};$$

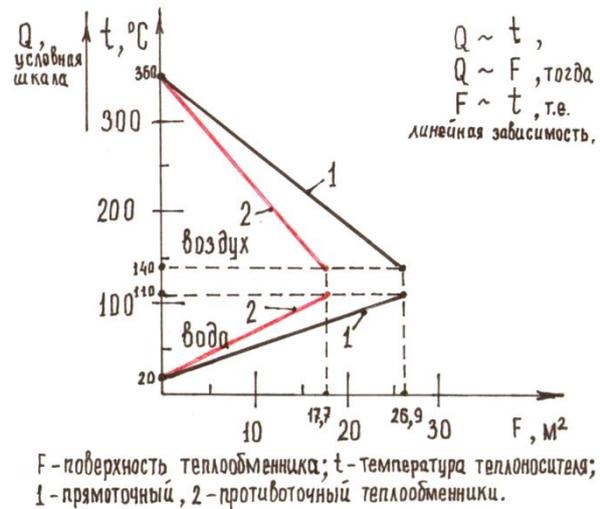
$$c_{\text{мол}} = 29 \frac{\text{Дж}}{0,029 \text{ кг*град}} = 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{кг*град}}$$

$$Q = c * G \Delta t = 1000 * 3,60 * (360 - 140) = 7,92 * 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \text{ -расход}$$

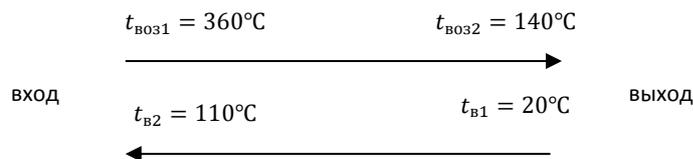
количества теплоты от воздуха

$$Q = K * F * \Delta t_{\text{ср}};$$

$$F = \frac{Q}{K * \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{7,92 * 10^5}{230 * 136} = 26,9 (\text{м}^2)$$



## 2) Противоточное движение теплоносителей



$$\frac{\text{ВХОД}}{\text{ВЫХОД}} \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}} = \frac{250}{120} = 2,08; > 2, \text{ то}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2,3 * \lg \frac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{250 - 120}{2,3 * \lg 2,08} = \frac{130}{2,3 * 0,32} = 176,6 (^{\circ}\text{C}).$$

Объемный расход воздуха остается прежним.

Его массовый расход будет:

$$G = V * \rho = 4,17 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} * 0,784 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = 3,27 \left( \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right) ;$$

$$\rho_{\text{возд}} = 1,293 * \frac{273}{450} = 0,7844 \left( \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right) .$$

Расход количества теплоты воздухом:

$$Q = c * G * \Delta t = 1000 * 3,27 * (360 - 140) = 7,2 * 10^5 \left( \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \right) ;$$

$$Q = K * F' * \Delta t_{\text{ср}} ;$$

$$F' = \frac{Q}{K * \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{7,2 * 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{с}}}{23 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 * \text{град}} * 177 \text{°C}} = 17,7 \text{ м}^2$$

$F' < F$ , т.е. противоточный теплообменник эффективнее прямоточного.

Для противоточного теплообменника и прямоточного строим графики (см. рисунок). Здесь видно, что площадь противоточного теплообменника меньше.

Ответ:  $F = 2,53 * 10^2 \text{ м}^2, F' = 17,7 \text{ м}^2$ .