

**Учебный курс**  
**«Термодинамика и теплопередача»**  
(Практическое занятие 3)

Для студентов по направлению подготовки  
**131000 Нефтегазовое дело**  
(квалификация (степень) «бакалавр»)

Преподаватель: д.т.н., профессор *Уразбахтин Фёдор Асхатович*

## Контрольная работа 2.

### Задача 1.

По стальной трубе с внешним диаметром  $d_n$  и толщиной стенки  $\delta$  течет вода, средняя температура которой  $t_v$ .

По *внутренней поверхности* труба покрыта слоем накипи толщиной 2 мм, имеющей коэффициент теплопроводности  $\lambda_{\text{нак}} = 0,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$ .

Снаружи трубопровод охлаждается воздухом с температурой  $t_{\text{воз}}$  при коэффициенте теплоотдачи  $\alpha_2$ .

Коэффициент теплоотдачи от воды к стенке трубопровода  $\alpha_1$   
Коэффициент теплопроводности материала трубы

$$\lambda_{\text{тр}} = 2,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{K}}$$

# Контрольная работа 2.

## Задача 1.

### Определить:

- коэффициент теплопередачи;
- погонный тепловой поток;
- температуры на поверхностях трубы и накипи;
- построить график изменения температуры по толщине трубопровода.

### Принимаемые допущения:

- тепловой режим считать стационарным;
- лучистым теплообменом пренебречь.

### Исходные данные:

$$\begin{aligned}d_n &= 56 \text{ мм} & \delta &= 8 \text{ мм} & \delta_{\text{нак}} &= 2 \text{ мм} & \alpha_2 &= 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°K}} \\t_e &= 75 \text{ °C} & t_{\text{воз}} &= 15 \text{ °C} & \alpha_1 &= 650 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°K}} \\ \lambda_{\text{тр}} &= 2,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°K}} & \lambda_{\text{нак}} &= 0,8 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{°K}}\end{aligned}$$

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

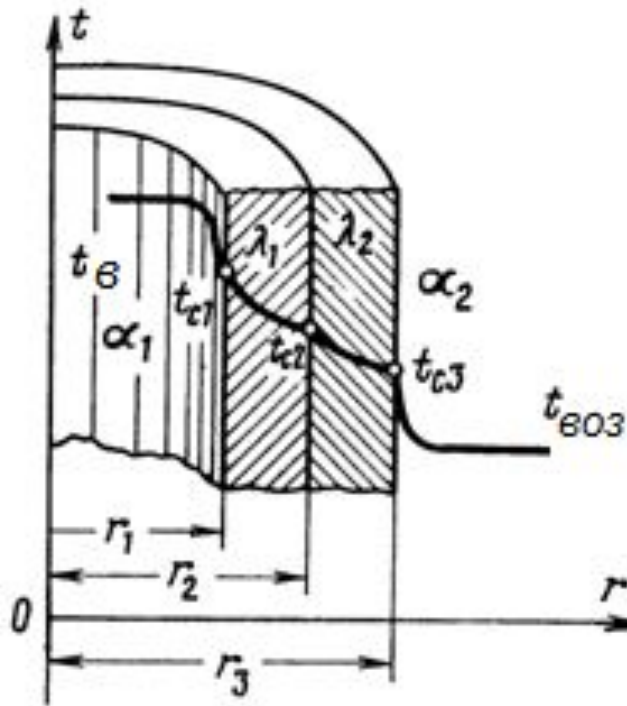
Расчетная схема представлена на рис.1. В ней:

$$\lambda_1 = \lambda_{\text{нак}}; \lambda_2 = \lambda_{\text{тр}};$$

$$r_3 = \frac{d_H}{2} = \frac{56}{2} = 28 \text{ мм};$$

$$r_2 = \frac{d_H}{2} - \delta = \frac{56}{2} - 8 = 20 \text{ мм};$$

$$r_1 = \frac{d_H}{2} - \delta - \delta_{\text{нак}} = \frac{56}{2} - 8 - 2 = 18 \text{ мм};$$



# Контрольная работа 2.

## Решение задачи 1.

### 1. Вычисление коэффициента теплопередачи и погонного теплового потока.

1.1. При установившемся тепловом состоянии системы удельный тепловой поток, проходящий через каждый слой, для всех слоев будет одинаков. Для каждой двухслойной стенки имеются такие выражения.

*При передаче от жидкости к накипи*

$$q = \alpha_1 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_1) (T_v - T_{c1}) \quad (1)$$

где  $T_v = t_v + 273,15 = 348,15 \text{ K}$ ;  $T_{c1} = t_{c1} + 273,15$ ;

*Первый слой - накипь*

$$q = \frac{\pi \cdot (T_{c1} - T_{c2})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_1} \ln \left( \frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (2) \quad \text{где} \quad T_{c2} = t_{c2} + 273,15;$$

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

Второй слой - труба

$$q = \frac{\pi \cdot (T_{c2} - T_{c3})}{\frac{1}{2 \cdot \lambda_2} \ln \left( \frac{r_3}{r_2} \right)} \quad (3) \quad \text{где} \quad T_{c3} = t_{c3} + 273,15;$$

При передаче от трубы к воздуху

$$q = \alpha_2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_3) (T_{c3} - T_{\text{воз}}) \quad (4)$$

$$\text{где} \quad T_{\text{воз}} = t_{\text{воз}} + 273,15 = 288,15 \text{ } ^\circ\text{K};$$

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

1.2. Преобразование уравнений (1)..(4):

$$T_{\text{в}} - T_{c1} = \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_1)}; \quad T_{c1} - T_{c2} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right);$$

$$T_{c2} - T_{c3} = \frac{q}{2 \cdot \pi \cdot \lambda_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right); \quad T_{c3} - T_{\text{воз}} = \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_3)};$$

1.3. Сложение преобразованных уравнений :

$$T_{\text{в}} - T_{\text{воз}} =$$
$$= \frac{q}{2 \cdot \pi} \left[ \frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 r_3} \right];$$

## Контрольная работа 2.

### Решение задачи 1.

1.4. Выражения для коэффициента теплопередачи двухслойной стенки и погонного теплового потока :

$$q = k \cdot \pi \cdot (T_{в} - T_{воз}) \quad \text{- погонный тепловой поток;}$$

$$k = \frac{2}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 r_3}};$$

- коэффициент теплопередачи

1.5. Вычисления:



## Контрольная работа 2.

### Решение задачи 1.

1.5. Вычисления:

а) коэффициент теплопередачи

$$k = \frac{2}{\frac{1}{\alpha_1 r_1} + \frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{1}{\alpha_2 r_3}} =$$
$$= \frac{2}{\frac{1}{650 \cdot 0,018} + \frac{1}{0,8} \ln\left(\frac{0,02}{0,018}\right) + \frac{1}{2,8} \ln\left(\frac{0,028}{0,020}\right) + \frac{1}{15 \cdot 0,028}} =$$
$$= 0,7358 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

б) погонный тепловой поток

$$q = k \cdot \pi \cdot (T_{\text{в}} - T_{\text{воз}}) =$$
$$= 0,7358 \cdot 3,141 \cdot (348,15 - 288,15) = 138,6689 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$$

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

### 2. Температуры на поверхностях трубы и накипи

Определяются из (1)..(3)

$$t_{c1} = T_{c1} - 273,15 = \left[ T_e - \frac{q}{\alpha_1 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_1)} \right] - 273,15 =$$
$$= \left[ 348,15 - \frac{138,6689}{650 \cdot 3,141 \cdot 2 \cdot 0,018} \right] - 273,15 = 73,11^\circ\text{C};$$

$$t_{c2} = T_{c2} - 273,15 = \left[ T_{c1} - \frac{q}{2 \cdot \lambda_1 \cdot \pi} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \right] - 273,15 =$$
$$= \left[ 346,26 - \frac{138,6689}{2 \cdot 0,8 \cdot 3,141} \ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right) \right] - 273,15 = 70,20^\circ\text{C};$$

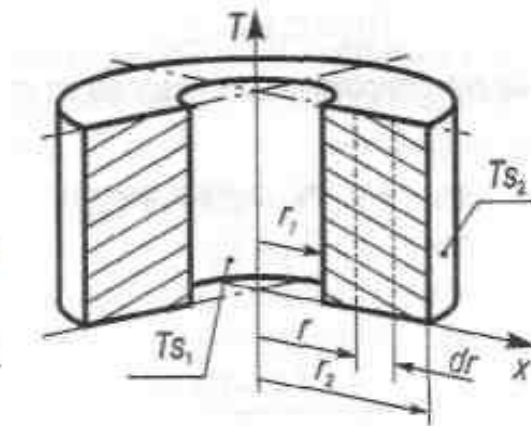
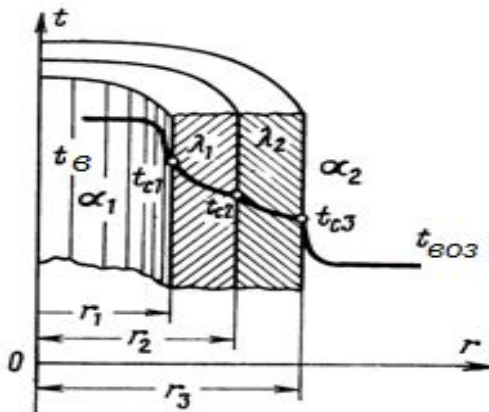
# Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

$$t_{c3} = T_{c3} - 273,15 = \left[ T_{\text{в03}} + \frac{q}{\alpha_2 \cdot \pi \cdot (2 \cdot r_3)} \right] - 273,15 =$$
$$= \left[ 288,15 + \frac{138,6689}{15 \cdot 3,141 \cdot 2 \cdot 0,028} \right] - 273,15 = 67,56 \text{ } ^\circ\text{C};$$

## 3. Построение графика изменения температуры по толщине трубопровода

### 3. 1. Аналитическое определение температурных зависимостей



Рассматриваются две цилиндрические трубы, вложенные в друг друга: из накипи и из стали.

## Контрольная работа 2.

### Решение задачи 1.

Стационарный одномерный процесс теплопроводности в цилиндрической стенке описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{dT}{dr} = 0$$

с краевыми условиями

$$\text{при } r = r_{s1} \quad T = T_{s1}$$

$$\text{при } r = r_{s2} \quad T = T_{s2}$$

Решение этого уравнения имеет вид

$$T(r) = C_1 \ln(r) + C_2$$

$$\text{где } C_1 = \frac{T_{s2} - T_{s1}}{\ln\left(\frac{r_{s2}}{r_{s1}}\right)}; \quad C_2 = \frac{T_{s1} \ln(r_{s2}) - T_{s2} \ln(r_{s1})}{\ln\left(\frac{r_{s2}}{r_{s1}}\right)}.$$

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

3.2. Температурная зависимость для трубы из накипи

Краевые условия: при  $r = r_{s1} = 0,018 \text{ м}$   $T_{s1} = T_{c1} = 346,26 \text{ }^\circ\text{C}$

при  $r = r_{s2} = 0,020 \text{ м}$   $T_{s2} = T_{c2} = 343,35 \text{ }^\circ\text{C}$

Постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{343,35 - 346,26}{\ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right)} = -27,61;$$

$$C_2 = \frac{346,26 \cdot \ln(0,02) - 343,35 \cdot \ln(0,018)}{\ln\left(\frac{0,020}{0,018}\right)} = 235,22.$$

$T(r) = -27,61 \cdot \ln(r) + 235,22, \text{ }^\circ\text{C}$  - температурная зависимость

## Контрольная работа 2.

Решение задачи 1.

3.3. Температурная зависимость для трубы из стали

Краевые условия: при  $r = r_{s1} = 0,020 \text{ м}$   $T_{s1} = T_{c2} = 343,35 \text{ }^\circ\text{C}$

при  $r = r_{s2} = 0,028 \text{ м}$   $T_{s2} = T_{c3} = 340,71 \text{ }^\circ\text{C}$

Постоянные интегрирования:

$$C_1 = \frac{340,71 - 343,35}{\ln\left(\frac{0,028}{0,020}\right)} = -7,85;$$

$$C_2 = \frac{343,35 \cdot \ln(0,028) - 340,71 \cdot \ln(0,020)}{\ln\left(\frac{0,028}{0,020}\right)} = 312,63.$$

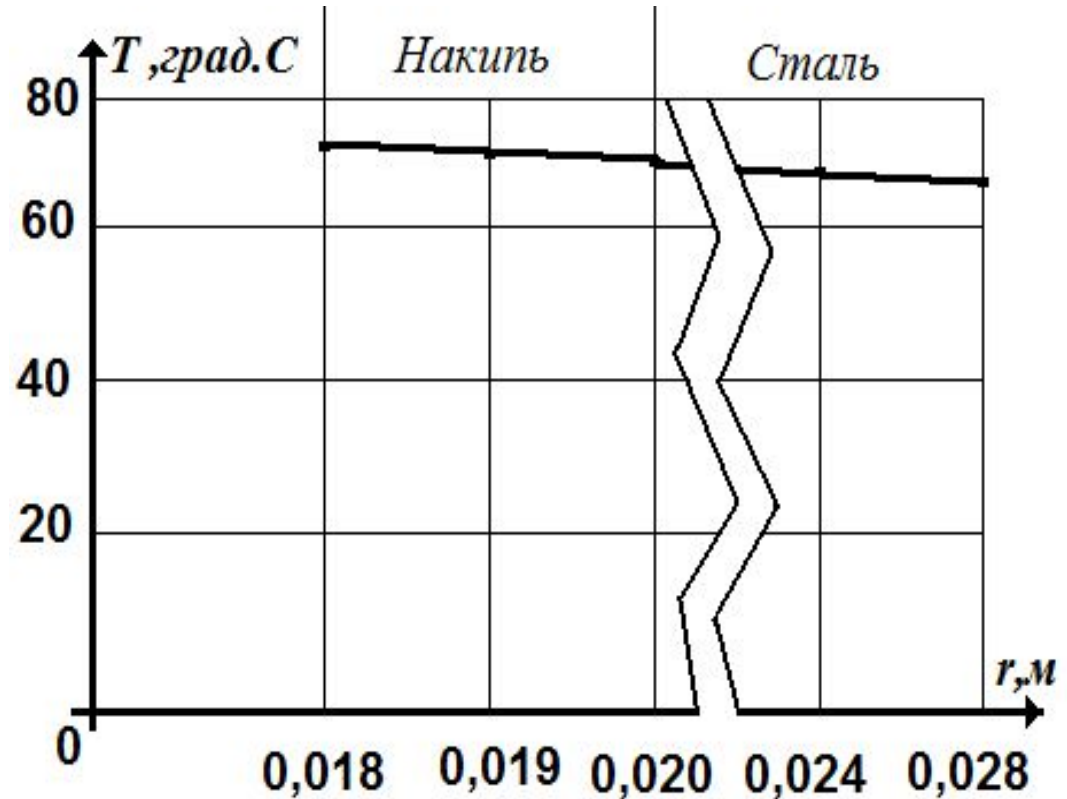
$T(r) = -7,85 \cdot \ln(r) + 312,63, \text{ }^\circ\text{C}$  - температурная зависимость

# Контрольная работа 2.

## Решение задачи 1.

3.4. Построение графика изменения температуры по толщине трубы

№	$r, \text{м}$	$T, \text{град.К}$	$t, \text{град.С}$	
1	0,018	346,14	72,99	накипь
2	0,019	344,65	71,50	накипь
3	0,02	343,23	70,08	накипь
		343,34	70,19	сталь
4	0,024	341,91	68,76	сталь
5	0,028	340,70	67,55	сталь



## Контрольная работа 2.

Результаты решения задачи 1.

1. Коэффициент теплопередачи:  $k = 0,7358 \frac{Вт}{м^2 \cdot K}$
2. Погонный тепловой поток:  $q = 138,6689 \frac{Вт}{м^2}$
3. Температуры на поверхностях трубы и накипи

№	г,м	T,град.К	t,град.С	
1	0,018	346,14	72,99	накипь
2	0,019	344,65	71,50	накипь
3	0,02	343,23	70,08	накипь
		343,34	70,19	сталь
4	0,024	341,91	68,76	сталь
5	0,028	340,70	67,55	сталь