

Návrh a tepelný výpočet odporovej pece so stabilnou vsádzkou (periodickej)

Úloha:

Navrhnite a vypočítajte komorovú odporovú pec pre periodický režim ohrevu a ochladzovania vsádzky. Vsádzkou je legovaná oceľ v tvare kocky s rozmermi $a \times a \times a = 0,4 \times 0,4 \times 0,4$ m. V peci sa bude vsádzka ohrievať a potom ochladzovať.

<i>Teploty vsádzky:</i>	počiatočná	$J_{vs,0} = J_{ok} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$
	konečná ohrevu	$J_{vs,k} = 800 \text{ }^\circ\text{C}$
	konečná chladnutia	$J_{vs,ch} = 680 \text{ }^\circ\text{C}$
<i>Vlastnosti vsádzky:</i>	merná hmotnosť	$r_{vs} = 7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
	merné teplo	$c_{vs} = 0,68 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	tepelná vodivosť	$l_{vs} = 34,9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
	stupeň čiernosti	$e_{vs} = 0,82$

Pec má pracovať v teplotnom režime s konštantnou teplotou, ktorú s ohľadom na konečnú teplotu vsádzky volíme $J_p = 850 \text{ }^\circ\text{C}$. Výmurovku pece zvolíme alternatívne na báze klasických tepelne izolačných materiálov.

Riešenie:

1 Určenie rozmerov pece a návrh výmurovky

1.1 Určenie rozmerov pracovnej komory

Vychádzame zo zadaných rozmerov a počtu hranolov v pracovnej komore, predpokladaného rozmiestnenia výhrevných článkov a potrebného priestoru k manipulácii so vsádzkou.

Vnútorne rozmery pracovnej komory navrhujeme $0,6 \times 0,6 \times 0,6$ m.

Odpovedajúce povrchy pracovnej komory:

- predná a zadná stena	$(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$
- bočné steny	$(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$
- horná a spodná stena	$(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$
Spolu:	$A_{vn} = 2,16 \text{ m}$

1.2 Návrh výmurovky z klasických materiálov

Navrhovaná pec je stredne teplotná, navrhujeme dvojvrstvovú výmurovku zo šamotu a diatomitu, plášť pece bude oceľový:

- šamot (tehla)	$r_i = 1300 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$, $c_s = 1,092 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- diatomit (tehla)	$r_d = 500 \text{ kg} \cdot \text{m}^3$, $c_d = 0,879 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

S ohľadom na zadanú teplotu pece a známe vlastnosti šamotu a diatomit voľme ich hrúbky takto:

$$s_{\text{s}} = 0,065 \text{ m (tehla na stojato)}$$

$$s_{\text{d}} = 0,130 \text{ m (tehla na plocho)}$$

Odpovedajúce povrchy:

a) medzi šamotom a diatomitom:

$$\text{- predná a zadná stena} \quad (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$$

$$\text{- bočné steny} \quad (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$$

$$\text{- horná a spodná stena} \quad (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$$

$$\text{Spolu:} \quad A_{\text{s,d}} = 3,1974 \text{ m}$$

b) medzi diatomitom a oceľovým plášťom:

$$\text{- predná a zadná stena} \quad (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot 2 = 1,9602 \text{ m}$$

$$\text{- bočné steny} \quad (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot 2 = 1,9602 \text{ m}$$

$$\text{- horná a spodná stena} \quad (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot (0,13 + 0,73 + 0,13) \cdot 2 = 1,9602 \text{ m}$$

$$\text{Spolu:} \quad A_{\text{vo}} = 5,8806 \text{ m}$$

Tento povrch budeme považovať aj za vonkajší povrch pece.

Stredné povrchy šamotu a diatomitu:

$$\frac{A_{\text{s,d}}}{A_{\text{vm}}} = \frac{3,1974}{2,16} = 1,4803 < 2 \quad \dots \quad A_{\text{str,s}} = \frac{A_{\text{s,d}} + A_{\text{vm}}}{2} = \frac{3,1974 + 2,16}{2} = 2,6787 \text{ m}^2$$

$$\frac{A_{\text{vo}}}{A_{\text{s,d}}} = \frac{5,8806}{3,1974} = 1,8392 < 2 \quad \dots \quad A_{\text{str,d}} = \frac{A_{\text{s,d}} + A_{\text{vo}}}{2} = \frac{3,1974 + 5,8806}{2} = 4,539 \text{ m}^2$$

1.3 Hmotnosť výmurovky z klasických materiálov

$$\text{- hmotnosť šamotu} \quad m_{\text{s}} = \rho_{\text{s}} \cdot A_{\text{str,s}} \cdot s_{\text{s}} = 1300 \cdot 2,6787 \cdot 0,065 = 226,4 \text{ kg}$$

$$\text{- hmotnosť diatomitu} \quad m_{\text{d}} = \rho_{\text{d}} \cdot A_{\text{str,d}} \cdot s_{\text{d}} = 500 \cdot 4,539 \cdot 0,13 = 295 \text{ kg}$$

$$\text{- hmotnosť oceľového plášťa} \quad m_{\text{Fe}} = \rho_{\text{Fe}} \cdot A_{\text{vo}} \cdot s_{\text{Fe}} = 7800 \cdot 5,8806 \cdot 0,001 = 45,87 \text{ kg}$$

$$\text{Celková hmotnosť výmurovky a plášťa pece} \quad m_{\text{C}} = m_{\text{s}} + m_{\text{d}} + m_{\text{Fe}} = 567,3 \text{ kg}$$

2 Výpočet tepelných strát

2.1 Tepelné straty prestupom tepla klasickou výmurovkou pri pracovnej teplote 850 °C

Oceľový plášť pri výpočte tepelných strát nebudeme uvažovať. Vychádzame zo zvolenej výmurovky, teplôt $J_p = 850 \text{ °C}$, $J_{ok} = 20 \text{ °C}$ a podmienky, že teplota na povrchu diatomitu nesmie prekročiť 60 °C ($J_{po,2,max} = 60 \text{ °C}$).

Odhad ďalších teplôt:

$$\text{- na vnútornom povrchu pracovnej komory} \quad J_{po,1} = 830 \text{ °C}$$

- na rozhraní šamot-diatomit: I_d je približne 3,5 krát menšie ako I_{ξ} , t.j. pri dvojnásobnej hrúbke diatomitu je $(1 + 3,5 \cdot 2) = 8$

$$\Delta J_{po} = J_{po,1} - J_{po,2} = 830 - 60 = 770 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta J_{\xi} = \frac{1}{8} \cdot \Delta J_{po} = \frac{1}{8} \cdot 770 = 96 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta J_d = \frac{7}{8} \cdot \Delta J_{po} = \frac{7}{8} \cdot 770 = 674 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

teda $J_{po,1} = 830 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$J_{\xi,d} = J_{po,1} - \Delta J_{\xi} = 830 - 96 = 734 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_d = J_{\xi,d} - \Delta J_d = 734 - 674 = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{str,\xi} = \frac{J_{po,1} + J_{\xi,d}}{2} = \frac{830 + 734}{2} = 782 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{str,d} = \frac{J_{\xi,d} + J_{po,2}}{2} = \frac{734 + 60}{2} = 397 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Stanovenie prevádzkových tepelných vodivostí a súčiniteľov prestupu tepla:

- pre šamot: $I_{\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 782 = 0,68 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- pre diatomit: $I_d = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,d} = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 397 = 0,197 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Súčinitele prestupu tepla na vnútornom a vonkajšom povrchu:

- na vnútornom povrchu: $a_{830} \cong 177 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

- na vonkajšom povrchu: $a_{60} \cong 14,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Poznámka: Pri stanovení a_{60} sa dopúšťame nepresnosti v tom zmysle, že nezohľadňujeme charakter steny (vodorovná horná, vodorovná spodná, zvislá). Výpočet by bol časovo náročnejší, pretože pri tomto zohľadnení je potrebné počítať tepelné straty týchto stien samostatne. Stanovené a_{60} preto považujeme za priemernú hodnotu pre celý povrch pece.

Stanovené a a I umožňujú vypočítať tepelný tok (tepelné straty) celým povrchom pece pri jej pracovnej teplote $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$Q_{850} = \frac{J_p - J_{ok}}{\frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} + \frac{s_{tv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} + \frac{s_{t\xi}}{I_d \cdot A_{str,d}} + \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}}}$$

$$Q_{850} = \frac{850 - 20}{\frac{1}{177 \cdot 2,16} + \frac{0,065}{0,68 \cdot 2,6787} + \frac{0,13}{0,197 \cdot 4,539} + \frac{1}{14,5 \cdot 5,8806}} = 4247,4 \text{ W}$$

Kontrola teplôt:

$$J_{po,1} = J_p - Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} = 850 - 4247,4 \cdot \frac{1}{177 \cdot 2,16} = 838,9 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{\xi,d} = J_{po,1} - Q_{850} \cdot \frac{s_{tv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} = 838,9 - 4247,4 \cdot \frac{0,065}{0,68 \cdot 2,6787} = 687,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_{\xi,d} - Q_{850} \cdot \frac{s_{t\xi}}{I_d \cdot A_{str,d}} = 687,3 - 4247,4 \cdot \frac{0,13}{0,197 \cdot 4,539} = 69,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

alebo

$$J_{po,2} = J_{ok} + Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}} = 20 + 4247,4 \cdot \frac{1}{14,5 \cdot 5,8806} = 69,8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Oprava na tieto teploty:

$$J_{str,\xi} = \frac{J_{po,1} + J_{\xi,d}}{2} = \frac{838,9 + 687,3}{2} = 763,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J_{str,d} = \frac{J_{\xi,d} + J_{po,2}}{2} = \frac{687,3 + 69,8}{2} = 378,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$I_{\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 763,1 = 0,673 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$I_d = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,d} = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 378,5 = 0,193 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$Q_{850} = \frac{850 - 20}{\frac{1}{177 \cdot 2,16} + \frac{0,065}{0,673 \cdot 2,6787} + \frac{0,13}{0,193 \cdot 4,539} + \frac{1}{14,5 \cdot 5,8806}} = 4175,1 \text{ W}$$

Kontrola teplôt:

$$J_{po,1} = J_p - Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} = 850 - 4175,1 \cdot \frac{1}{177 \cdot 2,16} = 839,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J_{\xi,d} = J_{po,1} - Q_{850} \cdot \frac{S_{iv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} = 839,1 - 4175,1 \cdot \frac{0,065}{0,673 \cdot 2,6787} = 688,6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_{\xi,d} - Q_{850} \cdot \frac{S_{is}}{I_d \cdot A_{str,d}} = 688,6 - 4175,1 \cdot \frac{0,13}{0,193 \cdot 4,539} = 69 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ako je vidieť z hodnôt kontroly teplôt, ani po ďalšej iterácii nie je splnená podmienka $J_{po,2} \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ a preto opakujeme výpočet s pridaním ďalšej vrstvy výmurovky, napr. vrstvy diatomitu s uložením tehál na stojato.

Vnútročné rozmery pracovnej komory zostávajú nezmenené: 0,6 x 0,6 x 0,6 m.

Odpovedajúce povrchy pracovnej komory:

- predná a zadná stena $(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$

- bočné steny $(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$

- horná a spodná stena $(0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot (0,1 + 0,4 + 0,1) \cdot 2 = 0,72 \text{ m}$

Spolu: $A_{vn} = 2,16 \text{ m}$

Odpovedajúce povrchy výmurovky z klasických materiálov:

a) medzi šamotom a diatomitom:

- predná a zadná stena $(0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$

- bočné steny $(0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$

- horná a spodná stena $(0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot (0,065 + 0,6 + 0,065) \cdot 2 = 1,0658 \text{ m}$

Spolu: $A_{\xi,d} = 3,1974 \text{ m}$

b) medzi diatomitom a oceľovým plášťom:

- predná a zadná stena $(0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot (0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot 2 = 2,5088 \text{ m}$
 - bočné steny $(0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot (0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot 2 = 2,5088 \text{ m}$
 - horná a spodná stena $(0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot (0,195 + 0,73 + 0,195) \cdot 2 = 2,5088 \text{ m}$
- Spolu: $A_{vo} = 7,5264 \text{ m}$

Tento povrch budeme považovať aj za vonkajší povrch pece.

Stredné povrchy šamotu a diatomitu:

$$A_{str,\check{s}} = \frac{A_{\check{s},d} + A_{vm}}{2} = \frac{3,1974 + 2,16}{2} = 2,6787 \text{ m}^2$$

$$A_{str,d} = \frac{A_{\check{s},d} + A_{vo}}{2} = \frac{3,1974 + 7,5264}{2} = 5,3619 \text{ m}^2$$

Hmotnosť výmurovky z klasických materiálov:

- hmotnosť šamotu $m_{\check{s}} = \rho_{\check{s}} \cdot A_{str,\check{s}} \cdot s_{\check{s}} = 1300 \cdot 2,6787 \cdot 0,065 = 226,4 \text{ kg}$
 - hmotnosť diatomitu $m_d = \rho_d \cdot A_{str,d} \cdot s_d = 500 \cdot 5,3619 \cdot 0,195 = 522,8 \text{ kg}$
 - hmotnosť oceľového plášťa $m_{Fe} = \rho_{Fe} \cdot A_{vo} \cdot s_{Fe} = 7800 \cdot 7,5264 \cdot 0,001 = 58,71 \text{ kg}$
- Celková hmotnosť výmurovky a plášťa pece $m_C = m_{\check{s}} + m_d + m_{Fe} = 807,9 \text{ kg}$

Odhad teplôt:

- na vnútornom povrchu pracovnej komory $J_{po,1} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$
- na rozhraní šamot-diatomit: I_d je približne 3,5 krát menšie ako $I_{\check{s}}$, t.j. pri trojnásobnej hrúbke diatomitu je $(1 + 3,5 \cdot 3) = 11,5 = \frac{23}{2}$

$$\Delta J_{po} = J_{po,1} - J_{po,2} = 830 - 60 = 770 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta J_{\check{s}} = \frac{1}{\frac{23}{2}} \cdot \Delta J_{po} = \frac{1}{\frac{23}{2}} \cdot 770 = 67 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\Delta J_d = \frac{3,5 \cdot 3}{\frac{23}{2}} \cdot \Delta J_{po} = \frac{3,5 \cdot 3}{\frac{23}{2}} \cdot 770 = 703 \text{ }^\circ\text{C}$$

teda

$$J_{po,1} = 830 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_{\check{s},d} = J_{po,1} - \Delta J_{\check{s}} = 830 - 67 = 763 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_d = J_{\check{s},d} - \Delta J_d = 763 - 703 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_{str,\check{s}} = \frac{J_{po,1} + J_{\check{s},d}}{2} = \frac{830 + 763}{2} = 796,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_{str,d} = \frac{J_{\check{s},d} + J_{po,2}}{2} = \frac{763 + 60}{2} = 411,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

Stanovenie prevádzkových tepelných vodivostí a súčiniteľov prestupu tepla:

- pre šamot: $I_{\check{s}} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,\check{s}} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 796,5 = 0,685 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- diatomit: $I_d = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,d} = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 411,5 = 0,201 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Tepelný tok (tepelné straty) celým povrchom pece pri jej pracovnej teplote $850 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$Q_{850} = \frac{J_p - J_{ok}}{\frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} + \frac{s_{tv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} + \frac{s_{t\delta}}{I_d \cdot A_{str,d}} + \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}}}$$

$$Q_{850} = \frac{850 - 20}{\frac{1}{177 \cdot 2,16} + \frac{0,065}{0,685 \cdot 2,6787} + \frac{0,195}{0,201 \cdot 5,3619} + \frac{1}{14,5 \cdot 7,5264}} = 3638,2 \text{ W}$$

Kontrola teplôt:

$$J_{po,1} = J_p - Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} = 850 - 3638 \cdot \frac{1}{177 \cdot 2,16} = 840,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{\xi,d} = J_{po,1} - Q_{850} \cdot \frac{s_{tv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} = 840,5 - 3638 \cdot \frac{0,065}{0,685 \cdot 2,6787} = 711,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_{\xi,d} - Q_{850} \cdot \frac{s_{t\delta}}{I_d \cdot A_{str,d}} = 711,6 - 3638 \cdot \frac{0,195}{0,201 \cdot 5,3619} = 53,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

alebo

$$J_{po,2} = J_{ok} + Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}} = 20 + 3638 \cdot \frac{1}{14,5 \cdot 7,5264} = 53,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Oprava na tieto teploty:

$$J_{str,\xi} = \frac{J_{po,1} + J_{\xi,d}}{2} = \frac{840,5 + 711,6}{2} = 776 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{str,d} = \frac{J_{\xi,d} + J_{po,2}}{2} = \frac{711,6 + 53,3}{2} = 382,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$I_{\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,\xi} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 776 = 0,678 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$I_d = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,d} = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 382,5 = 0,194 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

$$Q_{850} = \frac{850 - 20}{\frac{1}{177 \cdot 2,16} + \frac{0,065}{0,678 \cdot 2,6787} + \frac{0,195}{0,194 \cdot 5,3619} + \frac{1}{14,5 \cdot 7,5264}} = 3531,4 \text{ W}$$

Kontrola teplôt:

$$J_{po,1} = J_p - Q_{850} \cdot \frac{1}{a_{830} \cdot A_{vn}} = 850 - 3531,4 \cdot \frac{1}{177 \cdot 2,16} = 840,8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{\xi,d} = J_{po,1} - Q_{850} \cdot \frac{s_{tv}}{I_{\xi} \cdot A_{str,\xi}} = 840,8 - 3531,4 \cdot \frac{0,065}{0,678 \cdot 2,6787} = 714,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$J_{po,2} = J_{\xi,d} - Q_{850} \cdot \frac{s_{t\delta}}{I_d \cdot A_{str,d}} = 714,4 - 3531,4 \cdot \frac{0,195}{0,194 \cdot 5,3619} = 52,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Ako je vidieť z hodnôt kontroly teplôt, pridaním ďalšej vrstvy výmurovky, v tomto prípade 1 vrstvy diatomitu s uložením tehál na stojato, je splnená podmienka $J_{po,2} \leq 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ a preto výpočet môže smelo pokračovať ďalej s týmito hodnotami.

2.2 Tepelné straty prestupom tepla klasickou výmurovkou pri teplote ochladzovania 680 °C (postup podobný ako v časti 2.1)

Odhad teplôt:

- na vnútornom povrchu pracovnej komory $J_{po,1} = 670$ °C
- na rozhraní šamot-diatomit: I_d je približne 3,5 krát menšie ako I_s , t.j pri trojnásobnej hrúbke diatomitu je $(1 + 3,5 \cdot 3) = 11,5 = \frac{23}{2}$

$$\Delta J_{po} = J_{po,1} - J_{po,2} = 670 - 60 = 610 \text{ °C}$$

$$\Delta J_s = \frac{1}{\frac{23}{2}} \cdot \Delta J_{po} = \frac{1}{\frac{23}{2}} \cdot 610 = 53 \text{ °C}$$

$$\Delta J_d = \frac{3,5 \cdot 3}{\frac{23}{2}} \cdot \Delta J_{po} = \frac{3,5 \cdot 3}{\frac{23}{2}} \cdot 610 = 557 \text{ °C}$$

teda $J_{po,1} = 670$ °C

$$J_{s,d} = J_{po,1} - \Delta J_s = 670 - 53 = 617 \text{ °C}$$

$$J_{po,2} = J_d = J_{s,d} - \Delta J_d = 617 - 557 = 60 \text{ °C}$$

$$J_{str,s} = \frac{J_{po,1} + J_{s,d}}{2} = \frac{670 + 617}{2} = 643,5 \text{ °C}$$

$$J_{str,d} = \frac{J_{s,d} + J_{po,2}}{2} = \frac{617 + 60}{2} = 338,5 \text{ °C}$$

Stanovenie prevádzkových tepelných vodivostí a súčiniteľov prestupu tepla:

- pre šamot: $I_s = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,s} = 0,407 + 0,349 \cdot 10^{-3} \cdot 643,5 = 0,632 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

- diatomit: $I_d = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot J_{str,d} = 0,105 + 0,233 \cdot 10^{-3} \cdot 338,5 = 0,184 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Súčinitele prestupu tepla na vnútornom a vonkajšom povrchu:

- na vnútornom povrchu: $a_{680} \cong 149 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

- na vonkajšom povrchu: $a_{60} \cong 14,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Tepelný tok (tepelné straty) celým povrchom pece pri jej pracovnej teplote 680 °C.

$$Q_{680} = \frac{J_p - J_{ok}}{\frac{1}{a_{680} \cdot A_{vn}} + \frac{s_{tv}}{I_s \cdot A_{str,s}} + \frac{s_{tš}}{I_d \cdot A_{str,d}} + \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}}}$$

$$Q_{680} = \frac{680 - 20}{\frac{1}{149 \cdot 2,16} + \frac{0,065}{0,632 \cdot 2,6787} + \frac{0,195}{0,184 \cdot 5,3619} + \frac{1}{14,5 \cdot 7,5264}} = 2657,9 \text{ W}$$

Kontrola teplôt:

$$J_{po,1} = J_p - Q_{680} \cdot \frac{1}{a_{680} \cdot A_{vn}} = 680 - 2657,9 \cdot \frac{1}{149 \cdot 2,16} = 671,7 \text{ °C}$$

$$J_{s,d} = J_{po,1} - Q_{680} \cdot \frac{s_{tv}}{I_s \cdot A_{str,s}} = 671,7 - 2657,9 \cdot \frac{0,065}{0,632 \cdot 2,6787} = 569,7 \text{ °C}$$

$$J_{po,2} = J_{\xi,d} - Q_{850} \cdot \frac{S_{i\xi}}{I_d \cdot A_{str,d}} = 569,7 - 2657,9 \cdot \frac{0,195}{0,184 \cdot 5,3619} = 44,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

alebo

$$J_{po,2} = J_{ok} + Q_{680} \cdot \frac{1}{a_{60} \cdot A_{vo}} = 20 + 2657,9 \cdot \frac{1}{14,5 \cdot 7,5264} = 44,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Tieto hodnoty vzhľadom na skutočnosť, keď $J_{po,2} \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ a malej odchýlky od odhadnutých hodnôt, môžeme považovať za dostatočne presné pre ďalší výpočet.

2.3 Akumulované teplo vo výmurovke a vsádzke pri $J_p = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$ a $J_{vs,k} = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ (pri zanedbaní ocelového plášťa)

$$\begin{aligned} - \text{šamot:} \quad Q_{\xi}^* &= m_{\xi} \cdot c_{\xi} \cdot (J_{str,\xi} - J_{ok}) = 226,4 \cdot 1092 \cdot (776 - 20) = 1,869 \cdot 10^8 \text{ J} \\ - \text{diatomit:} \quad Q_d^* &= m_d \cdot c_d \cdot (J_{str,d} - J_{ok}) = 522,8 \cdot 879 \cdot (382,5 - 20) = 1,666 \cdot 10^8 \text{ J} \\ - \text{vsádzka:} \quad Q_{vs}^* &= m_{vs} \cdot c_{vs} \cdot (J_p - J_{ok}) = 7800 \cdot 0,4^3 \cdot 680 \cdot (800 - 20) = 2,648 \cdot 10^8 \text{ J} \\ \text{Spolu} \quad Q_{ak,850}^* &= Q_{\xi}^* + Q_d^* + Q_{vs}^* = 1,869 \cdot 10^8 + 1,666 \cdot 10^8 + 2,648 \cdot 10^8 = 6,183 \cdot 10^8 \text{ J} \end{aligned}$$

2.4 Akumulované teplo vo výmurovke a vsádzke pri $J_p = J_{vs,ch} = 680 \text{ } ^\circ\text{C}$

$$\begin{aligned} - \text{šamot:} \quad Q_{\xi}^* &= m_{\xi} \cdot c_{\xi} \cdot (J_{str,\xi} - J_{ok}) = 226,4 \cdot 1092 \cdot (643,5 - 20) = 1,542 \cdot 10^8 \text{ J} \\ - \text{diatomit:} \quad Q_d^* &= m_d \cdot c_d \cdot (J_{str,d} - J_{ok}) = 522,8 \cdot 879 \cdot (338,5 - 20) = 1,464 \cdot 10^8 \text{ J} \\ - \text{vsádzka:} \quad Q_{vs}^* &= m_{vs} \cdot c_{vs} \cdot (J_p - J_{ok}) = 7800 \cdot 0,4^3 \cdot 680 \cdot (680 - 20) = 2,24 \cdot 10^8 \text{ J} \\ \text{Spolu} \quad Q_{ak,680}^* &= Q_{\xi}^* + Q_d^* + Q_{vs}^* = 1,542 \cdot 10^8 + 1,464 \cdot 10^8 + 2,24 \cdot 10^8 = 5,246 \cdot 10^8 \text{ J} \end{aligned}$$

3 Výpočet doby ohrevu a ochladzovania vsádzky

3.1 Ohrev vsádzky, určenie tepelnej veľkosti vsádzky

Ako je uvedené v zadaní, vsádzka podlieha symetrickému ohrevu z každej strany zhora a zdola, zľava a sprava, spredu a zozadu. Keďže sa jedná vsádzku tvaru kocky so stranou $a = 0,4 \text{ m}$, dostávame charakteristický rozmer pre všetky smery rovnaký a to $l_{ch,x} = l_{ch,y} = l_{ch,z} = 0,2 \text{ m}$. Vsádzka sa vkladá do vyhriatej pece s pracovnou teplotou komory $J_p = 850 \text{ } ^\circ\text{C}$. Potom pre zadanú tepelnú vodivosť vsádzky a súčiniteľ prestupu tepla $a \cong 152 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ je Biotovo kritérium

$$Bi_x = \frac{a \cdot l_{ch,x}}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871 > 0,25$$

$$Bi_y = \frac{a \cdot l_{ch,y}}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871 > 0,25$$

$$Bi_z = \frac{a \cdot l_{ch,z}}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871 > 0,25$$

Vo všetkých troch prípadoch platí $Bi > 0,25$, z čoho vyplýva, že dobu ohrevu vsádzky musíme vypočítať pomocou metódy pre tepelne masívnu vsádzku.

Pomerná teplota vsádzky:

$$\Theta = \frac{J_p - J_{vs,k}}{J_p - J_{vs,0}} = \frac{850 - 800}{850 - 20} = 0,06$$

Tejto pomernej teplote pri $Bi = 0,871$ (a pri $a \cong 152 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$) zodpovedá z Budrinových diagramov (pre strednú rovinu steny) hodnota Fourierovho kritéria $Fo = 4,4$ ($Fo_x = Fo_y = Fo_z = 4,4$) a doba ohrevu vsádzky je

$$t_{ohr,x} = \frac{Fo_x \cdot l_{ch,x}^2}{l_{vs}} \cdot r_{vs} \cdot c_{vs} = \frac{4,4 \cdot 0,2^2}{34,9} \cdot 7800 \cdot 680 = 26748 \text{ s} \cong 7 \text{ h } 26 \text{ min}$$

$$t_{ohr,y} = t_{ohr,z} = t_{ohr,x} = 26748 \text{ s}$$

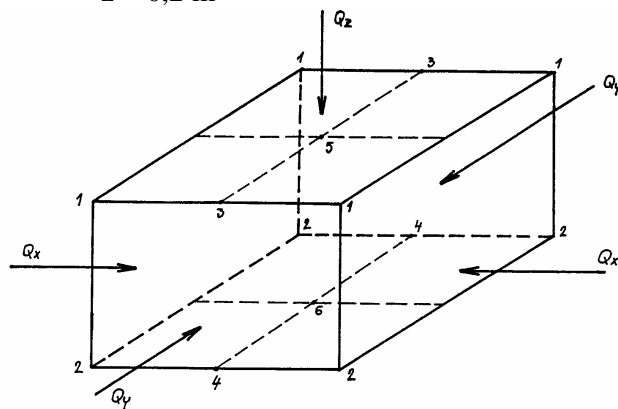
$$t_{ohr} = \frac{t_{ohr,y} + t_{ohr,z} + t_{ohr,x}}{3} = 26748 \text{ s}$$

Doba ohrevu vsádzky pri 1-smernom ohreve je $t_{ohr} = 7 \text{ h } 26 \text{ min}$. Keďže sa jedná v tomto prípade o ohrev z troch smerov, nasledujúcim výpočtom vypočítame dobu ohrevu.

Poznámka: nasledujúci ilustratívny príklad predstavuje alternatívny spôsob výpočtu doby ohrevu vsádzky, kedy uvažujeme ohrev vo viacerých smeroch, nie len v jednom smere.

Charakteristické rozmery:

- trojrozmerné teplotné pole $x = 0,2 \text{ m}$
- $y = 0,2 \text{ m}$
- $z = 0,2 \text{ m}$



Zadaný príklad je typickou úlohou riešenia nestacionárneho teplotného poľa v pevnom prostredí, s hraničnou podmienkou 3. druhu. Ide o využitie Fourier – Kirchhoffovej diferenciálnej rovnice. Na tomto mieste použijeme bežnú technickú metódu s využitím Burdrinových diagramov.

Na prvý pohľad z predchádzajúceho výsledku ($t_{ohr} = 7 \text{ h } 26 \text{ min}$) vyplýva, že takýto ohrev je zdĺhavý, nakoľko zvolený postup riešenia je možné aplikovať len na skutočne jednorozmerné teplotné pole (čo zadaná vsádzka porovnateľných rozmerov nespĺňa). Za uvedenú dobu by sa príslušné plochy ohriali na konečnú tepotu vtedy, ak by vsádzka z ostatných strán bola dokonale izolovaná.

Ohrev vsádzky vrchom a bočnými stenami – riešenie trojrozmerného teplotného poľa v pravouhlých súradniciach x , y , z . V smere súradníc x , y , z je ohrev dvojstranný (symetrický), v tomto prípade nemáme ohrev len jednostranný (asymetrický).

- koeficient teplotnej vodivosti:

$$a = \frac{l}{r \cdot c} = \frac{34,9}{7800 \cdot 680} = 6,58 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}$$

- Fourierove kritériá:

$$Fo_x = \frac{a \cdot t}{x^2} = \frac{6,58 \cdot 10^{-6} \cdot t}{0,2^2} = 1,645 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

$$Fo_y = \frac{a \cdot t}{y^2} = \frac{6,58 \cdot 10^{-6} \cdot t}{0,2^2} = 1,645 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

$$Fo_z = \frac{a \cdot t}{z^2} = \frac{6,58 \cdot 10^{-6} \cdot t}{0,2^2} = 1,645 \cdot 10^{-4} \cdot t$$

- Biotove kritériá:

$$Bi_x = \frac{a \cdot x}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871$$

$$Bi_y = \frac{a \cdot y}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871$$

$$Bi_z = \frac{a \cdot z}{l} = \frac{152 \cdot 0,2}{34,9} = 0,871$$

Ďalej postupujme obrátene ako v predchádzajúcej alternatíve a vypočítajme pomerné a skutočné teploty v charakteristických bodoch vsádzky 1 až 6, pre dobu ohrevu, napr. 3 hod.

Odpovedajúce Fourierove kritériá sú:

$$Fo_x = Fo_y = Fo_z = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 3600 = 1,8$$

Pre tieto a dané Biotove kritériá určíme z Budrinových diagramov pomerné teploty na povrchu a v strede vsádzky pre každú súradnicu. Tieto sú:

$$\text{- pre toky } \Phi_x: \quad \Theta_{po,x} = 0,23; \quad \Theta_{str,x} = 0,35$$

$$\text{- pre toky } \Phi_y: \quad \Theta_{po,y} = 0,23; \quad \Theta_{str,y} = 0,35$$

$$\text{- pre toky } \Phi_z: \quad \Theta_{po,z} = 0,23; \quad \Theta_{str,z} = 0,35$$

Pre výpočet výsledných pomerných teplôt je potrebné uvážiť polohu bodov 1 až 6 vzhľadom k tepelným tokom:

- body 1 sú povrchové pre všetky toky Φ_x , Φ_y , Φ_z

- body 2 sú povrchové pre toky Φ_x a Φ_y , stredové pre Φ_z

- body 3 sú povrchové pre Φ_y a Φ_z , stredové pre Φ_x

- body 4 sú povrchové pre Φ_y a stredové pre Φ_x a Φ_z
- bod 5 je povrchový pre Φ_z a stredový pre Φ_x a Φ_y
- bod 6 je stredový pre všetky toky Φ_x , Φ_y a Φ_z .

Potom výsledné pomerné teploty v bodoch 1 až 6 sú:

$$\Theta_1 = \Theta_{po,x} \cdot \Theta_{po,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,23 \cdot 0,23 \cdot 0,23 = 0,012$$

analogicky

$$\Theta_2 = \Theta_{po,x} \cdot \Theta_{po,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,23 \cdot 0,23 \cdot 0,23 = 0,012$$

$$\Theta_3 = \Theta_{po,y} \cdot \Theta_{po,z} \cdot \Theta_{str,x} = 0,23 \cdot 0,23 \cdot 0,35 = 0,019$$

$$\Theta_4 = \Theta_{str,x} \cdot \Theta_{po,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,35 \cdot 0,23 \cdot 0,23 = 0,019$$

$$\Theta_5 = \Theta_{str,x} \cdot \Theta_{str,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,35 \cdot 0,35 \cdot 0,23 = 0,028$$

$$\Theta_6 = \Theta_{str,x} \cdot \Theta_{str,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,35 \cdot 0,35 \cdot 0,23 = 0,028$$

Odpovedajúce skutočné teploty v bode i :

$$\Theta_i = \frac{J_p - J_i}{J_p - J_o} \quad \Rightarrow \quad J_i = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_i$$

teda $J_1 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_1 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,012 = 839,8 \text{ }^\circ\text{C}$

$$J_2 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_2 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,012 = 839,8 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_3 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_3 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,019 = 834,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_4 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_4 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,019 = 834,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_5 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_5 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,028 = 826,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$J_6 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_6 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,028 = 826,2 \text{ }^\circ\text{C}$$

Za čas 3 hod sa uvažovaná vsádzka prehreje na celom povrchu na teplotu väčšiu ako bola požadovaná teplota $800 \text{ }^\circ\text{C}$. Za túto dobu je ohrev takmer rovnomerný, s maximálnym teplotným rozdielom medzi bodmi 1 a 6, $\Delta J_{1,6} = J_1 - J_6 = 839,8 - 826,2 = 13,6 \text{ }^\circ\text{C}$. Znížime preto dobu ohrevu na 2,5 hod a pre tieto extrémne body výpočet zopakujeme. Výsledky:

$$Fo_x = Fo_y = Fo_z = 1,67 \cdot 10^{-4} \cdot 2,5 \cdot 3600 = 1,5$$

- pre toky Φ_x : $\Theta_{po,x} = 0,26$; $\Theta_{str,x} = 0,4$

- pre toky Φ_y : $\Theta_{po,y} = 0,26$; $\Theta_{str,y} = 0,4$

- pre toky Φ_z : $\Theta_{po,z} = 0,26$; $\Theta_{str,z} = 0,4$

V bode 1 je:

$$\Theta_1 = \Theta_{po,x} \cdot \Theta_{po,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,26 \cdot 0,26 \cdot 0,26 = 0,018$$

v bode 6 je:

$$\Theta_6 = \Theta_{str,x} \cdot \Theta_{str,y} \cdot \Theta_{po,z} = 0,4 \cdot 0,4 \cdot 0,26 = 0,042$$

teda

$$J_1 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_1 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,018 = 835 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$J_6 = J_p - (J_p - J_o) \cdot \Theta_6 = 850 - (850 - 20) \cdot 0,042 = 815,1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta J_{1,6} = J_1 - J_6 \cong 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Teplotný rozdiel medzi bodmi 1 a 6 sa zvýšil, čo nie je veľmi priaznivé. Teploty v oboch bodoch sú bližšie požadovanej teplote, pričom je možné dobu ohrevu ešte znížiť, napr. na 2 hod a výpočet opakovať. Čas $t_{ohr} = 2,5$ hod je možné považovať za dostatočnú dobu ohrevu predmetnej vsádzky. Teploty v ostatných bodoch 2 až 5 sa úmerne znížia oproti teplotám pri dobre ohrevu 3 hod.

Toto bol príklad výpočtu doby ohrevu masívnej vsádzky inou metódou. V ďalšom výpočte hodnotu získanú touto metódou uvažujeme.

3.2 Doba ochladzovania vsádzky v pracovnej komore s klasickou výmurovkou

Ochladzovanie vsádzky sa uskutočňuje z teploty $J_{vs,k} = 800 \text{ } ^\circ\text{C}$ na $J_{vs,ch} = 680 \text{ } ^\circ\text{C}$. Na rozdiel od procesu ohrevu, spolu so vsádzkou sa ochladzuje výmurovka pece, t.j. v peci prebieha nestacionárny dej. Pre bežný výpočet použijeme jednoduchšiu, menej presnú metódu, s využitím známych hodnôt akumulovaného tepla v peci pri $J_{vs,k}$ a $J_{vs,ch}$. V klasickej výmurovke je

$$\Delta Q_{ak}^* = Q_{ak,850}^* - Q_{ak,680}^* = 6,183 \cdot 10^8 - 5,246 \cdot 10^8 = 9,37 \cdot 10^7 \text{ J} \cong 26 \text{ kWh}$$

Je to teplo, ktoré sa v priebehu ochladzovania vsádzky odvedie povrchom pece. Ak predpokladáme, že tepelný tok sa pritom mení lineárne, jeho stredná hodnota je

$$Q_{str} = \frac{Q_{850} + Q_{680}}{2} = \frac{3531,4 + 2657,9}{2} = 3094,7 \text{ W} \cong 3,1 \text{ kW}$$

Doba ochladzovania vsádzky v klasickej výmurovke je

$$t_{ch} = \frac{\Delta Q_{ak}^*}{Q_{str}} = \frac{26}{3,1} = 8,4 \text{ h}$$

V technologickom režime nepredpokladáme výdrž na teplote $J_{vs,k}$, odhadneme dobu potrebnú na uloženie a vyloženie vsádzky $t_{prest} = 0,25 \text{ h} = 15 \text{ min}$, potom doba jedného pracovného cyklu navrhovanej periodickej pece je

$$t_c = t_{ohr} + t_{ch} + t_{prest} = 2,5 + 8,4 + 0,25 = 11,15 \text{ h}$$

4 Výpočet elektrického príkonu pece

4.1 Spotrebované teplo v peci s klasickou výmurovkou

- užitočné teplo spotrebované na ohrev výmurovkou

$$Q_{už}^* = m_{vs} \cdot c_{vs} \cdot (J_{vs,k} - J_{vs,0}) = 7800 \cdot 0,4^3 \cdot 680 \cdot (800 - 20) = 2,648 \cdot 10^8 \text{ J} = 73,549 \text{ kWh}$$

- teplo spotrebované na ohrev pomocných zariadení odhadneme hodnotou 5 % z užitočného

$$Q_{pom}^* = \frac{5}{100} \cdot Q_{už}^* = \frac{5}{100} \cdot 73,55 = 3,68 \text{ kWh}$$

- teplo spotrebované vo forme tepelných strát jedného pracovného cyklu

$$Q_{ts}^* = (Q_{850})_{str} \cdot t_{ohr} + (Q_{680})_{str} \cdot t_{ch} + Q_p \cdot t_{prest}$$

kde $(Q_{850})_{str}$ a $(Q_{680})_{str}$ sú stredné tepelné toky (straty) v priebehu ohrevu a ochladzovania Q_p sú tepelné straty – sálavý tok otvorom pece v dobe technologického prestroja. Vypočítame ich podľa vzťahu

$$Q_p = c \cdot e_v \cdot (T_{680}^4 - T_{ok}^4) \cdot A_{otv} \cdot \Phi$$

kde c je Stefan-Boltzmanova konštanta, $c = 5,67 \cdot 10^{-8}$
 e_v je stupeň čiernosti výmurovky, $e_v = 0,6$
 A_{otv} je plocha otvoru pracovnej komory, $A_{otv} = 0,36 \text{ m}^2$
 Φ je koeficient clonenia otvoru, v tomto prípade $\Phi = 0,69$

$$Q_p = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot 0,6 \cdot ((680 + 273)^4 - (20 + 273)^4) \cdot 0,36 \cdot 0,69 = 6908 \text{ W}$$

$$Q_{ts}^* = 3531,4 \cdot 2,5 + \frac{3531,4 + 2657,9}{2} \cdot 8,4 + 6908 \cdot 0,25 = 36,55 \text{ kWh}$$

Spotrebované teplo v jednom pracovnom cykle je:

$$Q_c^* = Q_{už}^* + Q_{pom}^* + Q_{ts}^* = 73,55 + 3,68 + 36,55 = 113,78 \text{ kWh}$$

5 Výsledné parametre výpočtu pece

Parameter	
Účinnosť pece	$h_t = \frac{Q_{už}^*}{Q_c^*} \cdot 100 = \frac{73,55}{113,78} \cdot 100 = 64,6 \%$
Výrobnosť pece	$g = m_{vs} \cdot \frac{24}{t_c} = 7800 \cdot 0,4^3 \cdot \frac{24}{11,15} = 1075 \frac{\text{kg}}{24 \text{ hod}}$
Merná spotreba el. energie	$w = \frac{Q_c^*}{m_{vs}} = \frac{113,78}{7800 \cdot 0,4^3} = 0,228 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$
Ideálny príkon pece	$P_{p,id} = \frac{Q_c^*}{t_{ohr}} = \frac{113,78}{2,5} = 45,5 \text{ kW}$
Skutočný výkon pece ($k = 1,3$)	$P_{sk} = k \cdot P_{p,id} = 1,3 \cdot 45,5 = 59,1 \text{ kW}$
Zvolený výkon pece	$P_{zv} = 63 \text{ kW}$
Výkon na fázu	$P_{1f} = \frac{P_{zv}}{3} = \frac{63}{3} = 21 \text{ kW}$