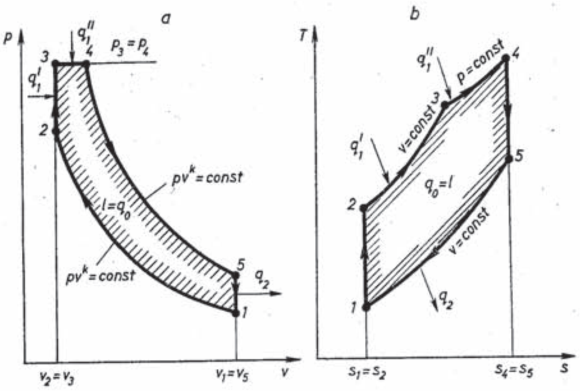
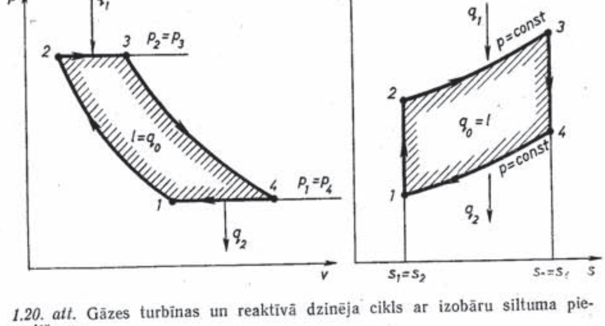


1.19. att. Iekšdedzes dzinēja cikls ar kombinētu siltuma pievadīšanu izohorā un izobārā procesā:
a — *p-v* koordinātēs; *b* — *T-s* koordinātēs.



1.20. att. Gāzes turbīnas un reaktīvā dzinēja cikls ar izobāru siltuma pievadīšanu:
a — *p-v* koordinātēs; *b* — *T-s* koordinātēs.

cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}. \tag{1.258}$$

Reaktīvajam dzinējam arī

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{w^2}{2q_1}, \tag{1.259}$$

kur w — gāzes strūklas izplūdes ātrums no reaktīvā dzinēja sprauslas.

Degvielas īpatnējais patēriņš

$$b = \frac{B}{N} \cdot 1000 \text{ (g degvielas/(kW·h))}. \tag{1.260}$$

Aprēķinu piemēri

1.12.1. Iekšdedzes dzinēja darbības pamatā ir cikls ar izohoru siltuma pievadīšanu. Darba ķermeņa parametri pirms saspiešanas: $p_1=0{,}1$ MPa, $t_1=25\,°C$. Kompresijas pakāpe $\varepsilon=8{,}5$. Ciklā pievadītais siltuma daudzums atbilst 30 g degvielas sadegšanā izdalītajam siltumam. Degvielas patēriņš stundā $B=15$ kg/h, tās sadegšanas siltums $Q_z^d=42\,000$ kJ/kg. Aprēķināt ciklā pievadīto siltuma daudzumu, cikla raksturīgo punktu parametrus p, v, T, cikla termisko lietderības koeficientu, darbu, novadīto siltuma daudzumu, dzinēja teorētisko jaudu, darba ķermeņa (gāzes) patēriņu un eksergisko lietderības koeficientu. Pieņemt, ka darba ķermeņa termodinamiskās īpašības atbilst gaisa īpašībām. Cikla procesi un raksturīgie punkti parādīti 1.17. attēlā.

Atrisinājums. Veicot cikla aprēķinu, pieņem, ka darba ķermenis ir divatomu ideālā gāze. Ciklā (1 kg gāzes) pievadītais siltuma daudzums

$$q_1 = bQ_z^d = 0{,}03 \cdot 42\,000 = 1260 \text{ kJ/kg}.$$

Darba ķermeņa parametri cikla punktā *1*:

$$T_1 = t_1 + 273 = 298 \text{ K}; \quad p_1 = 0{,}1 \text{ MPa};$$

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 298}{0{,}1 \cdot 10^6} = 0{,}855 \text{ m}^3\text{/kg}.$$

Darba ķermeņa parametri cikla punktā *2*:

$$v_2 = v_1/\varepsilon = 0{,}855/8{,}5 = 0{,}101 \text{ m}^3\text{/kg};$$

$$p_2 = p_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = p_1\varepsilon^k = 0{,}1\,(8{,}5)^{1,4} = 2{,}0007 \text{ MPa};$$

$$T_2 = T_1\left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = T_1\varepsilon^{k-1} = 298\,(8{,}5)^{1,4-1} = 701{,}4 \text{ K}.$$

Darba ķermeņa parametri cikla punktā *3*: 2444, 13, 6.

$$T_3=T_2+\frac{q_1}{c_v}=701{,}4+\frac{1260}{0{,}723}=1742{,}7\ \text{K};$$

$$p_3=p_2\lambda=p_2\frac{T_3}{T_2}=2{,}0007\cdot\frac{1742{,}7}{701{,}4}=4{,}9709\ \text{MPa};$$

$$v_3=v_2=0{,}101\ \text{m}^3/\text{kg}.$$

Darba ķermeņa parametri cikla punktā *4*:

$$v_4=v_1=0{,}855\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$T_4=T_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1}=1742{,}7\left(\frac{0{,}101}{0{,}855}\right)^{1{,}4-1}=741{,}6\ \text{K};$$

$$p_4=p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k}=4{,}9709\left(\frac{0{,}101}{0{,}855}\right)^{1{,}4}=0{,}2499\ \text{MPa}.$$

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}=1-\frac{1}{8{,}5^{1{,}4-1}}=0{,}575.$$

Ciklā darba ķermeņa (1 kg gāzes) paveiktais darbs

$$l=q_1\eta_t=1260\cdot0{,}575=724{,}5\ \text{kJ/kg}.$$

Ciklā novadītais siltuma daudzums

$$q_2=q_1-l=1260-724{,}5=535{,}5\ \text{kJ/kg}.$$

Darba ķermeņa (gāzes) patēriņš (kg) 1 stundā

$$M=B/b=15/0{,}03=500\ \text{kg/h}.$$

Dzinēja jauda

$$N=\frac{M\cdot l}{\tau}=\frac{500\cdot724{,}5}{3600}=100{,}6\ \text{kW}.$$

Dzinēja cikla ekserģiskais lietderības koeficients

$$\eta_e=\frac{\Delta e_l}{\Delta e_p}=\frac{l}{e_{q1}}=\frac{724{,}5}{801{,}0}=0{,}904,$$

kur siltuma daudzuma q_1 eksergiju nosaka pēc 1.7.11. piemērā aplūkotās metodikas:

$$e_{q1}=q_1\left(1-\frac{T_1}{T_3-T_1}\ln\frac{T_3}{T_1}\right)=$$

$$=1260\left(1-\frac{298}{1742{,}7-298}\ln\frac{1742{,}7}{298}\right)=$$

$$=801{,}0\ \text{kJ/kg}.$$

1.12.2. Iekšdedzes dzinēja darbības pamatā ir cikls ar izobāru siltuma pievadīšanu. Darba ķermeņa parametri sākuma punktā *1* (1.18. att.): $p_1=0{,}08$ MPa; $t_1=30\,°\text{C}$. Darba ķermeni, kura termodinamiskās īpašības atbilst gaisa īpašībām, adiabāti saspiež, kamēr tā temperatūra paaugstinās līdz 780 °C. Darba ķermeņa iepriekšējās izplešanās pakāpe ciklā $\rho=1{,}3$. Dzinēja teorētiskā jauda $N=80$ kW. Aprēķināt cikla raksturīgo punktu parametrus T, p, v, kompresijas pakāpi ε, pievadīto un novadīto siltuma daudzumu, darbu, darba ķermeņa un degvielas patēriņu stundā un īpatnējo degvielas patēriņu, ja tās sadegšanas siltums $Q_z^d=$ $=41\,500$ kJ/kg.

Atrisinājums. Pieņemot, ka darba ķermenis ir ideālā divatomu gāze, nosaka darba ķermeņa parametrus cikla raksturīgajos punktos.

Cikla punktā *1*:

$$p_1=0{,}08\ \text{MPa};\quad T_1=t_1+273=30+273=303\ \text{K};$$

$$v_1=\frac{RT_1}{p_1}=\frac{287\cdot303}{0{,}08\cdot10^6}=1{,}087\ \text{m}^3/\text{kg}.$$

Cikla punktā *2*:

$$T_2=t_2+273=780+273=1053\ \text{K};$$

$$p_2=p_1\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}=0{,}08\left(\frac{1053}{303}\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}}=6{,}2595\ \text{MPa};$$

$$v_2=\frac{RT_2}{p_2}=\frac{287\cdot1053}{6{,}2595\cdot10^6}=0{,}0483\ \text{m}^3/\text{kg}.$$

Cikla punktā *3*:

$$p_3=p_2=6{,}2595\ \text{MPa};$$

$$T_3=T_2\rho=1{,}3\cdot1053=1368{,}9\ \text{K};$$

$$v_3=v_2\rho=0{,}0483\cdot1{,}3=0{,}0632\ \text{m}^3/\text{kg}.$$

Cikla punktā *4*:

$$v_4=v_1=1{,}087\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$p_4=p_3\left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k}=6{,}2595\left(\frac{0{,}0632}{1{,}087}\right)^{1{,}4}=0{,}1166\ \text{MPa};$$

$$T_4=T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}=1368{,}9\left(\frac{0{,}1166}{6{,}2595}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=438{,}7\ \text{K}.$$

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\ \frac{\rho^k-1}{k(\rho-1)}=$$

$$=1-\frac{1{,}3^{1{,}4}-1}{22{,}505^{1{,}4-1}\cdot1{,}4(1{,}3-1)}=0{,}696,$$

kur

$$\varepsilon=\frac{v_1}{v_2}=\frac{1{,}087}{0{,}0483}=22{,}505.$$

Ciklā pievadītais siltuma daudzums

$$q_1=c_p(T_3-T_2)=1{,}012(1368{,}9-1053)=319{,}7\ \text{kJ/kg}.$$

Cikla darbs

$$l=q_1\eta_t=319{,}7\cdot0{,}696=222{,}5\ \text{kJ/kg}.$$

Novadītais siltuma daudzums

$$q_2=q_1-l=97{,}2\ \text{kJ/kg}.$$

Darba ķermeņa (gāzes) patēriņš stundā

$$M=\frac{L}{l}=\frac{N\tau}{l}=\frac{80\cdot3600}{222{,}5}=1294{,}4\ \text{kg/h}.$$

Degvielas patēriņš stundā

$$B=\frac{L}{Q_z{}^d\eta_t}=\frac{N\tau}{Q_z{}^d\eta_t}=\frac{80\cdot3600}{41\,500\cdot0{,}696}=9{,}971\ \text{kg/h}.$$

Degvielas īpatnējais patēriņš

$$b=\frac{B}{N}\cdot1000=\frac{9{,}971\cdot1000}{80}=124{,}6\ \text{g/kW}\cdot\text{h}.$$

1.12.3. Iekšdedzes dzinēja darbības pamatā ir ideālais cikls, kurā siltumu darba ķermenim pievada kombinēti pastāvīgā tilpumā un pastāvīgā spiedienā. Darba ķermeņa kompresijas pakāpe $\varepsilon=18$, spiediena iepriekšējās paaugstināšanas pakāpe $\lambda=2$, iepriekšējās izplešanās pakāpe $\rho=1{,}2$. Darba ķermeņa parametri pirms saspiešanas: $p_1=0{,}1$ MPa, $t_1=35\,°C$; tā termodinamiskās īpašības atbilst gaisa īpašībām. Aprēķināt parametrus p, v, T cikla raksturīgajos punktos (sk. 1.19. att.), darbu, pievadīto un novadīto siltuma daudzumu, kā arī teorētisko jaudu, ja darba ķermeņa patēriņš stundā normālos apstākļos $V_0=600\ \text{m}^3/\text{h}$.

Atrisinājums. Tā kā darba ķermenis ir gaiss ar divatomu ideālās gāzes īpašībām, tad izmanto ideālo gāzu sakarības. Nosaka parametrus cikla raksturīgajos punktos.

Cikla punktā *1*:

$$T_1=35+273=308\ \text{K};\quad p_1=0{,}1\ \text{MPa};$$

$$v_1=\frac{RT_1}{p_1}=\frac{287\cdot308}{0{,}1\cdot10^6}=0{,}884\ \text{m}^3/\text{kg}.$$

Cikla punktā *2*:

$$v_2=v_1/\varepsilon=0{,}884/18=0{,}0491\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$p_2=p_1\varepsilon^k=0{,}1\,(18)^{1{,}4}=5{,}7198\ \text{MPa};$$

$$T_2=T_1\varepsilon^{k-1}=308\,(18)^{1{,}4-1}=978{,}7\ \text{K}.$$

Cikla punktā *3*:

$$v_3=v_2=0{,}0491\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$p_3=p_2\lambda=p_2\frac{p_3}{p_2}=5{,}7198\cdot2=11{,}4396\ \text{MPa};$$

$$T_3=T_2\lambda=978{,}7\cdot2=1957{,}4\ \text{K}.$$

Cikla punktā *4*:

$$p_4=p_3=11{,}4396\ \text{MPa};$$

$$v_4=v_3\rho=\frac{v_4}{v_3}v_3=1{,}2\cdot0{,}0491=0{,}0589\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$T_4=T_3\rho=1{,}2\cdot1957{,}4=2348{,}9\ \text{K}.$$

Cikla punktā *5*:

$$v_5=v_1=0{,}884\ \text{m}^3/\text{kg};$$

$$p_5=p_4\left(\frac{v_4}{v_5}\right)^k=11{,}4396\left(\frac{0{,}0589}{0{,}884}\right)^{1{,}4}=0{,}258\ \text{MPa};$$

$$T_5=\frac{p_5v_5}{R}=\frac{0{,}258\cdot10^6\cdot0{,}884}{287}=794{,}8\ \text{K}.$$

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=1-\frac{1}{\varepsilon^{k-1}}\frac{\lambda\rho^k-1}{\lambda-1+k\lambda(\rho-1)}=$$

$$=1-\frac{1}{18^{1{,}4-1}}\frac{2(1{,}2)^{1{,}4}-1}{2-1+1{,}4\cdot2(1{,}2-1)}=0{,}681.$$

Ciklā pievadītais siltuma daudzums:

izohorā procesā $q'_1=c_v(T_3-T_2)=0{,}723(1957{,}4-978{,}7)=$ $=707{,}6$ kJ/kg;

izobārā procesā $q''_1=c_p(T_4-T_3)=1{,}012(2348{,}9-1957{,}4)=$ $=396{,}2$ kJ/kg;

$$q_1=q'_1+q''_1=707{,}6+396{,}2=1103{,}8\ \text{kJ/kg}.$$

Ciklā darba ķermeņa paveiktais darbs

$$l=q_1\eta_t=1103{,}8\cdot0{,}681=751{,}7\ \text{kJ/kg}.$$

Ciklā novadītais siltuma daudzums

$$q_2=c_v(T_5-T_1)=0{,}723(794{,}8-308)=352{,}0\ \text{kJ/kg}.$$

Pārbaude:

$$q_1=l+q_2=751{,}7+352=1103{,}7\ \text{kJ/kg}.$$

Darba ķermeņa patēriņš stundā

$$M=\frac{p_0V_0}{RT_0}=\frac{101\,325\cdot600}{287\cdot273{,}15}=775{,}5\ \text{kg/h}.$$

Dzinēja teorētiskā jauda

$$N=\frac{L}{\tau}=\frac{Ml}{\tau}=\frac{775{,}5\cdot 751{,}7}{3600}=161{,}9\ \text{kW}.$$

1.12.4. Gāzes turbīna, kas darbojas ar siltuma izobāru pievadīšanu, attīsta jaudu $N=100$ MW. Cikla darba ķermeņa parametri ir $p_1=0{,}102$ MPa, $t_1=15\,°C$, tā termodinamiskās īpašības atbilst gaisa īpašībām. Darba ķermeņa (gaisa) spiedienu kompresorā adiabāti paaugstina 10 reižu. Par kurināmo izmanto dabasgāzi, kuras sadegšanas siltums, pārrēķinot uz kubikmetru normālos apstākļos, $Q_z^d=35\,800$ kJ/m³. Vienam kg darba ķermeņa pievada 1200 kJ siltuma. Aprēķināt cikla termisko lietderības koeficientu, maksimālo temperatūru, no turbīnas aizplūstošā darba ķermeņa temperatūru un kurināmā patēriņu stundā.

Atrisinājums. Pieņemot, ka darba ķermenis ir ideālā divatomu gāze ar gaisa fizikālajām īpašībām, $k=1{,}4$.

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=1-\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}=1-\frac{1}{10^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}}=0{,}482.$$

Darba ķermeņa temperatūra pēc adiabātās saspiešanas kompresorā:

$$T_2=T_1\beta^{\frac{k-1}{k}}=288\cdot 10^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=556{,}0\ \text{K};$$

spiediens $p_2=p_1\beta=10\cdot 0{,}102=1{,}02$ MPa.

Maksimālā darba ķermeņa temperatūra

$$T_3=T_2+\frac{q_1}{c_p}=556+\frac{1200}{1{,}000}=1756\ \text{K}.$$

Darba ķermeņa temperatūra pēc adiabātās izplešanās turbīnā, ņemot vērā, ka $p_2=p_3$ un $p_4=p_1$:

$$T_4=T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}=1756\left(\frac{0{,}102}{1{,}02}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=909{,}5\ \text{K}.$$

Kurināmā — dabasgāzes patēriņš stundā:

$$V_g=\frac{N\tau}{Q_z^d\eta_t}=\frac{100\cdot 10^3\cdot 3600}{35\,800\cdot 0{,}482}=2862\ \text{m}^3/\text{h}.$$

1.12.5. Lidaparāts ar tiešās plūsmas reaktīvo dzinēju, kurā gaisu saspiež, plūsmu bremzējot, lido ar ātrumu 3150 km/h. Gaisa temperatūra $t_1=-50\,°C$, spiediens $p_1=0{,}04$ MPa. Aprēķināt dzinēja termisko lietderības koeficientu un teorētisko jaudu, ja sekundē izlieto 2 kg degvielas, kuras sadegšanas siltums $Q_z^d=42\,000$ kJ/kg. Pieņemt, ka notiek pilnīga adiabāta gaisa plūsmas bremzēšana un nav siltuma zudumu.

Atrisinājums. Pieņemot, ka gaiss ir divatomu ideālā gāze, tā temperatūra pēc bremzēšanas:

$$T_2=T_1+\frac{w_1^2}{2c_p}=(-50+273)+\frac{3150^2\cdot 10^6}{2\cdot 1{,}0\cdot 10^3\cdot 3600^2}=605{,}8\ \text{K}.$$

Kompresija

$$\beta=\frac{p_2}{p_1}=\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}=\left(\frac{605{,}8}{223}\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}}=33{,}0.$$

Reaktīvā dzinēja cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=1-\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}=1-\frac{1}{33^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}}=0{,}632.$$

Dzinēja attīstītā teorētiskā jauda

$$N=\frac{BQ_z^d\eta_t}{\tau}=\frac{2\cdot 42\,000\cdot 0{,}632}{1}=53\,088\ \text{kW}.$$

1.12.6. No reaktīvo dzinēju sistēmas sprauslām izplūst degšanas produkti ar ātrumu $w=2200$ m/s. Darba ķermeņa vienam kilogramam pievadītais siltuma daudzums $q_1=4000$ kJ/kg. Aprēķināt degvielas patēriņu sekundē, ja tās sadegšanas siltums $Q_z^d=42\,000$ kJ/kg un reaktīvajai sistēmai jāattīsta jauda $N=20\cdot 10^6$ kW.

Atrisinājums. Reaktīvā dzinēja cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=\frac{w^2}{2q_1}=\frac{2200^2}{2\cdot 4000\cdot 10^3}=0{,}605.$$

Degvielas patēriņš sekundē

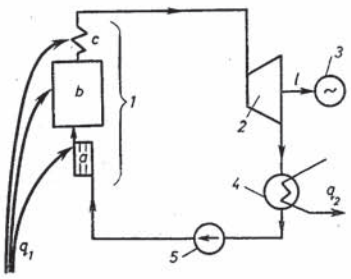
$$B=\frac{N\tau}{Q_z^d\eta_t}=\frac{20\cdot 10^6}{42\cdot 10^3\cdot 0{,}605}=787{,}1\ \text{kg/s}.$$

1.13. TVAIKA ENERĢĒTISKO IEKĀRTU CIKLI

Aprēķinu izteiksmes

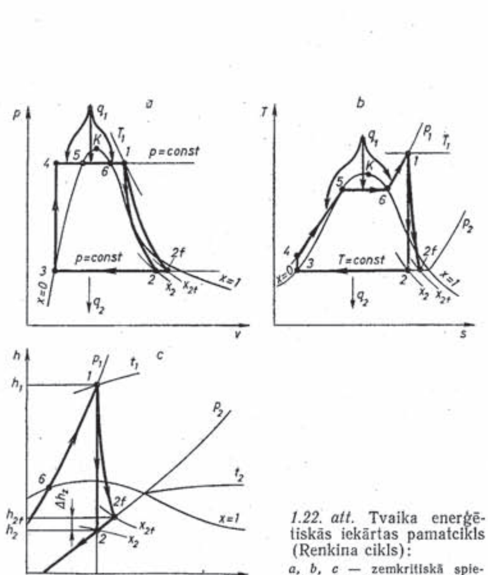
Tvaika enerģētiskās iekārtas (1.21. att.) pamatcikla jeb Renkina cikla (1.22. att.) termisko lietderības koeficientu var izteikt ar entalpijām, ņemot vērā enerģijas patēriņu barošanas sūknī $v_3(p_1-p_2)$:

$$\eta_t^{(R)}=\frac{q_1-q_2}{q_1}=\frac{q_0}{q_1}=\frac{h_1-h_2-v_3(p_1-p_2)}{h_1-h_3-v_3(p_1-p_2)}\approx\frac{h_1-h_2}{h_1-h_3}. \qquad (1.261)$$



1.21. att. Tvaika enerģētiskās iekārtas pamatshēma:

1 — katlu iekārta (*a* — ekonomaizers, *b* — tvaika ģenerators, *c* — tvaika pārkarsētājs); *2* — tvaika turbīna; *3* — elektroģenerators; *4* — tvaika kondensators; *5* — barošanas sūknis.



1.22. att. Tvaika enerģētiskās iekārtas pamatcikls (Renkina cikls):

a, b, c — zemkritiskā spiedienā *p-v*, *T-s* un *h-s* koordinātēs.

1 kg tvaika pievadītais siltuma daudzums

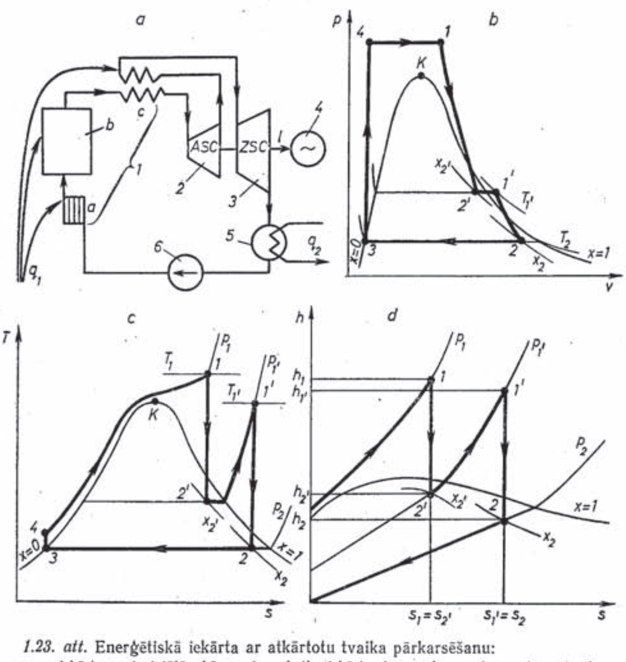
$$q_1 = h_1 - h_3 - v_3(p_1 - p_2) \approx h_1 - h_3, \tag{1.262}$$

novadītais siltuma daudzums

$$q_2 = h_2 - h_3. \tag{1.263}$$

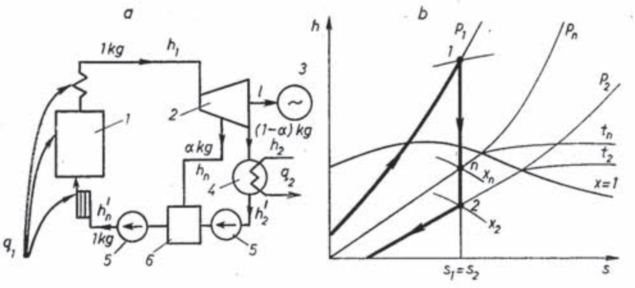
Īpatnējais tvaika patēriņš 1 kW·h enerģijas ražošanai:

$$d = \frac{3600}{(h_1 - h_2)\eta_{0i}}\ (\mathrm{kg/(kW \cdot h)}). \tag{1.264}$$



1.23. att. Enerģētiskā iekārta ar atkārtotu tvaika pārkarsēšanu:

a — iekārtas principiālā shēma: *1* — katlu iekārta (*a* — ekonomaizers; *b* — tvaika ģenerators; *c* — tvaika pārkarsētājs), *2* — turbīnas augstspiediena cilindrs, *3* — turbīnas zemspiediena cilindrs, *4* — elektroģenerators, *5* — tvaika kondensators, *6* — barošanas sūknis; *b* — cikls *p-v* koordinātēs; *c* — cikls *T-s* koordinātēs; *d* — cikls *h-s* koordinātēs (virskritiskā spiedienā).



1.24. att. Tvaika enerģētiskais cikls ar siltuma reģenerāciju:

a — principiālā shēma: *1* — katlu iekārta, *2* — tvaika turbīna ar nozartvaika novadīšanu, *3* — elektroģenerators, *4* — tvaika kondensators, *5* — sūkņi, *6* — reģeneratīvais barošanas ūdens uzsildītājs; *b* — cikla procesi *h-s* diagrammā.

Īpatnējais kurināmā patēriņš 1 kW·h enerģijas ražošanai:

$$b=\frac{3600}{\eta_t\eta_{oi}Q_z^d}\ (\mathrm{kg/(kW\cdot h)}). \qquad (1.265)$$

Ciklā ar atkārtotu tvaika pārkarsēšanu (1.23. att.): paveiktais darbs

$$l=q_0=(h_1-h_{2'})+(h_{1'}-h_2)-v_3(p_1-p_2); \qquad (1.266)$$

pievadītais siltuma daudzums

$$q_1=(h_1-h_3)+(h_{1'}-h_{2'})-v_3(p_1-p_2); \qquad (1.267)$$

termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=\frac{q_0}{q_1}=\frac{(h_1-h_{2'})+(h_{1'}-h_2)-v_3(p_1-p_2)}{(h_1-h_3)+(h_{1'}-h_{2'})-v_3(p_1-p_2)}. \qquad (1.268)$$

Reģeneratīvajā ciklā (1.24. att.) katla barošanas ūdeni uzkarsē ar nozartvaiku, ko ņem no turbīnas spiediena pakāpēm. Apzīmējot nozartvaika entalpiju ar h_n, uzkarsētā barošanas ūdens entalpiju ar h'_n un nozartvaika daudzumu uz 1 kg turbīnā ieplūdušā tvaika ar a, saplūdes tipa reģeneratīvā ūdens uzsildītāja siltuma bilance ir šāda:

$$h'_n=ah_n+(1-a)h'_2, \qquad (1.269)$$

kur

$$a=\frac{h'_n-h'_2}{h_n-h'_2}. \qquad (1.270)$$

Reģeneratīvā cikla darbs

$$l_r=a(h_1-h_n)+(1-a)(h_1-h_2) \qquad (1.271)$$

un lietderības koeficients

$$\eta_r=\frac{l_r}{h_1-h'_n}=$$

$$=\frac{a(h_1-h_n)+(1-a)(h_1-h_2)}{h_1-h'_n}. \qquad (1.272)$$

Tvaika īpatnējais patēriņš

$$d=$$

$$=\frac{3600}{(1-a)(h_1-h_2)+a(h_1-h_n)}$$

$$(\mathrm{kg/(kW\cdot h)}). \qquad (1.273)$$

Turbīnas jauda

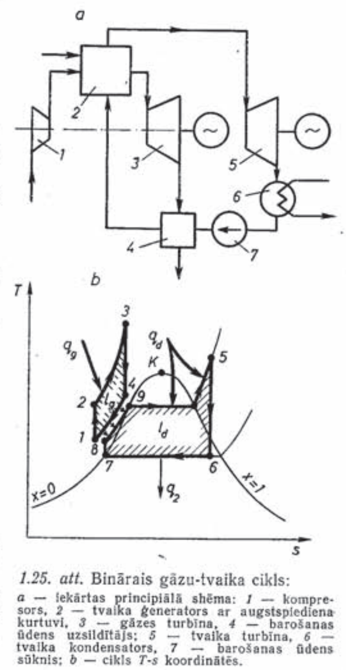
$$N=D[(1-a)(h_1-$$

$$-h_2)+a(h_1-h_n)]$$

$$(\mathrm{kW}), \qquad (1.274)$$

kur D — tvaika patēriņš (kg/s).

Bināro gāzu-tvaika ciklu var uzskatīt par gāzes turbīnas un tvaika turbīnas ciklu apvienojumu (1.25. att.). Ja notiek no turbīnas novadītās gāzes siltuma izmantošana barošanas ūdens uzkarsēšanai, var iegūt šādas sakarības.



1.25. att. Binārais gāzu-tvaika cikls:

a — iekārtas principiālā shēma: *1* — kompresors, *2* — tvaika ģenerators ar augstspiediena kurtuvi, *3* — gāzes turbīna, *4* — barošanas ūdens uzsildītājs; *5* — tvaika turbīna, *6* — tvaika kondensators, *7* — barošanas ūdens sūknis; *b* — cikls *T-s* koordinātēs.

Gāzveida darba ķermeņa patēriņa un tvaika patēriņa attiecība

$$m=\frac{h_9-h_8}{h_4-h_1}. \qquad (1.275)$$

Cikla kopējais darbs veidojas no gāzes un tvaika paveiktā darba:

$$l=l_g+l_d=m((h_3-h_4)-(h_2-h_1))+(h_5-h_6)-(h_8-h_7). \qquad (1.276)$$

Pievadītais siltuma daudzums arī veidojas no gāzes ciklam un tvaika ciklam pievadītā siltuma daudzuma:

$$q=q_g+q_d=m(h_3-h_2)+(h_5-h_9). \qquad (1.277)$$

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t = \frac{l_g + l_d}{q_g + q_d}. \tag{1.278}$$

Aprēķinu piemēri

1.13.1. Tvaika turbīnas iekārta darbojas pēc pamatcikla shēmas (sk. 1.22. att.). Ūdens tvaika parametri, ieplūstot turbīnā, ir $p_1 = 14{,}0$ MPa, $t_1 = 500\,°C$, izplūstot no turbīnas, — $p_2 = 0{,}005$ MPa. Turbīnas iekšējais relatīvais lietderības koeficients $\eta_{oi} = 0{,}9$. Šķidrā kurināmā patēriņš enerģētiskajā iekārtā $B = 25$ t/h, kurināmā sadegšanas siltums $Q_z^d = 40\,000$ kJ/kg. Katlu iekārtas lietderības koeficients $\eta_{k.i} = 0{,}89$. Temperatūra dzesējošam ūdenim, kurš novada tvaika kondensācijas siltumu no kondensatora, paaugstinās par $\Delta t = 15\,°C$. Aprēķināt enerģētiskās iekārtas cikla raksturīgo punktu parametrus t, p, v, h, s, iekšējo lietderības koeficientu η_i, tvaika patēriņu stundā D, īpatnējo tvaika patēriņu un īpatnējo nosacītā kurināmā patēriņu.

Atrisinājums. Pēc ūdens tvaika tabulu datiem, ņemot vērā enerģētiskās iekārtas ciklu veidojošos procesus, nosaka raksturīgo punktu parametrus (sk. 1.22. att.).

Cikla punktā *1*:

$t_1 = 500\,°C$; $p_1 = 14{,}0$ MPa; $v_1 = 0{,}022\,52$ m³/kg; $h_1 = 3321$ kJ/kg; $s_1 = 6{,}390$ kJ/kg.

Cikla punktā *2*:

$p_2 = 0{,}005$ MPa; $t_{2s} = 32{,}85\,°C$; $v'_2 = 0{,}001\,001$ m³/kg; $v''_2 = 25{,}77$ m³/kg; $h'_2 = 137{,}83$ kJ/kg; $h''_2 = 2561$ kJ/kg; $s'_2 = 0{,}4761$ kJ/(kg·K); $s''_2 = 8{,}393$ kJ/(kg·K).

Tā kā $s_2 = s_1$, tad tvaika sausuma pakāpe

$$x_2 = \frac{s_2 - s'_2}{s''_2 - s'_2} = \frac{6{,}390 - 0{,}4761}{8{,}393 - 0{,}4761} = 0{,}747$$

un tvaiks ir mitrā piesātinātā stāvoklī.

19,2493

$$v_2 = v'_2 + (v''_2 - v'_2)x_2 = 0{,}001\,01 + (28{,}19 - 0{,}001\,01)\,0{,}747 = 21{,}058 \text{ m}^3/\text{kg};$$

$$h_2 = h'_2 + (h''_2 - h'_2)x_2 = 137{,}83 + (2561 - 137{,}83)\,0{,}747 = 1947{,}938 \text{ kJ/kg}.$$ W

Cikla punktā *2f*:

ņemot vērā turbīnas iekšējos enerģijas zudumus,

$$\Delta h_z = (h_1 - h_2)(1 - \eta_{oi}) = (3321 - 1947{,}938)(1 - 0{,}9) = 137{,}306 \text{ kJ/kg},$$ N

kas izraisa tvaika entalpijas krituma samazināšanos turbīnā. Līdz ar to palielinās tvaika entalpija aiz turbīnas un tā sausuma pakāpe.

W

$$h_{2f} = h_2 + \Delta h_z = 1947{,}9 + 137{,}3 = 2085{,}2 \text{ kJ/kg}.$$

Pēc spiediena p_2 un entalpijas h_{2f} no h-s diagrammas nolasa $x_{2f} = 0{,}805$.

20,74

$$v_{2f} = x_{2f} v''_2 = 0{,}805 \cdot 28{,}19 = 22{,}693 \text{ m}^3/\text{kg}.$$ 6,390

$$s_{2f} = s'_2 + (s''_2 - s'_2)x_{2f} = 0{,}4761 + (8{,}393 - 0{,}4761)\,0{,}805 = 0{,}849 \text{ kJ/(kg·K)}.$$ 6,8 kJ/kg·K. // 2,08 kJ/kgK.

Cikla punktā *3*:

$p_3 = p_2 = 0{,}005$ MPa; $t_3 = t_2 = 32{,}88\,°C$; $v_3 = v'_2 = 0{,}001\,005\,3$ m³/kg; $h_3 = h'_2 = 137{,}83$ kJ/kg; $s_3 = s'_2 = 0{,}4761$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *4*:

$p_4 = p_1 = 14{,}0$ MPa; temperatūru izsaka no izteiksmes $v_3(p_1 - p_2) = h_4 - h_3 = c(t_4 - t_3)$, t. i., $t_4 = t_3 + \frac{v_3(p_1 - p_2)}{c} = 32{,}88 + \frac{0{,}001\,005\,3(14 - 0{,}005)\,10^6}{4{,}19 \cdot 10^3} = 36{,}24\,°C$; 32,88

$v_4 \approx v_3 \approx 0{,}001$ m³/kg; $h_4 = h_3 + v_3(p_1 - p_2) = 137{,}83 + 0{,}001(14 - 0{,}005)\,10^6 \cdot 10^{-3} = 151{,}83$ kJ/kg; entropijas pieaugums barošanas sūknī

15

$$\Delta s_4 = \frac{\Delta q}{T_4} = \frac{c\Delta t}{T_4} = \frac{4{,}19 \cdot 3{,}36}{309{,}4} = 0{,}0455 \text{ kJ/(kg·K)}$$ 0,254 kJ/kg·K

305

un entropija $s_4 = s_3 + \Delta s_4 = 0{,}4761 + 0{,}0455 = 0{,}5216$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *5*: 0,6815 kJ/kg·K

$p_5 = p_1 = 14{,}0$ MPa; $t_5 = t_{5s} = 336{,}63\,°C$; $v_5 = v'_5 = 0{,}001\,611$ m³/kg; $h_5 = h'_5 = 1570{,}8$ kJ/kg; $s_5 = s'_5 = 3{,}623$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *6*:

$p_6 = p_1 = 14{,}0$ MPa; $t_6 = t_{5s} = 336{,}63\,°C$; $v_6 = v''_6 = 0{,}011\,49$ m³/kg; $h_6 = h''_6 = 2638$ kJ/kg; $s_6 = s''_6 = 5{,}372$ kJ/(kg·K).

Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t = \frac{l}{q_1} = \frac{(h_1 - h_2) - v_3(p_1 - p_2)}{(h_1 - h_3) - v_3(p_1 - p_2)} = \frac{(3321 - 1947{,}9) - 0{,}001(14 - 0{,}005)\,10^3}{(3321 - 137{,}83) - 0{,}001(14 - 0{,}005)\,10^3} = 0{,}429.$$

Cikla iekšējais lietderības koeficients

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_1} = \eta_t \eta_{oi} = 0{,}429 \cdot 0{,}9 = 0{,}386.$$

Ciklam pievadītais siltuma daudzums

$$q_1=(h_1-h_3)-v_3(p_1-p_2)=(3327-137{,}83)-$$
$$-0{,}001\,(14-0{,}005)\cdot 10^3=3169{,}2\ \text{kJ/kg}.$$

Ciklam novadītais siltuma daudzums

$$q_2=h_{2t}-h_3=2085{,}2-137{,}83=1947{,}4\ \text{kJ/kg}.$$

Tvaika patēriņš stundā

36

$$D=\frac{Q_1}{q_1}=\frac{BQ_z{}^d\eta_{k.1}}{q_1}=\frac{25\cdot 10^3\cdot 40\,000\cdot 0{,}89}{3169{,}2}=280\,828\ \text{kg/h}.$$

Tvaika īpatnējais patēriņš

~~2,35~~

$$d=\frac{3600}{(h_1-h_2)\eta_{oi}}=\frac{3600}{(3321-1947{,}9)\,0{,}9}=2{,}913\ \text{kg/(kW}\cdot\text{h)}.$$

Nosacītā kurināmā ar sadegšanas siltumu $Q_n=29\,308$ kJ/kg īpatnējais patēriņš:

$$b_n=\frac{3600q_1}{(h_1-h_2)\eta_{oi}Q_n}=\frac{3600}{\eta_i Q_n}=\frac{3600}{0{,}386\cdot 29\,308}=$$
$$=0{,}3182\ \text{kg/(kW}\cdot\text{h)}.$$

Dzesējošā ūdens patēriņš, izsakot to no siltuma bilances vienādojuma,

$$M_{H_2O}=\frac{q_2D}{c\Delta t}=\frac{1947{,}4\cdot 280\,828}{4{,}19\cdot 15}=8\,701\,423\ \text{kg/h}.$$

1.13.2. Tvaika enerģētiskajā iekārtā realizē ideālu ciklu ar atkārtotu tvaika pārkarsēšanu (sk. 1.23. att.). Tvaika parametri pirms ieplūdes turbīnā: $p_1=25{,}0$ MPa, $t_1=525\,°C$; atkārtotu pārkarsēšanu veic spiedienā $p_p=1{,}5$ MPa līdz temperatūrai $t_p=490\,°C$. Tvaiks ieplūst kondensatorā ar spiedienu $p_k=0{,}004$ MPa. Iekārtas jauda $N=500$ MW. Aprēķināt tvaika un kurināmā patēriņu stundā, ja kurināmā sadegšanas siltums $Q_z{}^d=25\,000$ kJ/kg, un ūdens patēriņu kondensatora dzesēšanai, ja tā temperatūra paaugstinās par $\Delta t=12\,°C$. Noteikt cikla raksturīgo punktu parametrus, kā arī īpatnējo tvaika un nosacītā kurināmā patēriņu. Katlu iekārtas lietderības koeficients $\eta_{k.1}=0{,}89$.

Atrisinājums. Izmantojot ūdens tvaika tabulu datus, nosaka cikla raksturīgo punktu parametrus.

Cikla punktā *1*:

$p_1=25{,}0$ MPa; $t_1=500\,°C$; $v_1=0{,}011\,43$ m³/kg;
$h_1=3166$ kJ/kg; $s_1=5{,}982$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *2′*, ņemot vērā, ka $s_{2'}=s_1=5{,}982$ kJ/(kg·K):

$p_{2'}=p_p=1{,}5$ MPa; $t_{2's}=198{,}28\,°C$; $v'_{2'}=0{,}001\,154$ m³/kg; $v''_{2'}=0{,}1317$ m³/kg; $h'_{2'}=844{,}6$ kJ/kg; $h''_{2'}=2792$ kJ/kg; $s'_{2'}=2{,}314$ kJ/(kg·K); $s''_{2'}=6{,}445$ kJ/(kg·K);

$$x_{2'}=\frac{s_{2'}-s'_{2'}}{s''_{2'}-s'_{2'}}=\frac{5{,}982-2{,}314}{6{,}445-2{,}314}=0{,}888;$$

$$v_{2'}=v'_{2'}+(v''_{2'}-v'_{2'})x_{2'}=0{,}001\,154+(0{,}1317-0{,}001\,154)\,0{,}888=$$
$$=0{,}1171\ \text{m}^3/\text{kg};$$
$$h_{2'}=h'_{2'}+(h''_{2'}-h'_{2'})x_{2'}=844{,}6+(2792-844{,}6)\,0{,}888=2573{,}9\ \text{kJ/kg}.$$

Cikla punktā *1′*:

$p_p=1{,}5$ MPa; $t_p=490\,°C$; $v_{1'}=0{,}2318$ m³/kg; $h_{1'}=3451$ kJ/kg;
$s_{1'}=7{,}539$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *2*, ņemot vērā, ka $s_2=s_{1'}=7{,}539$ kJ/(kg·K):

$p_2=0{,}004$ MPa; $t_2=t_{2s}=28{,}98\,°C$; $s'_2=0{,}4225$ kJ/(kg·K);
$s''_2=8{,}473$ kJ/(kg·K);

$$x_2=\frac{s_2-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{7{,}539-0{,}4225}{8{,}473-0{,}4225}=0{,}884;$$

$v'_2=0{,}0010$ m³/kg; $v''_2=34{,}81$ m³/kg; $h'_2=121{,}42$ kJ/kg;
$h''_2=2554$ kJ/kg;

$$v_2=v'_2+(v''_2-v'_2)x_2=0{,}001+(34{,}81-0{,}001)\,0{,}884=30{,}772\ \text{m}^3/\text{kg};$$
$$h_2=h'_2+(h''_2-h'_2)x_2=121{,}42+(2554-121{,}42)\,0{,}884=2271{,}8\ \text{kJ/kg}.$$

Cikla punktā *3*:

$p_3=0{,}004$ MPa; $t_3=t_{2s}=28{,}98\,°C$; $v_3=v'_2=0{,}001$ m³/kg;
$h_3=h'_2=121{,}42$ kJ/kg; $s_3=s'_2=0{,}4225$ kJ/(kg·K).

Cikla punktā *4* aiz barošanas sūkņa:

$p_4=p_1=25{,}0$ MPa; $v_4=v_3=0{,}001$ m³/kg;

temperatūru t_4 nosaka pēc vienādojuma $c(t_4-t_3)=v_3(p_1-p_2)$, no kurienes

$$t_4=t_3+\frac{v_3(p_1-p_2)}{c}=$$
$$=28{,}98+\frac{0{,}001\,(25-0{,}004)\,10^3}{4{,}19}=34{,}95\,°C;$$

$h_4=h_3+\Delta h_4=121{,}42+25{,}00=146{,}42$ kJ/kg, kur Δh_4 nosaka enerģijas patēriņš barošanas sūknī.

Entropijas pieaugums barošanas sūknī

$$\Delta s_4=\frac{q}{T_4}=\frac{c(t_4-t_3)}{34{,}95+273{,}15}=$$
$$=\frac{4{,}19\,(34{,}95-28{,}98)}{34{,}95+273{,}15}=0{,}0815\ \text{kJ/(kg}\cdot\text{K)}$$

un

$$s_4=s_3+\Delta s_4=0{,}4225+0{,}0815=0{,}5040\ \mathrm{kJ/(kg\cdot K)}.$$

Aiz barošanas sūkņa darba ķermenim ir virskritiskais spiediens.
Cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=\frac{l}{q_1}=\frac{(h_1-h_{2'})+(h_{1'}-h_2)-v_3(p_1-p_2)}{(h_1-h_3)+(h_{1'}-h_{2'})-v_3(p_1-p_2)}=$$

$$=\frac{(3166-2573{,}9)+(3451-2271{,}8)-0{,}001\,(25-0{,}004)\,10^3}{(3166-121{,}42)+(3451-2573{,}9)-0{,}001\,(25-0{,}004)\,10^3}=$$

$$=\frac{1746{,}3}{3896{,}7}=0{,}448.$$

Ciklā novadītais siltuma daudzums

$$q_2=h_2-h_3=2271{,}8-121{,}42=2150{,}4\ \mathrm{kJ/kg}.$$

Kurināmā patēriņš stundā

$$B=\frac{N\tau}{Q_z^d\eta_t}=\frac{500\cdot10^3\cdot3600}{25\,000\cdot0{,}448}=160\,714\ \mathrm{kg/h}.$$

Tvaika patēriņš stundā

$$D=\frac{L}{l}=\frac{N\tau}{l}=\frac{500\cdot10^3\cdot3600}{1746{,}3}=1\,030\,750\ \mathrm{kg/h}.$$

Dzesējošā ūdens patēriņš

$$M_{H_2O}=\frac{Q_2}{c\Delta t}=\frac{q_2D}{c\Delta t}=\frac{2150{,}4\cdot1\,030\,750}{4{,}19\cdot12}=$$

$$=44\,083{,}6\cdot10^3\ \mathrm{kg/h}.$$

Tvaika īpatnējais patēriņš

$$d=\frac{3600}{q_1\eta_t}=\frac{3600}{3896{,}7\cdot0{,}448}=2{,}062\ \mathrm{kg/(kW\cdot h)}.$$

Dotā naturālā kurināmā īpatnējais patēriņš

$$b=\frac{3600}{\eta_tQ_z^d}=\frac{3600}{0{,}448\cdot25\,000}=0{,}321\ \mathrm{kg/(kW\cdot h)}.$$

1.13.3. Tvaika enerģētiskā iekārta darbojas pēc vienpakāpes tvaika reģeneratīvā pamatcikla shēmas, kurā katla barošanas ūdeni karsē ar nozartvaiku saplūdes tipa reģeneratīvajā sildītājā (sk. 1.24. att.). Turbīnā ieplūstošā tvaika parametri $p_1=9$ MPA, $t_1=490\,°C$, spiediens kondensatorā $p_2=0{,}005$ MPa. Nozartvaika spiediens $p_n=1{,}0$ MPa, barošanas ūdeni uzkarsē līdz piesātināšanas temperatūrai. Tvaika kopējais patēriņš $D=10$ kg/s. Aprēķināt tvaika enerģētiskās iekārtas ciklu un tās jaudu, salīdzināt reģeneratīvā cikla un analoga Renkina cikla termiskos lietderības koeficientus.

Atrisinājums. Izmantojot ūdens tvaika tabulu datus, nosaka aprēķinam vajadzīgos cikla punktu parametrus (sk. 1.24. att.).

Punktā *1*:

$p_1=9$ MPa; $t_1=490\,°C$; $h_1=3360$ kJ/kg; $s_1=6{,}623$ kJ/(kg·K).

Punktā *n*:

$p_n=1{,}0$ MPa; $t_{ns}=179{,}88\,°C$; $h'_n=762{,}7$ kJ/kg;
$h''_n=2778$ kJ/kg; $s'_n=2{,}138$ kJ/(kg·K); $s''_n=6{,}587$ kJ/(kg·K);
$s_n=s_1=6{,}623$ kJ/(kg·K);

$$x_n=\frac{s_n-s'_n}{s''_n-s'_n}=\frac{6{,}623-2{,}138}{6{,}587-2{,}138}=1{,}01\approx1,$$

tātad nozartvaiks praktiski ir sauss piesātināts tvaiks;
$h_n=h''_n=2778$ kJ/kg.

Punktā *2*:

$p_2=0{,}005$ MPa; $t_{2s}=32{,}88\,°C$; $h'_2=137{,}83$ kJ/kg;
$h''_2=2561$ kJ/kg; $s'_2=0{,}4761$ kJ/(kg·K); $s''_2=8{,}393$ kJ/(kg·K);
$s_2=s_1=6{,}623$ kJ/(kg·K);

$$x_2=\frac{s_2-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{6{,}623-0{,}4761}{8{,}393-0{,}4761}=0{,}776;$$

$$h_2=h'_2+(h''_2-h'_2)x_2=137{,}83+(2561-137{,}83)\,0{,}776=2018{,}21\ \mathrm{kJ/kg}.$$

Barošanas ūdens entalpija $h'_n=762{,}7$ kJ/kg.

Nozartvaika daudzums

$$a=\frac{h'_n-h'_2}{h_n-h'_2}=\frac{762{,}7-137{,}83}{2778-137{,}83}=$$

$$=0{,}237\ \text{kg nozartvaika/(kg tvaika)}.$$

Reģeneratīvā cikla darbs

$$l_r=a(h_1-h_n)+(1-a)(h_1-h_2)=0{,}237\,(3360-2778)+$$
$$+(1-0{,}237)\,(3360-2018{,}21)=1161{,}7\ \mathrm{kJ/kg}.$$

Pievadītais siltuma daudzums

$$q_{1r}=h_1-h'_n=3360-762{,}7=2597{,}3\ \mathrm{kJ/kg}.$$

Reģeneratīvā cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t^{(r)}=\frac{l_r}{q_{1r}}=\frac{1161{,}7}{2597{,}3}=0{,}447.$$

Atbilstošā Renkina cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t^{(R)}=\frac{l}{q_1}=\frac{h_1-h_2}{h_1-h'_2}=\frac{3360-2018{,}21}{3360-137{,}83}=0{,}416.$$

Tvaika īpatnējais patēriņš

$$d=\frac{3600}{l_r}=\frac{3600}{1161,7}=3{,}099\ \text{kg/(kW}\cdot\text{h)}.$$

Turbīnas teorētiskā jauda

$$N=Dl_r=10\cdot 1161{,}7=11\,617\ \text{kW}.$$

1.13.4. Enerģētiskā iekārta darbojas pēc ideālā gāzu-tvaika cikla. Tā sastāv no tvaika un gāzes turbīniekārtām (sk. 1.25. att.). Gāzes turbīnas darbības pamatā ir cikls ar izobāru siltuma pievadīšanu (p=const). Cikla darba ķermeņa, kurš atbilst gaisam, parametri ir $p_1=0{,}1$ MPa, $t_1=15\,°C$, saspiešanas pakāpe $\beta=8$; gāze ieplūst turbīnā temperatūrā $t_3=1000\,°C$. Tvaika turbīnā realizē Renkina ciklu, kura parametri ir $p_5=21$ MPa; $t_5=450\,°C$; $p_6=0{,}004$ MPa. Aprēķināt ideālajam gāzu-tvaika ciklam pievadīto siltuma daudzumu, cikla darbu un lietderības koeficientu.

Atrisinājums. Nosaka vajadzīgos gāzu cikla punktu parametrus, izmantojot ideālo gāzu termodinamisko īpašību tabulas no grāmatas [1.9].

Punktā *1*:

$t_1=15\,°C$; $p_1=0{,}10$ MPa; $h_1=288{,}27$ kJ/kg; $\pi_{01}=1{,}2045$.

Punktā *2*:

$p_2=p_1\beta=0{,}1\cdot 8=0{,}8$ MPa; $\pi_{02}=\pi_{01}p_2/p_1=1{,}2045\cdot 8=9{,}636$;
$t_2=246\,°C$; $h_2=522{,}76$ kJ/kg.

Punktā *3*:

temperatūra $t_3=1000\,°C$; $p_3=p_2=0{,}8$ MPa; $\pi_{03}=303{,}6$;
$h_3=1363{,}97$ kJ/kg.

Punktā *4*:

$p_4=p_1=0{,}1$ MPa; $\pi_{04}=\pi_{03}p_4/p_3=303{,}6\cdot 1/8=37{,}95$;
$t_4=480\,°C$; $h_4=770{,}64$ kJ/kg.

Aprēķina Renkina ciklu, izmantojot ūdens tvaika tabulu datus.

Punktā *5*:

$p_5=20$ MPa; $t_5=480\,°C$; $h_5=3170$ kJ/kg; $s_1=6{,}055$ kJ/(kg·K).

Punktā *6*:

$p_6=0{,}004$ MPa; $t_{6s}=28{,}98\,°C$; $h'_6=121{,}42$ kJ/kg;
$h''_6=2554$ kJ/kg; $s'_6=0{,}4225$ kJ/(kg·K); $s''_6=8{,}473$ kJ/(kg·K);
$s_6=s_5=6{,}055$ kJ/kg;

$$x_6=\frac{s_6-s'_6}{s''_6-s'_6}=\frac{6{,}055-0{,}4225}{8{,}473-0{,}4225}=0{,}7;$$

$$h_6=h'_6+(h''_6-h'_6)x_6=121{,}42+(2554-121{,}42)0{,}7=1824{,}23\ \text{kJ/kg}.$$

Punktā *7*:

$p_7=0{,}004$ MPa; $t_7=t_{7s}=28{,}98\,°C$; $h_7=h'_7=121{,}42$ kJ/kg.

Punkta *8* parametrus pieņem vienādus ar punkta *7* parametriem, jo neievēro barošanas sūkņa enerģiju.

Punktā *9*:

$p_9=p_5=20$ MPa; $t_9=t_{9s}=365{,}71\,°C$; $h_9=h'_9=1827$ kJ/kg.

Gāzveida darba ķermeņa patēriņa un tvaika patēriņa attiecība

$$m=\frac{h_9-h_8}{h_4-h_1}=\frac{1827-121{,}42}{770{,}64-288{,}27}=3{,}536\ \text{kg}.$$

Ciklam pievadītais siltuma daudzums uz 1 kg tvaika:

$$q_1=q_g+q_d=m(h_3-h_2)+(h_5-h_9)=$$
$$=3{,}536(1363{,}97-522{,}76)+(3170-1827)=4340\ \text{kJ/kg}.$$

Cikla darbs uz 1 kg tvaika:

$$l=l_g+l_d=m(h_3-h_4)-(h_2-h_1))+(h_5-h_6)=$$
$$=3{,}536((1363{,}97-770{,}64)-(522{,}76-288{,}27))+$$
$$+(3170-1824{,}23)=2614{,}6\ \text{kJ/kg}.$$

Gāzu-tvaika cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t=\frac{l}{q_1}=\frac{2614{,}6}{4340}=0{,}602.$$

Gāzes turbīnas cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t^{(g)}=1-\frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}}=1-\frac{1}{8^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}}=0{,}448.\quad 0{,}57.$$

Renkina cikla termiskais lietderības koeficients

$$\eta_t^{(R)}=\frac{h_5-h_6}{h_5-h_8}=\frac{3170-1824{,}23}{3170-121{,}42}=0{,}441.$$

1.14. SALDĒŠANAS IEKĀRTU CIKLI

Aprēķinu izteiksmes

Saldēšanas iekārtu darbības pamatā ir apgrieztie cikli. Saldēšanas ciklam novadītais siltuma daudzums q_k veidojas no siltuma daudzuma q_0, ko atņem dzesējamam objektam, t. i., no aukstuma ražīguma un kompresorā patērētā darba l:

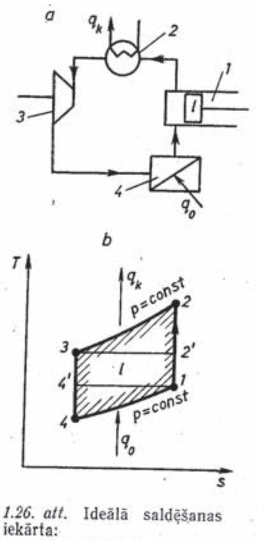
$$q_k=q_0+l. \tag{1.279}$$

Ja ideālā saldēšanas mašīna darbojas pēc apgrieztā Karno cikla, saldēšanas koeficients

$$\varepsilon_K=\frac{q_0}{l}=\frac{T_1}{T_3-T_1}. \tag{1.280}$$

Saldēšanas koeficients gāzes ciklam (1.26. att.)

$$\varepsilon_g=\frac{q_0}{l}=\frac{T_4}{T_3-T_4}. \tag{1.281}$$



1.26. att. Ideālā saldēšanas iekārta:

a — principiālā shēma: *1* — kompresors, *2* — siltuma novadītājs, *3* — izplešanās mašīna — detanders, *4* — saldēšanas kamera; *b* — gāzes cikls *T-s* koordinātēs.

Izmantojot par saldēšanas aģentu vielu tvaikus (freonu, amonjaku, ogleklja dioksīdu u. c.), kompresijas saldēšanas iekārtai enerģijas daudzumus lietderīgi izteikt ar tvaika entalpijām (1.27. att.):

$$q_0 = h_1 - h_5 = h_1 - h_4; \tag{1.282}$$

$$l = h_2 - h_1; \tag{1.283}$$

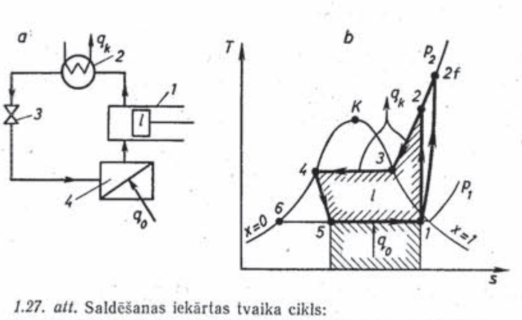
$$\varepsilon_d = \frac{q_0}{l} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}. \tag{1.284}$$

Absorbcijas tipa saldēšanas iekārtās (1.28. att.) siltuma bilance veidojas no aukstuma ražīguma q_0, ģeneratoram pievadītā siltuma daudzuma q_g, absorberam un kondensatoram novadītā siltuma daudzuma q_a un q_k:

$$q_0 + q_g = q_a + q_k. \tag{1.285}$$

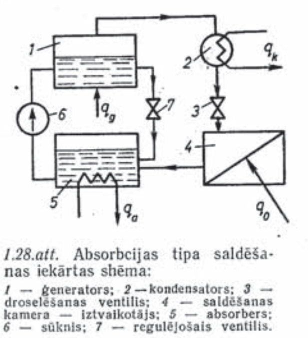
Siltuma izmantošanas koeficients

$$\xi = \frac{q_0}{q_g}. \tag{1.286}$$



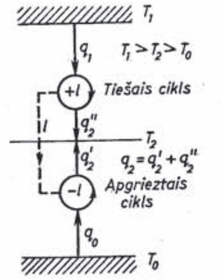
1.27. att. Saldēšanas iekārtas tvaika cikls:

a — iekārtas principiālā shēma: *1* — kompresors, *2* — kondensators, *3* — droselēšanas ventilis, *4* — saldēšanas kamera — iztvaikotājs; *b* — cikls *T-s* koordinātēs.



1.28.att. Absorbcijas tipa saldēšanas iekārtas shēma:

1 — ģenerators; *2* — kondensators; *3* — droselēšanas ventilis; *4* — saldēšanas kamera — iztvaikotājs; *5* — absorbers; *6* — sūknis; *7* — regulējošais ventilis.



1.29. att. Siltuma transformācijas principiālā shēma.

Maksimālais siltuma izmantošanas koeficients absorbcijas tipa saldēšanas iekārtas ciklā:

$$\xi_{max} = \frac{T_1(T_g - T_0)}{T_g(T_0 - T_1)}, \tag{1.287}$$

kur T_1 — temperatūra iztvaikotājā (saldētavā);
T_g — ģeneratora temperatūra;
T_0 — dzesējošā ūdens temperatūra.

Pārnesot siltuma daudzumu q_1 no augstākas temperatūras T_1 siltuma avota uz zemākas temperatūras T_2 siltuma avotu atgriezenisku procesu (ciklu) veidā, temperatūrai T_2 atbilst lielāks ekvivalents siltuma daudzums q_2 (1.29. att.).

Siltuma transformācijas maksimālais koeficients, izmantojot Karno ciklus:

$$\psi_{1-2} = \frac{q_2}{q_1} = \frac{T_2(T_1 - T_0)}{T_1(T_2 - T_0)}, \tag{1.288}$$

kur T_0 — apkārtējās vides siltuma avota temperatūra.

Ja $T_1 = \infty$ (elektroenerģija), tad

$$\varphi_{\infty-2} = \frac{T_2}{T_2 - T_0}. \tag{1.289}$$

Ekvivalentais siltuma daudzums temperatūrā T_2:

$$q_2 = \psi_{1-2} q_1. \tag{1.290}$$

Siltuma sūknis paaugstina darba ķermeņa temperatūru no T_1 līdz T_2.

Siltuma sūkņa cikla efektivitāti raksturo koeficients

$$\varphi=\frac{q_2}{l}, \tag{1.291}$$

kur q_2 — siltuma daudzums temperatūrā T_2.

Ja siltuma sūknis darbojas pēc apgrieztā Karno cikla,

$$\varphi=\frac{T_2}{T_2-T_1}. \tag{1.292}$$

Aprēķinu piemēri

1.14.1. No saldēšanas iekārtas novadītais siltuma daudzums $Q_k=100$ kJ/s, dzinēja lietderīgi izmantotā jauda $N=25$ kW. Noteikt iekārtas saldēšanas koeficientu un aukstuma ražīgumu.

Atrisinājums. Dzinēja veiktais lietderīgais darbs vienā sekundē $L=N$, t. i., $L=25$ kJ/s. Aukstuma ražīgums

$$Q_0=Q_k-L=100-25=75 \text{ kJ/s}.$$

Iekārtas saldēšanas koeficients

$$\varepsilon=\frac{Q_0}{L}=\frac{75}{25}=3.$$

1.14.2. Ideālā kompresijas tipa saldēšanas mašīnā par aukstuma aģentu izmanto gaisu. No saldēšanas kameras nākošo gaisu ar temperatūru $t_1=-15$ °C un spiedienu $p_1=0{,}1$ MPa kompresorā adiabāti saspiež līdz $p_2=0{,}8$ MPa. Siltumapmaiņas aparātā aiz kompresora saspiesto gaisu atdzesē līdz $t_3=10$ °C, no kurienes tas nonāk detanderā un adiabāti izplešas līdz spiedienam $p_4=0{,}1$ MPa. Pēc tam gaiss atkal ieplūst saldēšanas kamerā, kur tā temperatūra, atņemot siltumu dzesējamam materiālam, paaugstinās līdz $t_1=-15$ °C. Aprēķināt iekārtas īpatnējo aukstuma ražīgumu, kopējo aukstuma ražīgumu un saldēšanas koeficientu, ja kompresora dzinēja jauda $N=5$ kW un kompresora lietderības koeficients $\eta_k=0{,}75$. Noteikt ciklam sekundē novadāmo siltuma daudzumu un aukstuma aģenta patēriņu.

Atrisinājums. Pieņemot, ka gaiss ir ideālā gāze, aprēķina nezināmās temperatūras cikla raksturīgajos punktos (1.26. att.).

Pēc adiabātas *1-2*:

$$T_2=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=258\left(\frac{0{,}8}{0{,}1}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=467{,}6 \text{ K}.$$

Pēc adiabātas *3-4*:

$$T_4=T_3\left(\frac{p_4}{p_3}\right)^{\frac{k-1}{k}}=T_3\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}=283\left(\frac{0{,}1}{0{,}8}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=$$
$$=156{,}2 \text{ K}=-116{,}8 \text{ °C}.$$

Viena kg gāzes saspiešanai kompresorā patērētais darbs

$$l_k=h_2-h_1=c_p(T_2-T_1)=1{,}012(467{,}6-258)=212 \text{ kJ/kg}.$$

Viena kg gāzes padarītais darbs detanderā

$$l_{iz}=c_p(T_3-T_4)=1{,}012(283-116{,}8)=169 \text{ kJ/kg}.$$

Saldēšanas ciklā patērētais darbs

$$l=l_k-l_{iz}=212-169=43 \text{ kJ/kg}.$$

Cikla saldēšanas koeficients

$$\varepsilon_g=\frac{T_4}{T_3-T_4}=\frac{156{,}2}{283-156{,}2}=1{,}232.$$

Atbilstošā Karno cikla saldēšanas koeficients

$$\varepsilon_K=\frac{T_1}{T_3-T_1}=\frac{258}{283-258}=10{,}32.$$

Cikla aukstuma ražīgums

$$q_0=\varepsilon_g l=1{,}232\cdot 43=52{,}98 \text{ kJ/kg}.$$

Kopējais saldēšanas mašīnas aukstuma ražīgums sekundē, ņemot vērā kompresora lietderības koeficientu,

$$Q_0=\varepsilon_g L=\varepsilon_g N\eta_k=1{,}232\cdot 5\cdot 0{,}75=4{,}62 \text{ kJ/s}.$$

No saldēšanas mašīnas vienā sekundē novadāmais siltuma daudzums

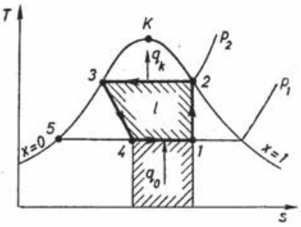
$$Q_1=Q_0+L=Q_0+N=4{,}62+5=9{,}62 \text{ kJ/s}.$$

Aukstuma aģenta patēriņš

$$M=\frac{Q_0}{q_0}=\frac{4{,}62}{52{,}98}=0{,}0872 \text{ kg/s}.$$

1.14.3. Tvaika kompresijas saldēšanas mašīnā par aukstuma aģentu izmanto amonjaku, kura mitrs piesātināts tvaiks ar spiedienu $p_1=0{,}103$ MPa ieplūst kompresorā. Saspiežot līdz spiedienam $p_2=0{,}6$ MPa, amonjaka tvaiks kļūst sauss piesātināts. Kondensatorā tvaiks pilnīgi kondensējas un caur droseli nonāk iztvaikotājā (1.30. att.). Aprēķināt iekārtas saldēšanas koeficientu, īpatnējo aukstuma ražīgumu un temperatūru iztvaikotājā. Noteikt dzinēja teorētisko jaudu, aukstuma aģenta un dzesējošā gaisa daudzumus, ja aukstuma ražīgums $Q_0=25\,000$ kJ/h un dzesējošā gaisa temperatūra paaugstinās par 10 °C.

Atrisinājums. Dotā saldēšanas mašīna strādā ar piesātinātu amonjaka tvaiku. Pēc amonjaka termodinamisko īpašību tabulām nosaka saldēšanas cikla raksturīgo punktu parametrus.



1.30 att. Saldēšanas cikls *T-s* koordinātēs.

Punktā *1*:
$p_1=0{,}103$ MPa; $t_1=t_{1s}=-33\,°C$; $s_1=s_2=3{,}04971$ kJ/(kg·K); $h'_1=-31{,}258$ kJ/kg; $h''_1==1338{,}563$ kJ/kg; $s'_1==-2{,}031\,68$ kJ/(kg·K); $s''_1=3{,}672\,34$ kJ/(kg·K);

$$x_1=\frac{s_1-s'_1}{s''_1-s'_1}=\frac{3{,}049\,71-(-2{,}031\,68)}{3{,}672\,34-(-2{,}031\,68)}=0{,}89;$$

$h_1=h'_1+(h''_1-h'_1)x_1=-31{,}258+(1338{,}563-(-31{,}258))0{,}89==1187{,}883$ kJ/kg.

Punktā *2*:
$p_2=0{,}6$ MPa; $t_2=9{,}2\,°C$; $h_2=h''_2=1386{,}569$ kJ/kg; $s_2=s''_2==3{,}0497$ kJ/(kg·K).

Punktā *3*:
$p_3=0{,}6$ MPa; $t_3=9{,}2\,°C$; $h_3=h'_2=165{,}610$ kJ/kg; $s_3=s'_2==-1{,}280\,03$ kJ/(kg·K);

Punktā *4*:

$$x_4=\frac{h_3-h'_1}{h''_1-h'_1}=\frac{165{,}610-(-31{,}258)}{1338{,}563-(-31{,}258)}=0{,}144;$$

$p_4=p_1=0{,}103$ MPa; $t_4=t_1=-33\,°C$; $h_4=h_3=165{,}610$ kJ/kg.

Saldēšanas cikla aukstuma ražīgums

$$q_0=h_1-h_4=1187{,}883-165{,}610=1022{,}273 \text{ kJ/kg}.$$

Kompresorā patērētais darbs

$$l=h_2-h_1=1386{,}569-1187{,}883=198{,}685 \text{ kJ/kg}.$$

Saldēšanas koeficients

$$\varepsilon=\frac{q_0}{l}=\frac{1022{,}237}{198{,}685}=5{,}145.$$

Dzinēja teorētiskā jauda

$$N=\frac{Q_0}{\varepsilon\tau}=\frac{25\,000}{5{,}145\cdot 3600}=1{,}35 \text{ kW}.$$

Saldēšanas aģenta patēriņš stundā

$$M_a=\frac{Q_0}{q_0}=\frac{25\,000}{1022{,}273}=24{,}455 \text{ kg/h}.$$

Novadāmā siltuma daudzums

$$Q_k=Q_0+L=M_a(q_0+l)=24{,}455(1022{,}273+198{,}685)==29\,858{,}5 \text{ kJ/h}.$$

Dzesējošā gaisa daudzums

$$M_g=\frac{Q_k}{c_g\Delta t_g}=\frac{29\,858{,}5}{1{,}012\cdot 10}=2950{,}4 \text{ kg/h}.$$

1.14.4. Noteikt absorbcijas tipa amonjaka saldēšanas iekārtas maksimālo siltuma izmantošanas koeficientu un vienam kg aukstuma aģenta ģeneratorā pievadīto siltuma daudzumu, ja temperatūra ģeneratorā $T_g=350$ K, dzesējošā ūdens temperatūra $T_0==298\,°C$, dzesējamās telpas temperatūra $T_1=260$ K, aukstuma ražīgums $q_0=900$ kJ/kg.

Atrisinājums. Maksimālais siltuma izmantošanas koeficients atgriezeniskā ciklā

$$\xi_{max}=\frac{T_1(T_g-T_0)}{T_g(T_0-T_1)}=\frac{260(350-298)}{350(298-260)}=1{,}02.$$

Minimālais pievadāmais siltuma daudzums

$$q_g=q_0/\xi=900/1{,}02=882 \text{ kJ/kg}.$$

Ar dzesēšanas ūdeni novadāmais siltuma daudzums

$$q_{dz}=q_0+q_g=900+882=1782 \text{ kJ/kg}.$$

1.14.5. Aprēķināt, kādam siltuma daudzumam q_2 temperatūrā $t_2=100\,°C$ atbilst $q_1=1000$ kJ temperatūrā $t_1=1200\,°C$. Pieņem, ka siltuma pārnešanu var realizēt pilnīgi atgriezeniskā veidā. Apkārtējās vides siltuma avota temperatūra $t_0=0\,°C$.

Atrisinājums. Siltumu atgriezeniskā veidā var pārnest ar atgriezenisko Karno ciklu. Siltuma transformācijas koeficients

$$\psi_{1-2}=\frac{q_2}{q_1}=\frac{T_2(T_1-T_0)}{T_1(T_2-T_0)}=\frac{373(1473-273)}{1473(373-273)}=3{,}04.$$

Ekvivalentais siltuma daudzums temperatūrā T_2:

$$q_2=\psi_{1-2}q_1=3{,}04\cdot 1000=3040 \text{ kJ}.$$

1.14.6. Pieņemot iepriekšējā piemēra nosacījumus, aprēķināt ekvivalento siltuma daudzumu elektroenerģijai.

Atrisinājums. Siltuma transformācijas koeficients elektroenerģijai, pieņemot $T_1=\infty$, ir

$$\psi_{\infty-2}=\frac{T_2}{T_2-T_0}=\frac{373}{373-273}=3{,}73.$$

Ekvivalentais siltuma daudzums temperatūrā T_2:

$$q_2=\psi_{\infty-2}q_1=3{,}73\cdot 1000=3730 \text{ kJ}.$$

1.14.7. Siltuma sūknis karstā ūdens apgādes sistēmai nodod siltumu ar temperatūru $t_2=80\,°C$, izmantojot ūdenskrātuves ūdens siltumu ar temperatūru $t_1=4\,°C$. Aprēķināt karstā ūdens apgādes sistēmai nodotā siltuma jaudu Q_k, ja siltuma sūkņa patērētā jauda $N_s=150$ kW un tiek realizēts apgrieztais Karno cikls.

Atrisinājums. Siltuma sūkņa maksimālais efektivitātes koeficients

$$\varphi=\frac{q_2}{l}=\frac{T_2}{T_2-T_1}=\frac{353}{353-277}=4{,}64.$$

Karstā ūdens apgādes sistēmai nodotā siltuma jauda

$$Q_k=\varphi N_s=4{,}64\cdot 150=696\ \text{kW}.$$

LITERATŪRA (1. nodaļai)

1.1. *Jankevičs T.* Tehniskā termodinamika. — R.: LVI, 1964. — 189 lpp.
1.2. *Nagla J., Saveļjevs P., Cimiņš R.* Siltumtehnikas pamati. — 2. pārstrād. izd. — 1981. — 356 lpp.
1.3. *Богданов С. Н., Иванов О. П., Куприянова А. В.* Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. — 2-е изд. — Л.: Машиностроение, 1976. — 165 с.
1.4. *Вукалович М. П.* Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. — М.; Л.: Энергия, 1965. — 400 с.
1.5. *Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е.* Техническая термодинамика. — М.: Энергия, 1974. — 448 с.
1.6. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. *К. П. Мищенко и А. А. Равделя.* — Л.: Химия, 1972. — 200 с.
1.7. *Мурзаков В. В.* Основы технической термодинамики. — М.: Энергия, 1973. — 304 с.
1.8. *Рабинович О. М.* Сборник задач по технической термодинамике. — М.: Машиностроение, 1973. — 344 с.
1.9. *Ривкин С. Л.* Термодинамические свойства газов. — М.: Энергия, 1973. — 288 с.
1.10. *Ривкин С. Л., Александров А. А.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1980. — 424 с.
1.11. *Ривкин С. Л., Александров А. А., Кремневская Е. А.* Термодинамические производные для воды и водяного пара. — М.: Энергия, 1977. — 264 с.
1.12. Сборник задач по технической термодинамике / *Т. Н. Андрианова, Б. В. Дзампов, В. Н. Зубарев, С. А. Ремизов.* — 3-е изд. — М.: Энергоиздат, 1981. — 240 с.

2. nodaļa

SILTUMAPMAIŅA UN SILTUMAPMAIŅAS APARĀTI

Apzīmējumi

A — siltuma absorbcijas koeficients
a — temperatūras difūzijas (vadītspējas) koeficients (m^2/s)
B — starojuma enerģētiskais spilgtums ($W/(m^2 \cdot sr)$)
b — eksperimentāla konstante
C — koeficients; ķermeņa starošanas koeficients ($W/(m^2 \cdot K^4)$)
c — īpatnējā siltumietilpība ($kJ/(kg \cdot K)$)
D, d — diametrs (m)
E — starojuma plūsmas intensitāte (blīvums) ($W/(m^2)$)
e — naturālā logaritma bāze
g — gravitācijas paātrinājums (m/s^2)
H — augstums (m)
h — augstums (m); entalpija (kJ/kg)
K — ķermeņa formas koeficients (m^2)
k — siltumpārejas koeficients ($W/(m^2 \cdot K)$)
L — garums (m)
l — raksturīgais lineārais izmērs (m)
M — masas caurplūdums (kg/s)
m — apribojuma koeficients; dzišanas (silšanas) temps (s^{-1}); pakāpes rādītājs
n — slāņu, kārtu, rindu skaits; pakāpes rādītājs
p — spiediens (Pa)
Q — siltuma daudzums (J)
q — siltuma plūsmas blīvums (W/m^2)
R — elektriskā pretestība (Ω)
r — rādiuss (m); iztvaikošanas siltums (kJ/kg); gāzes sastāvs tilpuma daļās
S — laukums (m^2)
s — cauruļu izvietojuma solis kūlī (m)
T — temperatūra (K)
t temperatūra (°C)
U — perimetrs (m)
V — tilpums (m^3)
w — ātrums (m/s)
X — bezdimensionālā koordināte
x — koordināte; mainīgais attālums (m)

Z — līdzības skaitlis (raksturo kondensāta plūsmu)
α — siltumatdeves koeficients ($W/(m^2 \cdot K)$)
β — labojuma koeficients; tilpuma izplešanās koeficients (K^{-1})
Δ — starpība
δ — biezums, puse no biezuma (m); platums (m)
ε — melnuma pakāpe; porainība; labojuma koeficients
θ — bezdimensionālā virstemperatūra
ϑ — virstemperatūra (K vai °C)
λ — siltumvadītspējas koeficients ($W/(m \cdot K)$); starojuma viļņu garums (m)
μ — dinamiskā viskozitāte ($N \cdot s/m^2 = Pa \cdot s$)
ν — kinemātiskā viskozitāte (m^2/s)
π — skaitlis 3,1416; telpiskais leņķis (sr)
ρ — blīvums (kg/m^3)
σ_i — transcendentā vienādojuma $\sigma_i \operatorname{tg} \sigma_i = Bi$ saknes
τ — laiks (s vai h)
Φ — siltuma plūsma (W)
φ — starošanas leņķa koeficients
Ω — telpiskais leņķis (sr)
ω — leņķis (rad vai °)

Indeksi

1, 2, ... — atbilstošai kārtai, virsmai, laika momentam
b — bērtā stāvoklī
c — cilindra, centra, vidus
e — ekvivalentais
g — gāzes
i — kārtas numurs
k — kārtas vai slāņa numurs
kr — kritiskā vērtība
L — attiecināts uz garuma vienību; lineārais
lg — logaritmiskais
l — laminārs
m — maksimālais; modeļa
0 — sākuma momenta; blīvā stāvoklī; absolūti melns
op — optimālais
p — izobārs; plāksnei
r — ribotai virsmai; reducētais (sistēmas melnuma pakāpe); robežslāņa
s — siltumnesēja; cauruļu izvietojuma solim kūlī
t — turbulents
v — virsmas; tilpuma; izohors; vārpstas
vid — vidējais; vidū
x — attālumā x
φ — no leņķa atkarīgs

9*

ω — leņķa virzienā; leņķiskais blīvums
‾ — svītriņa virs apzīmējuma norāda uz vidējo vērtību
′ — šķidrums uz piesātinājuma robežas; ieplūde
″ — sauss piesātināts tvaiks; izplūde

2.1. SILTUMVADĪŠANA UN SILTUMPĀREJA STACIONĀRĀ REŽĪMĀ

Aprēķinu izteiksmes

Siltuma plūsma caur vienslāņa plāksni

$$\Phi=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\delta/\lambda}S. \tag{2.1}$$

Siltuma plūsma caur plāksni, kas sastāv no n slāņiem,

$$\Phi=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}}S. \tag{2.2}$$

Siltuma plūsmas blīvums $q=\Phi/S$. (2.3)

Temperatūra daudzslāņu plāksnes atsevišķo slāņu saskares plaknēs — starp k un $k+1$ slāni (pirmās kārtas robežnosacījumos):

$$t_{k,k+1}=t_{v1}-q\sum_{i=1}^{i=k}\frac{\delta_i}{\lambda_i} \tag{2.4}$$

vai, rēķinot no plāksnes ārējās (zemākās temperatūras) plaknes,

$$t_{k,k+1}=t_{v2}+q\sum_{i=k+1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}. \tag{2.5}$$

Formulās (2.4) un (2.5) pieņemts, ka $\lambda=\text{const}$. Ja

$$\lambda=\lambda_0(1+bt), \tag{2.6}$$

tad temperatūras sadalījumu plāksnē atrod šādi:

$$t=-\frac{1}{b}+\sqrt{\left(\frac{1}{b}+t_{v1}\right)^2-\frac{2qx}{b\lambda_0}}, \tag{2.7}$$

kur λ_0 — siltumvadītspējas koeficienta vērtība 0 °C temperatūrā.

Siltuma plūsma caur plakanu sienu siltumpārejā no viena siltumnesēja uz otru:

$$\Phi=kS(t_{s1}-t_{s2}), \tag{2.8}$$

kur siltumpārejas koeficients

$$k=\frac{1}{\frac{1}{\alpha_1}+\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}+\frac{1}{\alpha_2}}. \tag{2.9}$$

Temperatūra uz virsmām siltumpārejas gadījumā caur vienslāņa vai daudzslāņu plāksni (trešās kārtas robežnosacījumos):

$$t_{v1}=t_{s1}-q\frac{1}{\alpha_1} \tag{2.10}$$

un

$$t_{v2}=t_{s2}+q\frac{1}{\alpha_2}. \tag{2.11}$$

Temperatūra daudzslāņu plāksnes atsevišķo slāņu saskares plaknēs siltumpārejas gadījumā (trešās kārtas robežnosacījumos), ja slāņu skaits ir n:

$$t_{k,k+1}=t_{s1}-q\left(\frac{1}{\alpha_1}+\sum_{i=1}^{i=k}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right) \tag{2.12}$$

vai

$$t_{k,k+1}=t_{s2}+q\left(\frac{1}{\alpha_2}+\sum_{i=k+1}^{i=n}\frac{\delta_i}{\lambda_i}\right). \tag{2.13}$$

Siltuma plūsmas lineārais blīvums vienslāņa cilindriskā sienā uz caurules garuma 1 m (pirmās kārtas robežnosacījumos):

$$q_L=\Phi/L=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}}. \tag{2.14}$$

Ja $d_2/d_1<2$, tad var izmantot tuvinātu izteiksmi

$$q_L=\Phi/L\approx\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{\delta}{\pi d_{vid}\lambda}}. \tag{2.15}$$

Daudzslāņu cilindriskā sienā (n slāņi)

$$q_L=\frac{t_{v1}-t_{v,\,n+1}}{\sum\limits_{i=1}^{n}\frac{1}{2\pi\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i}}. \tag{2.16}$$

Daudzslāņu cilindriskās sienas temperatūra slāņu saskares virsmās (pirmās kārtas robežnosacījumos)

$$t_{k,\,k+1}=t_{v1}-\frac{q_L}{2\pi}\sum_{i=1}^{i=k}\frac{1}{\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i} \tag{2.17}$$

vai

$$t_{k,\,k+1}=t_{v2}+\frac{q_L}{2\pi}\sum_{i=k+1}^{i=n}\frac{1}{\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i}. \tag{2.18}$$

Siltuma plūsmas lineārais blīvums siltumpārejā no viena siltumnesēja uz otru caur cilindrisku sienu (trešās kārtas robežnosacījumos):

$$q_L=k_L(t_{s1}-t_{s2}), \tag{2.19}$$

kur k_L ir lineārais siltumpārejas koeficients.

Vienslāņa cilindriskai sienai

$$k_L=\frac{1}{\dfrac{1}{\pi d_1\alpha_1}+\dfrac{1}{2\pi\lambda}\ln\dfrac{d_2}{d_1}+\dfrac{1}{\pi d_2\alpha_2}}. \tag{2.20}$$

Ja $d_2/d_1<2$, tad var pieņemt

$$k_L\approx\frac{1}{\dfrac{1}{\pi d_1\alpha_1}+\dfrac{\delta}{\pi d_{\text{vid}}\lambda}+\dfrac{1}{\pi d_2\alpha_2}}. \tag{2.21}$$

Daudzslāņu cilindriskai sienai (n slāņi)

$$k_L=\frac{1}{\dfrac{1}{\pi d_1\alpha_1}+\sum\limits_{i=1}^{n}\dfrac{1}{2\pi\lambda_i}\ln\dfrac{d_{i+1}}{d_i}+\dfrac{1}{\pi d_{n+1}\alpha_2}}. \tag{2.22}$$

Daudzslāņu cilindriskās sienas temperatūra slāņu saskares virsmās (trešās kārtas robežnosacījumos)

$$t_{k,\,k+1}=t_{s1}-\frac{q_L}{\pi}\left(\frac{1}{d_1\alpha_1}+\frac{1}{2}\sum_{i=1}^{i=k}\frac{1}{\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i}\right) \tag{2.23}$$

vai

$$t_{k,\,k+1}=t_{s2}+\frac{q_L}{\pi}\left(\frac{1}{d_{n+1}\alpha_2}+\frac{1}{2}\sum_{i=k+1}^{i=n}\frac{1}{\lambda_i}\ln\frac{d_{i+1}}{d_i}\right). \tag{2.24}$$

Izolēta cauruļvada kritiskais diametrs

$$d_{\text{kr}}=\frac{2\lambda_2}{\alpha_2}. \tag{2.25}$$

Siltuma plūsmas blīvums caur apribotu (no vienas puses) plāksni, attiecinot uz gludās virsmas laukuma vienību,

$$q_{r1}=\Phi/S_1=\frac{t_{s1}-t_{s2}}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta}{\lambda}+\dfrac{1}{m\alpha_2}}. \tag{2.26}$$

Tas pats, attiecinot uz apribotо virsmu,

$$q_{r2}=\Phi/S_2=\frac{t_{s1}-t_{s2}}{m\left(\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta}{\lambda}\right)+\dfrac{1}{\alpha_2}}. \tag{2.27}$$

Šeit S_1 un S_2 atbilstoši ir plāksnes gludās un apribotās virsmas laukumi. Apribojuma koeficients

$$m=S_2/S_1. \tag{2.28}$$

Apribotā caurulē siltuma plūsmas lineārais blīvums

$$q_{rL}\approx\frac{t_{s1}-t_{s2}}{\dfrac{1}{\pi d_1\alpha_1}+\dfrac{\delta}{\pi d_{\text{vid}}\lambda}+\dfrac{1}{m\pi d_2\alpha_2}}. \tag{2.29}$$

2.1. tabula

Metālu siltumvadītspējas koeficients λ(W/(m · K))

Materiāls	Temperatūra t (°C)					
	0	20	100	200	300	500
Alumīnijs (99,0%)	209	—	213	220	226	235
Alva	66,1	—	60,8	57,9	—	—
Cuguns	—	50	49,5	48	47	37
Dzelzs (99,9%)	74	—	68	62	55	47,5
Dzīvsudrabs	—	7,9	8,9	10,3	11,7	13,2
Kālijs	—	97,1	47,7	47,1	41,9	37,8
Magnijs (99,6%)	145	—	140	135	130	131
Nātrijs	—	133,9	86,1	81,4	74,5	68,6
Niķelis	—	92,3	82,6	—	64	61,6
Sudrabs	410	—	392	372	362	366
Svins	35,1	—	33,5	31,9	30,2	15,5
Tērauds, oglekļa:						
08	—	59,2	57,7	53,5	49,4	40,2
20	—	51,7	51,1	48,5	44,4	39,3
У12	—	45,2	44,8	42,7	40,2	34,7
Tērauds, vāji leģēts:						
12XH2(Э)	—	33,0	33,0	33,4	—	35,5
30XH3	—	35,2	36,0	37,0	37,0	36,5
Tērauds, nerūsošs:						
X13	—	26,7	27,7	27,7	28,0	27,2
3X13	—	25,1	26,4	27,2	27,7	27,2
Tērauds, karstumizturīgs:						
1X18H9T(ЭЯ1T)	—	—	16,0	17,6	19,2	22,3
X13H25M2	—	—	11,7	13,4	15,0	19,3
Varš (99,9%)	393	—	385	378	371	359

2.1. tabulas turpinājums

Materiāls	Temperatūra t (°C)					
	0	20	100	200	300	500
Alumīnija sakausējumi						
92% Al, 8% Mg	102,3	105,8	123	147,6	—	—
80% Al, 20% Si	158	160,5	168,5	174,4	—	—
Dūralumīnijs: 94 ... 96% Al, 3 ... 5% Cu, 0,5% Mg	159	165	181	194	—	—
Vara sakausējumi						
Bronza АЖН11—6—6	63,7	—	71,3	77,3	82,1	94,2
90% Cu, 10% Ni	59,3	—	66,3	74,9	81,1	102,1
Misiņš:						
90% Cu, 10% Zn	102	—	117	134	149	180
70% Cu, 30% Zn	106	—	109	110	114	120

2.2. tabula

Nemetāla tehnisko materiālu fizikālās īpašības 20 °C temperatūrā

Materiāls	ϱ (kg/m³)	λ (W/(m · K))	c (kJ/(kg · K))
Apmetums:			
kaļķu javā	1600	0,70	0,84
cementa javā	1800	1,16	0,84
Asfalts	2120	0,60 ... 0,74	1,7
Betons:			
sauss	1600	0,84	0,84
ar šķembām	1800	1,3	0,84
Dzelzsbetons	2200	1,55	0,84
Gumija:			
parastā	1200	0,14 ... 0,16	1,4
porainā	160	0,05	—
Ģipsis (formēts, sauss)	1250	0,43	0,84 ... 0,92
Izdedži (no katlu mājām)	1000	0,29	0,75
Izdedžu betons	1500	0,70	0,80
Kartons, gaissauss	—	0,14 ... 0,35	1,5
Katlakmens:			
ar lielu ģipša saturu	2000 ... 2700	0,7 ... 2,3	—
ar lielu kaļķu saturu	1000 ... 2500	0,15 ... 2,3	—
ar lielu silikāta saturu	300 ... 1200	0,08 ... 0,23	—
Koksne (mitrums 6 ... 10%)	450 ... 825	0,11 ... 0,20	2,5
Kvēpi	165	0,07 ... 0,12	—
Marmors	2800	1,3 ... 3,0	0,92
Māli	1600 ... 2000	0,70 ... 0,93	0,84
Māli, ugunsizturīgie (450 °C)	1850	1,0	1,0
Mūris:			
no sarkaniem ķieģeļiem	1700	0,81	0,88
no silikāta ķieģeļiem	1900	0,87	0,84
Ledus (0 °C)	917	2,2	2,26
Papīrs, parastais, gaissauss	—	0,14	1,5

2.2. tabulas turpinājums

Materiāls	ϱ (kg/m³)	λ (W/(m · K))	c (kJ/(kg · K))
Porcelāns:			
95 °C temperatūrā	2400	1,0	1,1
1055 °C temperatūrā	2400	2,0	1,1
Saplāksnis, līmēts	600	0,15	2,5
Smiltis, upes, sausas	1520	0,30 ... 0,38	0,80
Sniegs (0 °C):			
irdens	200	0,15	2,1
sablīvējies	400	0,35	2,1
Stikls:			
parastais	2500	0,75	0,67
termometru	2500	0,97	—
kvarca	2210	1,35	—
Tekstolīts	1300 ... 1400	0,23 ... 0,34	1,50

2.3. tabula

Siltumizolācijas materiālu siltumvadītspējas koeficients λ (W/(m · K))

Materiāls	ϱ (kg/m³)	t (°C)	λ (W/(m · K))	Maksimālā lietošanas temperatūra (°C)
Aerogels	90 ... 120	0 ... 50	0,024 ... 0,030	760
Alumīnija folijas izolācija	3 ... 10	—	$0{,}052+0{,}000\,14t$	350
Azbesta aukla	550	100	0,16	450 bez kokvilnas, 200 ar kokvilnas piejaukumu
Azbesta kartons	1000	—	$0{,}157+0{,}000\,14t$	450
Azbocementa plātnes	400	—	$0{,}088+0{,}000\,13t$	450
Azbozurīts, gaissauss:				
klase A	550	100	0,13	600
klase Б	750	100	0,21	600
Diatomīta darinājumi, apdedzināti	800	—	$0{,}17+0{,}000\,3t$	1000
„	400	—	$0{,}087+0{,}000\,22t$	1000
Gāzbetons «Siporekss»				
normālais	800 ... 900	20	0,22 ... 0,25	500
izolācijas	600 ... 700	20	0,137 ... 0,14	500
sienu	1100 ... 1200	20	0,31 ... 0,40	500
Koksnes šķiedru plātnes	150 ... 350	20	0,055 ... 0,09	100
Kūdras plātnes	200	—	$0{,}052+0{,}000\,14t$	100
Minerālvate	300	—	$0{,}06+0{,}000\,18t$	600
	200	—	$0{,}05+0{,}000\,17t$	600
Skaidu plātnes	500 ... 700	20	0,077 ... 0,096	100
Stikla vate	150	—	$0{,}04+0{,}000\,3t$	450

Materiāls	ϱ (kg/m³)	t (°C)	λ (W/(m·K))	Maksimālā lietošanas temperatūra (°C)
Ugunsizturīgie dinasa (ДЛ-1,2), kaolīna (КЛ-1,3), šamota un pusskābie (АЛ-1,3 un БЛ-1,3) materiāli	1300	600	0,7	1300...1500
Vate, kokvilnas, gaissausa	80	30	0,042	100
Vilnas audums un voiloks, sauss	240	—	0,05	100
Plastmasu materiāli				
Mipora	20	20	0,04	80
Poroplasts «1501» un «2003» ПХВ-Э	100...200	20	0,06	50
Putu poliepoksīdi ПЭ-1 un ПЭ-2	100...200	20	0,046...0,06	100...140
Sūnplasta plātnes	60...200	20	0,04...0,06	60...150

Aprēķinu piemēri

2.1.1. Aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu caur ēkas silikāta ķieģeļu sienu un siltuma daudzumu, ko ēka zaudē caur šo sienu vienā diennaktī, ja sienas biezums $\delta=51$ cm, sienas izmēri 6×3 m, sienas virsmas temperatūras $t_{v1}=15\,°C$ un $t_{v2}=-5\,°C$.

Atrisinājums. No 2.2. tabulas atrod, ka silikāta ķieģeļu mūrim $\lambda=0{,}87$ W/(m·K). Saskaņā ar izteiksmi (2.3) siltuma plūsmas blīvums

$$q=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{\delta}{\lambda}}=\frac{15-(-5)}{\frac{0{,}51}{0{,}87}}=34{,}12\ \text{W/m}^2.$$

Kopējie siltuma zudumi diennaktī

$$Q=qS\tau=34{,}12\cdot6\cdot3\cdot24\cdot3600=5{,}31\cdot10^7\ \text{J}=53\,100\ \text{kJ}.$$

2.1.2. Cik biezas būtu jābūvē 1) dzelzsbetona un 2) koksnes sienas, ja virsmu temperatūras būtu tikpat lielas kā 2.1.1. uzdevumā un siltuma zudumi arī būtu pieļaujami tādi paši (t. i., 34,12 W/m²)?

Atrisinājums. No 2.2. tabulas atrod dzelzsbetonam $\lambda_{dzb}=1{,}55$ W/(m·K) un koksnei $\lambda_k=0{,}15$ W/(m·K).

Visos trijos gadījumos

$$q=\frac{\Delta t}{\frac{\delta_{ķģ}}{\lambda_{ķģ}}}=\frac{\Delta t}{\frac{\delta_{dzb}}{\lambda_{dzb}}}=\frac{\Delta t}{\frac{\delta_k}{\lambda_k}}.$$

Tas nozīmē, ka

$$\frac{\delta_{ķģ}}{\lambda_{ķģ}}=\frac{\delta_{dzb}}{\lambda_{dzb}}=\frac{\delta_k}{\lambda_k}.$$

No šejienes aprēķina

$$1)\ \delta_{dzb}=\delta_{ķģ}\frac{\lambda_{dzb}}{\lambda_{ķģ}}=0{,}51\frac{1{,}55}{0{,}87}=0{,}91\ \text{m};$$

$$2)\ \delta_k=\delta_{ķģ}\frac{\lambda_k}{\lambda_{ķģ}}=0{,}51\frac{0{,}15}{0{,}87}=0{,}088\ \text{m}.$$

2.1.3. Cik biezs ledus var izveidoties uz dīķa virsmas, ja ledus virsmas temperatūra ir nemainīga $-15\,°C$ un siltuma plūsmas blīvums no ūdens caur ledus kārtu $q=30$ W/m²?

Atrisinājums. No 2.2. tabulas atrod ledum $\lambda=2{,}2$ W/(m·K). Ledus kārta veidosies līdz tam brīdim, kad ledus temperatūra uz ūdens virsmas sasniegs 0 °C. Saskaņā ar izteiksmēm (2.3) un (2.1) siltuma plūsmas blīvums caur ledus slāni

$$q=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{\delta}{\lambda}}.$$

No šejienes

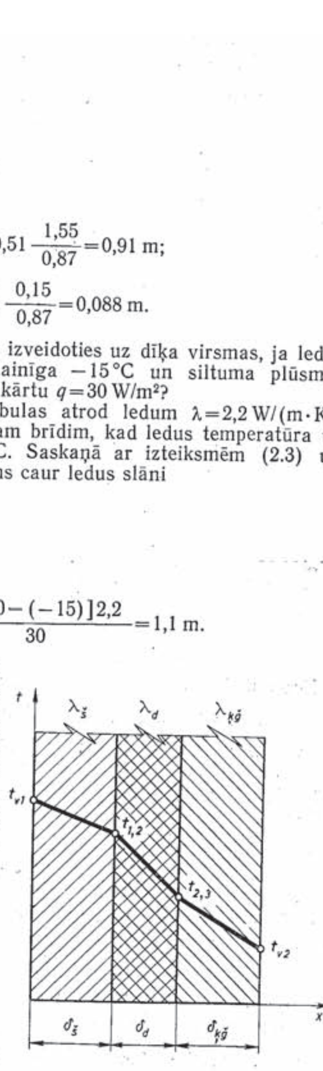
$$\delta=\frac{(t_{v1}-t_{v2})\lambda}{q}=\frac{[0-(-15)]\,2{,}2}{30}=1{,}1\ \text{m}.$$

2.1.4. Kausēšanas krāsns sienas sastāv no 3 kārtām: iekšējās — šamota ķieģeļu ar $\delta_š=0{,}25$ m, vidējās — diatomīta ar $\delta_d=0{,}20$ m un ārējās — sarkano māla ķieģeļu ar $\delta_{ķģ}=0{,}25$ m (2.1. att.). Aprēķināt siltuma zudumus caur sienas 1 m² un temperatūras atsevišķo kārtu saskares virsmās, ja

$\lambda_š=0{,}7$ W/(m·K) — (2.3. tab.),

$\lambda_d=0{,}087+$
$+0{,}000\,22\,t$ W/(m·K) — (2.3. tab.);

$\lambda_{ķģ}=0{,}81$ W/(m·K) — (2.2. tab.).



2.1. att. 2.1.4. uzdevumam.

Iekšējās un ārējās virsmas temperatūras $t_{v1}=1200\,°C$; $t_{v2}=45\,°C$. Sienas ir plakanas.

Atrisinājums. Vispirms jāaprēķina siltuma plūsmas blīvums. Tā kā diatomīta siltumvadītspējas koeficienta vērtība atkarīga no temperatūras, tad sākumā pieņemsim diatomīta slāņa vidējo temperatūru, aprēķināsim q (pēc formulām (2.3) un (2.2)) un temperatūras slāņu saskares virsmās. Ja izrādīsies, ka tās jūtami atšķiras no pieņemtās diatomīta slāņa temperatūras, tad q aprēķinu atkārto ar citu pieņemtu diatomīta slāņa vidējo temperatūru.

Pieņemam $t_{d.vid}=0{,}5(t_{1,2}+t_{2,3})=$
$=0{,}5(1000+200)=600\,°C$.

Tad $\lambda_d=0{,}087+0{,}000\,22\cdot 600=0{,}219\approx 0{,}22\ W/(m\cdot K)$ un

$$q=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{\delta_š}{\lambda_š}+\frac{\delta_d}{\lambda_d}+\frac{\delta_{ķš}}{\lambda_{ķš}}}=\frac{1200-45}{\frac{0{,}25}{0{,}7}+\frac{0{,}20}{0{,}22}+\frac{0{,}25}{0{,}81}}=733{,}4\ W/m^2.$$

$t_{1,2}$ var aprēķināt pēc formulas (2.4):

$$t_{1,2}=t_{v1}-q\frac{\delta_š}{\lambda_š}=1200-733{,}4\cdot\frac{0{,}25}{0{,}7}=938\,°C.$$

$t_{2,3}$ ērtāk rēķināt pēc izteiksmes (2.5):

$$t_{2,3}=t_{v2}+q\frac{\delta_{ķš}}{\lambda_{ķš}}=45+733{,}4\cdot\frac{0{,}25}{0{,}81}=271\,°C.$$

Tātad diatomīta slāņa vidējā temperatūra

$$t_{d.vid}=0{,}5(938+271)=604{,}5\,°C.$$

Nav nepieciešamības tālāk precizēt aprēķinu.

2.1.5. Izmantojot iepriekšējā uzdevuma nosacījumus, aprēķināt temperatūru diatomīta slāņa vidū: 1) pieņemot $\lambda=const$; 2) pieņemot $\lambda=\lambda(t)$.

Atrisinājums. Ja pieņem, ka $\lambda=const$, tad temperatūra slāņa vidū

$$t_c=0{,}5(t_{1,2}+t_{2,3})=0{,}5(938+271)=604{,}5\,°C,$$

jo temperatūra slānī mainās lineāri. Ja pieņem, ka $\lambda=\lambda(t)$, tad temperatūru slāņa vidū var aprēķināt pēc formulas (2.7);

$$t_c=-\frac{1}{b}+\sqrt{\left(\frac{1}{b}+t_{v1}\right)^2-\frac{2qx}{b\lambda_0}}.$$

No 2.3. tabulas atrod, ka diatomīta darinājumiem

$$\lambda=0{,}087+0{,}000\,22t=0{,}087(1+0{,}002\,53t),$$

tātad $\lambda_0=0{,}087\ W/(m\cdot K)$ un $b=2{,}53\cdot 10^{-3}$.

2.1.4. uzdevuma risinājumā atradām, ka $t_{v1}=938\,°C$. Tad

$$t_c=-\frac{1}{2{,}53\cdot 10^{-3}}+$$
$$+\sqrt{\left(\frac{1}{2{,}53\cdot 10^{-3}}+938\right)^2-\frac{2\cdot 733{,}4\cdot 0{,}1}{2{,}53\cdot 10^{-3}\cdot 0{,}087}}=$$
$$=658{,}8\approx 659\,°C.$$

2.2. attēlā shematiski parādīta temperatūras līkne diatomīta slānī. Tā kā koeficienta b vērtība ir pozitīva, tad līknei $\lambda=\lambda(t)$ izliekums ir uz augšu.

2.1.6. Aprēķināt siltuma plūsmas blīvumu caur tvaika katla boilera sienām, kā arī sienas virsmu temperatūras, ja sienas materiāls ir tērauds 20, biezums $\delta=25$ mm. No vienas puses sienu apskalo dūmgāzes ar $t_{š1}=1100\,°C$ un siltumatdeves koeficientu $\alpha_1=150\ W/(m^2\cdot K)$, bet no iekšējās boilera virsmas ūdens ar $\alpha_2=3000\ W/(m^2\cdot K)$. Ūdens vidējā temperatūra 200 °C. Boilera sienas var uzskatīt par plāksni.

Atrisinājums. Siltuma plūsmas blīvumu siltumpārejā no dūmgāzēm caur sienu ūdenim var aprēķināt pēc izteiksmēm (2.3), (2.8) un (2.9):

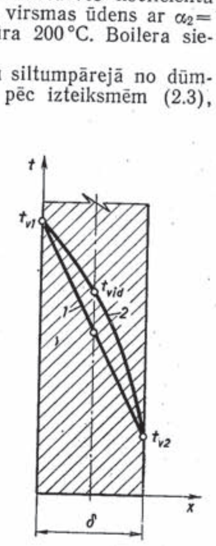
$$q=k(t_{š1}-t_{š2})=\frac{t_{š1}-t_{š2}}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}=$$
$$=\frac{1100-200}{\frac{1}{150}+\frac{0{,}025}{45}+\frac{1}{3000}}=$$
$$=119\,100\ W/m^2.$$

Tērauda 20 siltumvadītspējas koeficienta λ vērtību atrod 2.1. tabulā, pieņemot sienas temperatūru aptuveni 300 °C. Boilera virsmas temperatūras var aprēķināt pēc izteiksmēm (2.10) un (2.11):

$$t_{v1}=t_{š1}-q\frac{1}{\alpha_1}=$$
$$=1100-119{,}1\cdot 10^3\cdot\frac{1}{150}=306\,°C$$

un

$$t_{v2}=t_{š2}+q\frac{1}{\alpha_2}=200+$$
$$+119{,}1\cdot 10^3\cdot\frac{1}{3000}\approx 240\,°C.$$



2.2. att. 2.1.5. uzdevumam:

1 — λ nav atkarīgs no temperatūras; 2 — λ ir lineāra temperatūras funkcija.

2.1.7. Atrisināt iepriekšējo (2.1.6.) uzdevumu, ja boilera virsma dūmgāzu pusē pārklāta ar kvēpu kārtu, kuras biezums $\delta_1=2$ mm, bet ūdens pusē ar katlakmens (ar lielu ģipša saturu) kārtu, kuras biezums $\delta_3=5$ mm.

Atrisinājums. No 2.2. tabulas atrod: kvēpiem $\lambda_1=0{,}10$ W/(m·K) un katlakmenim $\lambda_3=1{,}5$ W/(m·K).

Siltuma plūsmas blīvums (izteiksmes (2.3), (2.8) un (2.9))

$$q=\frac{t_{s1}-t_{s2}}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}+\dfrac{\delta_2}{\lambda_2}+\dfrac{\delta_3}{\lambda_3}+\dfrac{1}{\alpha_2}}=$$

$$=\frac{1100-200}{\dfrac{1}{150}+\dfrac{0{,}002}{0{,}10}+\dfrac{0{,}025}{45}+\dfrac{0{,}005}{1{,}5}+\dfrac{1}{3000}}=29\,140\ \mathrm{W/m^2}.$$

Boilera sienas virsmu temperatūras var aprēķināt pēc formulām (2.12) un (2.13):

$$t_{1,2}=t_{s1}-q\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}\right)=$$

$$=1100-29\,140\left(\frac{1}{150}+\frac{0{,}002}{0{,}10}\right)=323\ ^\circ\mathrm{C}$$

un

$$t_{2,3}=t_{s2}+q\left(\frac{1}{\alpha_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)=$$

$$=200+29\,140\left(\frac{1}{3000}+\frac{0{,}005}{1{,}5}\right)=306{,}8\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Salīdzinot 2.1.6. un 2.1.7. uzdevuma rezultātus, redzam, ka kvēpu un katlakmens kārtiņas samazina siltuma plūsmas blīvumu uzdevumā dotajos apstākļos vairāk nekā četrkārtīgi. Vienlaikus pieaug boilera sienas temperatūra.

2.1.8. Cik daudz akmeņogļu 1 diennaktī jāsadedzina apkures krāsnī, kuras lietderības koeficients $\eta=75\%$, lai kompensētu siltuma zudumus caur telpas ārējām sienām, ja sienu virsmas laukums $S=50$ m², siltumatdeves koeficients no iekšējā gaisa uz sienu $\alpha_1=6$ W/(m²·K), no sienas ārējās virsmas $\alpha_2=16$ W/(m²·K). Gaisa temperatūra telpā $t_{s1}=22$ °C, ārā $t_{s2}=-25$ °C. Siena sastāv no kaļķu javas apmetuma kārtas, kuras biezums $\delta_1=5$ cm, un sarkano ķieģeļu mūra, kura biezums $\delta_2=51$ cm. Ogļu zemākais sadegšanas siltums $Q_z^d=24\,000$ kJ/kg.

Atrisinājums. Vispirms aprēķina siltumpārejas koeficientu (izteiksme (2.9)):

$$k=\frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}+\dfrac{\delta_2}{\lambda_2}+\dfrac{1}{\alpha_2}}=\frac{1}{\dfrac{1}{6}+\dfrac{0{,}05}{0{,}70}+\dfrac{0{,}51}{0{,}81}+\dfrac{1}{16}}=$$

$$=1{,}075\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Apmetuma un ķieģeļu mūra siltumvadītspējas koeficientu λ_1 un λ_2 vērtības atrod 2.2. tabulā. Tad siltuma plūsma no telpas uz āru (formula (2.8))

$$\Phi=kS\,(t_{s1}-t_{s2})=1{,}075\cdot 50\,(22-(-25))=$$

$$=2526\ \mathrm{W}\approx 2{,}53\ \mathrm{kW}.$$

Vienā diennaktī sadedzināmo ogļu daudzums

$$B=\frac{\Phi\tau}{Q_z^d\eta}=\frac{2{,}53\,(3600\cdot 24)}{24\,000\cdot 0{,}75}=12{,}1\ \mathrm{kg}.$$

Šeit laiks jāizsaka sekundēs, jo siltuma plūsma izteikta kW = kJ/s.

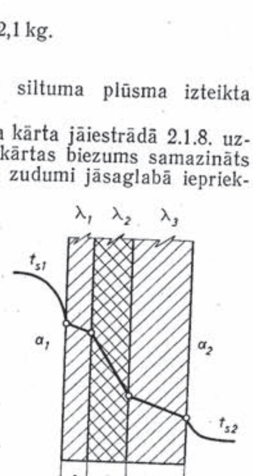
2.1.9. Cik bieza izolācijas gāzbetona kārta jāiestrādā 2.1.8. uzdevumā aprakstītajā sienā, ja ķieģeļu kārtas biezums samazināts līdz 12,5 cm (0,5 ķieģeļa), bet siltuma zudumi jāsaglabā iepriekšējie (2.3. att.)? Pārējie uzdevuma nosacījumi paliek iepriekšējie.

Atrisinājums. Tā kā siltuma zudumi, resp., siltuma plūsma un temperatūras paliek iepriekšējās, tad arī siltumpārejas koeficienta k vērtība nemainās, t. i., $k=1{,}075$ W/(m²·K). Dotajā gadījumā

$$k=$$

$$=\frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_1}+\dfrac{\delta_1}{\lambda_1}+\dfrac{\delta_2}{\lambda_2}+\dfrac{\delta_3}{\lambda_3}+\dfrac{1}{\alpha_1}}.$$

No šejienes var aprēķināt gāzbetona kārtas biezumu δ_2. Iepriekš gan no 2.3. tabulas atrod, ka gāzbetonam $\lambda_2=0{,}14$ W/(m·K).



2.3. att. 2.1.9. uzdevumam: $\delta_1=5$ cm — apmetuma kārtas, δ_2 — gāzbetona kārtas, $\delta_3=12{,}5$ cm — ķieģeļu kārtas biezums.

Tātad

$$\delta_2=\lambda_2\left[\frac{1}{k}-\left(\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}+\frac{1}{\alpha_2}\right)\right]=$$

$$=0{,}14\left[\frac{1}{1{,}075}-\left(\frac{1}{6}+\frac{0{,}05}{0{,}70}+\frac{0{,}125}{0{,}81}+\frac{1}{16}\right)\right]=$$

$$=0{,}067\ \text{m}\approx 7\ \text{cm}.$$

Šo uzdevumu var atrisināt vienkāršāk, ja izmanto termiskās pretestības jēdzienu. Uzdevumā prasīts aizvietot 38,5 cm biezu ķieģeļu kārtu ar tādu gāzbetona kārtu, lai termiskās pretestības būtu vienādas. Tas nozīmē, ka

$$\frac{\delta_2}{\lambda_2}=\frac{\delta_3}{\lambda_3}.$$

No šejienes

$$\delta_2=\frac{\lambda_2\delta_3}{\lambda_3}=\frac{0{,}14\cdot 0{,}385}{0{,}81}=0{,}067\ \text{m}\approx 7\ \text{cm}.$$

2.1.10. Cik ilgā laikā 2 l ūdens ar temperatūru 10 °C uzkarsīs līdz vārīšanās temperatūrai, ja ūdeni karsē alumīnija katliņā uz gāzes liesmas? Atmosfēras spiediens ir 100 kPa. Katliņš ir cilindrisks ar plakanu dibenu, diametrs $d=15$ cm, sienu biezums $\delta=2$ mm. Siltumatdeves koeficienta vērtība siltuma plūsmā no gāzes sadegšanas produktu un gaisa maisījuma ($t_{s1}=650$ °C) uz katliņa virsmu $\alpha_1=80$ W/(m²·K), no katliņa virsmas uz ūdeni $\alpha_2=450$ W/(m²·K). Pieņemt, ka siltums ūdenim tiek pievadīts tikai konvekcijas un siltumvadīšanas veidā. Siltumapmaiņu ar apkārtējo vidi neņemt vērā.

Atrisinājums. Ūdens uzkarsēšanai nepieciešamo siltuma daudzumu atrod kā entalpiju starpību:

$$Q=M(h_2-h_1)=2(417{,}5-42{,}1)=750{,}8\ \text{kJ}.$$

Entalpijas vērtības 1 kg ūdens atrod ūdens un ūdens tvaika tabulās.

Alumīnija siltumvadītspējas koeficients (2.1. tab.) $\lambda=213$ W/(m·K).

Silšanas procesā ūdens vidējā temperatūra katliņā

$$t_{2s}=0{,}5(10+100)=55\ °\text{C}.$$

Siltuma plūsmu no sadegšanas produktiem uz ūdeni aprēķina pēc izteiksmēm (2.8) un (2.9):

$$\Phi=\frac{t_{s1}-t_{s2}}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta}{\lambda}+\frac{1}{\alpha_2}}S=$$

$$=\frac{650-55}{\frac{1}{80}+\frac{0{,}002}{213}+\frac{1}{450}}\cdot\frac{3{,}14\cdot 0{,}15^2}{4}=713\ \text{W}.$$

No sakarības

$$Q=\Phi\tau$$

atrod 2 l ūdens uzkarsēšanai nepieciešamo laiku:

$$\tau=\frac{Q}{\Phi}=\frac{750{,}8\cdot 10^3}{713}=1053\ \text{s}=17{,}5\ \text{min}.$$

2.1.11. Atrisināt 2.1.10. uzdevumu, ja katliņa dibens pārklāts ar 1 mm biezu kvēpu kārtu.

Atrisinājums. Kvēpiem $\lambda=0{,}10$ W/(m·K) (2.2. tab.). Tad siltuma plūsma

$$\Phi=\frac{t_{s1}-t_{s2}}{\frac{1}{\alpha_1}+\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{1}{\alpha_2}}S=$$

$$=\frac{650-55}{\frac{1}{80}+\frac{0{,}001}{0{,}1}+\frac{0{,}002}{213}+\frac{1}{450}}\cdot\frac{3{,}14\cdot 0{,}15^2}{4}=425\ \text{W}$$

un laiks

$$\tau=\frac{750{,}8\cdot 10^3}{425}=1767\ \text{s}=29{,}4\ \text{min}.$$

2.1.12. Pa karstumizturīga tērauda X13H25M2 cauruli, kuras diametri $d_1/d_2=32/42$ mm, plūst karsts siltumnesējs. Caurules iekšējās virsmas temperatūra $t_{v1}=550$ °C, bet ārējās — $t_{v2}=450$ °C. Aprēķināt siltuma plūsmas lineāro blīvumu.

Atrisinājums. Saskaņā ar izteiksmi (2.14)

$$q_L=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{1}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}}=\frac{550-450}{\frac{1}{2\cdot 3{,}14\cdot 19{,}3}\ln\frac{0{,}042}{0{,}032}}=$$

$$=44\,571\ \text{W/m}\approx 44{,}57\ \text{kW/m}.$$

Tērauda siltumvadītspējas koeficienta vērtību atrod pēc 2.1. tabulas: $\lambda=19{,}3$ W/(m·K).

Tā kā $d_2/d_1=42/32=1{,}31<2$, tad pieļaujams aprēķinos izmantot tuvināto izteiksmi (2.15):

$$q_L=\frac{t_{v1}-t_{v2}}{\frac{\delta}{\pi d_{vid}\lambda}}=\frac{550-450}{\frac{0{,}005}{3{,}14\cdot 0{,}037\cdot 19{,}3}}=$$

$$=44\,845\ \text{W/m}\approx 44{,}85\ \text{kW/m}.$$

2.1.13. Izmantojot 2.1.12. uzdevuma nosacījumus, aprēķināt, cik liels būtu temperatūras kritums caurules sienā, ja tērauda caurules vietā lietotu vara cauruli, bet siltuma plūsmas lineārais blīvums būtu tāds pats kā tērauda caurules gadījumā.

Atrisinājums. 2.1. tabulā atrod varam $\lambda=359$ W/(m·K). Temperatūras kritums caurules sienā (formula (2.14)):

$$t_{v1}-t_{v2}=\frac{q_L}{2\pi\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}=\frac{44\,570}{2\cdot3{,}14\cdot359}\ln\frac{0{,}042}{0{,}032}=5{,}38\,°\text{C}.$$

Uzdevumu var atrisināt arī nedaudz vienkāršāk. Temperatūru starpība ir apgriezti proporcionāla siltumvadītspējas koeficienta vērtībai:

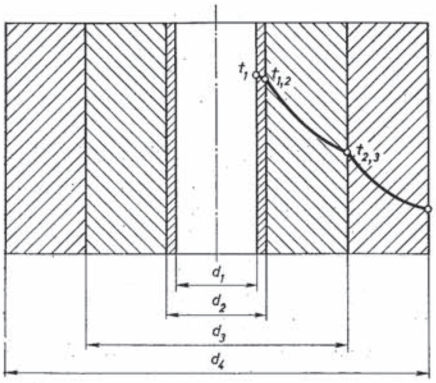
$$\frac{\Delta t_{\text{var}}}{\Delta t_{\text{tēr}}}=\frac{\lambda_{\text{tēr}}}{\lambda_{\text{var}}}.$$

No šejienes

$$\Delta t_{\text{var}}=\frac{\Delta t_{\text{tēr}}\,\lambda_{\text{tēr}}}{\lambda_{\text{var}}}=\frac{(550-450)\,19{,}3}{359}=5{,}38\,°\text{C}.$$

2.1.14. Tērauda 08 caurule, kuras diametri $d_1/d_2=50/60$ mm, pārklāta ar diviem siltumizolācijas materiālu slāņiem (2.4 att.): pirmais ir azbozurīta (klase Б) slānis, otrais (ārējais) — minerālvates ar vidējo $\lambda_3=0{,}07$ W/(m·K). Katra slāņa biezums 50 mm.

Aprēķināt siltuma zudumus no 1 m caurules garuma un temperatūras slāņu saskarvirsmās $t_{1,2}$ un $t_{2,3}$, ja $t_1=200\,°$C un $t_4=45\,°$C.



2.4. att. 2.1.14. uzdevumam.

Atrisinājums. No 2.1. tabulas atrod tēraudam $\lambda_1=53{,}5$ W/(m·K) un no 2.3. tabulas azbozurītam $\lambda_2=0{,}21$ W/(m·K). Siltuma plūsmas lineārais blīvums (formula (2.16)):

$$q_L=(t_1-t_4)\Big/\left(\frac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}+\frac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2\pi\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}\right)=(200-45)\Big/\left(\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot53{,}5}\ln\frac{0{,}06}{0{,}05}+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}21}\ln\frac{0{,}16}{0{,}06}+\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}07}\ln\frac{0{,}26}{0{,}16}\right)=$$
$$=83{,}8\text{ W/m}.$$

Šeit $d_3=d_2+2\delta=0{,}06+2\cdot0{,}05=0{,}16$ m un $d_4=d_3+2\delta=0{,}16+{}$ $+2\cdot0{,}05=0{,}26$ m.

Temperatūras atsevišķo slāņu saskarvirsmās aprēķina pēc izteiksmēm (2.17) un (2.18):

$$t_{1,2}=t_1-\frac{q_L}{2\pi\lambda_1}\ln\frac{d_2}{d_1}=200-\frac{83{,}8}{2\cdot3{,}14\cdot53{,}5}\ln\frac{0{,}06}{0{,}05}=$$
$$=199{,}95\,°\text{C};$$

$$t_{2,3}=t_{1,2}-\frac{q_L}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2}=199{,}95-\frac{83{,}8}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}21}\ln\frac{0{,}16}{0{,}06}=$$
$$=137{,}6\,°\text{C}$$

vai, izmantojot izteiksmi (2.18),

$$t_{2,3}=t_4+\frac{q_L}{2\pi\lambda_3}\ln\frac{d_4}{d_3}=45+\frac{83{,}8}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}07}\ln\frac{0{,}26}{0{,}16}=137{,}6\,°\text{C}.$$

2.1.15. Izmantojot 2.1.14. uzdevuma nosacījumus, aprēķināt siltuma zudumus no caurules garuma 1 m, ja izolācijas materiālus apmaina vietām: pirmais slānis ir no minerālvates ar $\lambda_2=0{,}07$ W/(m·K), otrais (ārējais) — no azbozurīta (klase Б).

Atrisinājums. Saskaņā ar formulu (2.16)

$$q_L=(200-45)\Big/\left(\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot53{,}5}\ln\frac{0{,}06}{0{,}05}+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}07}\ln\frac{0{,}16}{0{,}06}+\frac{1}{2\cdot3{,}14\cdot0{,}21}\ln\frac{0{,}26}{0{,}16}\right)=$$
$$=59{,}62\text{ W/m}.$$

Salīdzinot 2.1.14. un 2.1.15. uzdevumu rezultātus, var secināt, ka cauruļvadus izdevīgāk pārklāt vispirms ar izolācijas materiālu, kuram mazāka λ vērtība.

2.1.16. Aprēķināt siltuma zudumus diennaktī no neizolēta 6 m gara cauruļvada virsmas, ja tērauda caurules diametri ir $d_1/d_2 = 90/100$ mm. Tēraudam $\lambda = 50$ W/(m·K). Pa cauruli plūst karsts ūdens ar $t_{s1} = 150$ °C. Apkārtējā gaisa temperatūra ir $t_{s2} = 20$ °C. Siltumatdeves koeficients no ūdens uz caurules virsmu $\alpha_1 = 1250$ W/(m²·K), no caurules virsmas uz apkārtējo gaisu $\alpha_2 = 12{,}5$ W/(m²·K). Aprēķināt arī caurules iekšējās un ārējās virsmas temperatūras.

Atrisinājums. Siltuma plūsmas lineāro blīvumu, t. i., siltuma zudumus no 1 m garas caurules virsmas aprēķina pēc formulas (2.19). Tā kā $d_2/d_1 = 100/90 = 1{,}11 < 2$, tad lineāro siltumpārejas koeficientu k_L var aprēķināt pēc izteiksmes (2.21) un siltuma plūsmas lineāro blīvumu pēc izteiksmes (2.19):

$$q_L = k_L(t_{s1} - t_{s2}) = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\dfrac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \dfrac{\delta}{\pi d_{vid}\lambda} + \dfrac{1}{\pi d_2 \alpha_2}} =$$

$$= \frac{150 - 20}{\dfrac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}09 \cdot 1250} + \dfrac{0{,}005}{3{,}14 \cdot 0{,}095 \cdot 50} + \dfrac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}10 \cdot 12{,}5}} =$$

$$= 504 \text{ W/m}.$$

Siltuma zudumi diennaktī 6 m garai caurulei:

$$Q = q_L L \tau = 504 \cdot 6(3600 \cdot 24) = 261 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Caurules virsmu temperatūras var aprēķināt pēc formulām (2.23) un (2.24):

$$t_{v1} = t_{s1} - \frac{q_L}{\pi d_1 \alpha_1} = 150 - \frac{504}{3{,}14 \cdot 0{,}09 \cdot 1250} = 148{,}57 \text{ °C};$$

$$t_{v2} = t_{s1} - \frac{q_L}{\pi}\left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}\right) =$$

$$= 150 - \frac{504}{3{,}14}\left(\frac{1}{0{,}09 \cdot 1250} + \frac{1}{2 \cdot 50}\ln\frac{0{,}10}{0{,}09}\right) = 148{,}40 \text{ °C}$$

vai, lietojot formulu (2.24),

$$t_{v2} = t_{s2} + \frac{q_L}{\pi d_2 \alpha_2} = 20 + \frac{504}{3{,}14 \cdot 0{,}10 \cdot 12{,}5} = 148{,}40 \text{ °C}.$$

2.1.17. Izmantojot 2.1.16. uzdevuma nosacījumus, aprēķināt siltuma zudumus diennaktī, ja cauruļvads pārklāts ar 100 mm biezu gāzbetona izolācijas «Siporekss» slāni. Aprēķināt arī izolācijas slāņa iekšējās un ārējās virsmas temperatūras $t_{1,2}$ un t_{v2}.

Atrisinājums. No 2.3. tabulas atrod, ka izolācijas gāzbetonam $\lambda_2 = 0{,}14$ W/(m·K). Lineāro siltumpārejas koeficientu aprēķina pēc izteiksmes (2.21):

$$k_L = 1 \Big/ \left(\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{\delta_1}{\pi d_{vid}\lambda_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2}\ln\frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\pi d_3 \alpha_2}\right) =$$

$$= 1 \Big/ \left(\frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}09 \cdot 1250} + \frac{0{,}005}{3{,}14 \cdot 0{,}095 \cdot 50} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}14}\ln\frac{0{,}30}{0{,}10} + \frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}30 \cdot 12{,}5}\right) =$$

$$= 0{,}7476 \text{ W/(m·K)}.$$

Šeit $d_3 = d_2 + 2\delta_2 = 100 + 2 \cdot 100 = 300$ mm.

Risinājuma vienkāršošanas nolūkā tērauda sienu pieņēmām par plāksni, jo $d_2/d_1 = 1{,}11 < 2$. Precīzāk būtu, ja tērauda caurules sienas pretestību izteiktu nevis kā $\dfrac{\delta_1}{\pi d_{vid}\lambda_1}$, bet gan kā $\dfrac{1}{2\pi\lambda_1}\ln\dfrac{d_2}{d_1}$. Tādā gadījumā iznāktu $k_L = 0{,}7478$ W/(m·K). Kā redzams, kļūda, rēķinot pēc tuvinātas izteiksmes, ir niecīga.

Siltuma plūsmas lineārais blīvums (izteiksme (2.19))

$$q_L = k_L(t_{s1} - t_{s2}) = 0{,}748(150 - 20) = 97{,}2 \text{ W/m}.$$

Siltuma zudumi diennaktī no 6 m garas caurules

$$Q = q_L L \tau = 97{,}2 \cdot 6(3600 \cdot 24) = 50{,}4 \cdot 10^6 \text{ J}.$$

Izolācijas slāņa iekšējās (caurules ārējās) virsmas temperatūru var aprēķināt pēc formulas (2.23) vai (2.24):

$$t_{1,2} = t_{s1} - \frac{q_L}{\pi}\left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda}\ln\frac{d_2}{d_1}\right) =$$

$$= 150 - \frac{97{,}2}{3{,}14}\left(\frac{1}{0{,}09 \cdot 1250} + \frac{1}{2 \cdot 50}\ln\frac{0{,}10}{0{,}09}\right) = 149{,}7 \text{ °C}.$$

Izolācijas slāņa ārējās virsmas temperatūru ērtāk aprēķināt pēc izteiksmes (2.24):

$$t_{v2} = t_{s2} + q_L\frac{1}{\pi d_3 \alpha_2} = 20 + 97{,}2\frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}30 \cdot 12{,}5} = 28{,}3 \text{ °C}.$$

2.1.18. Pa nerūsošā tērauda X13 cauruli, kuras diametri $d_1/d_2 = 12/16$ mm, plūst sauss piesātināts ūdens tvaiks ar temperatūru 150°C. Aprēķināt siltuma zudumus no 12 m garas caurules, ja apkārtējā gaisa temperatūra ir 10 °C, siltumatdeves koeficients no tvaika uz caurules virsmu $\alpha_1 = 1000$ W/(m²·K) un no caurules ārējās virsmas uz gaisu $\alpha_2 = 8$ W/(m²·K). Noteikt arī tvaika daudzumu, kurš kondensēsies caurulē vienā diennaktī.

Atrisinājums. Siltuma zudumus no 1 m garas caurules (siltuma plūsmas blīvumu) aprēķina pēc formulām (2.19) un (2.21), jo $d_2/d_1 = 16/12 < 2$. Tātad

$$q_L = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\dfrac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \dfrac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda} + \dfrac{1}{\pi d_2 \alpha_2}} =$$

$$= \frac{150 - 10}{\dfrac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}012 \cdot 1000} + \dfrac{0{,}002}{3{,}14 \cdot 0{,}014 \cdot 27{,}7} + \dfrac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}016 \cdot 8}} =$$

$$= 55{,}6 \text{ W/m}.$$

Šeit λ nerūsošam tēraudam atradām 2.1. tabulā.

Kondensāta daudzumu M, kurš veidojas vienā diennaktī, aprēķina pēc siltuma bilances vienādojuma

$$q_L L \tau = Mr,$$

no kura

$$M = \frac{q_L L \tau}{r} = \frac{55{,}6 \cdot 12 (3600 \cdot 24)}{2114 \cdot 10^3} = 27{,}3 \text{ kg}.$$

Šeit L — caurules garums, $r = 2114$ kJ/kg — iztvaikošanas siltums, kuru atrod piesātināta ūdens tvaika tabulās.

2.1.19. Atrisināt 2.1.18. uzdevumu, ja caurule pārklāta ar azbesta auklas kārtu, kuras biezums $\delta = 12$ mm. Salīdzināt abu uzdevumu rezultātus.

Atrisinājums. 2.3. tabulā atrod, ka azbestam $\lambda_2 = 0{,}16$ W/(m·K). Tad analogi kā 2.1.16. un 2.1.17. uzdevumā

$$q_L = (t_{s1} - t_{s2}) \Big/ \left(\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \right.$$

$$\left. + \frac{1}{\pi d_3 \alpha_2} \right) = (150 - 10) \Big/ \left(\frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}012 \cdot 1000} + \right.$$

$$+ \frac{0{,}002}{3{,}14 \cdot 0{,}014 \cdot 27{,}7} + \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}16} \ln \frac{0{,}040}{0{,}016} +$$

$$\left. + \frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}040 \cdot 8} \right) = 72{,}3 \text{ W/m}.$$

Kondensāta daudzums diennaktī

$$M = \frac{q_L L \tau}{r} = \frac{72{,}3 \cdot 12 (3600 \cdot 24)}{2114 \cdot 10^3} = 35{,}5 \text{ kg}.$$

Salīdzinot 2.1.18. un 2.1.19. uzdevuma rezultātus, redzams, ka tvaika cauruļvada pārklāšana ar azbesta auklu siltuma zudumus palielina par 30%.

2.1.20. Noteikt, vai lietderīgi pārklāt 20 mm resnu cauruļvadu ar azbesta auklu siltuma zudumu samazināšanas nolūkā, ja siltumatdeves koeficients no izolācijas virsmas uz apkārtējo vidi $\alpha_2 = 6$ W/(m²·K).

Atrisinājums. 2.3. tabulā atrod, ka azbesta auklai $\lambda_2 = 0{,}16$ W/(m·K). Saskaņā ar formulu (2.25) izolēta cauruļvada kritiskais diametrs

$$d_{kr} = \frac{2\lambda_2}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0{,}16}{6} = 0{,}053 \text{ m} = 53 \text{ mm}.$$

Tā kā $d_2 < d_{kr}$ $(20 < 53)$, tad dotajā gadījumā azbesta auklu nav lietderīgi izmantot par izolāciju.

2.1.21. Aprēķināt, kādam jābūt izolācijas materiāla siltumvadītspējas koeficientam, lai, pastāvot 2.1.20. uzdevuma nosacījumiem, to būtu lietderīgi izmantot.

Ievietojot formulā (2.25) d_{kr} vietā d_2, atrod

$$\lambda_2 \leqslant \frac{d_2 \alpha_2}{2} = \frac{0{,}020 \cdot 6}{2} = 0{,}06 \text{ W/(m·K)}.$$

2.1.22. Cik bieza jāizvēlas elektriskā vada gumijas izolācija, lai būtu maksimālie siltuma zudumi? Vada diametrs $d_1 = 4$ mm, siltumatdeves koeficients no gumijas uz apkārtējo gaisu $\alpha_2 = 10$ W/(m²·K).

Atrisinājums. Saskaņā ar formulu (2.25)

$$d_{kr} = \frac{2\lambda}{\alpha_2} = \frac{2 \cdot 0{,}16}{10} = 0{,}032 \text{ m} = 32 \text{ mm}.$$

2.2. tabulā atrod, ka gumijai $\lambda = 0{,}16$ W/(m·K).

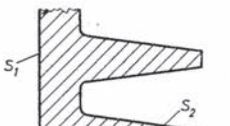
Tā kā $d_{kr} > d_1$, tad gumijas izolācija palielina siltumatdevi no vada uz apkārtējo gaisu. Maksimālā siltumatdeve būs tad, ja izolētā vada ārējais diametrs būs $d_2 = d_{kr}$. Tātad izolācijas kārtas biezumam jābūt

$$\delta = \frac{d_2 - d_1}{2} = \frac{d_{kr} - d_1}{2} = \frac{32 - 4}{2} = 14 \text{ mm}.$$

2.1.23. Aprēķināt pieļaujamo elektriskās strāvas stiprumu alumīnija vadā ($d_1 = 3$ mm), kuram ir gumijas izolācija ar biezumu $\delta = 2$ mm, ja uz izolācijas ārējās virsmas temperatūra nedrīkst pārsniegt 45 °C, bet uz iekšējās — 70 °C. Vada elektriskā pretestība $R = 0{,}0040$ Ω/m.

Atrisinājums. 2.2. tabulā atrod, ka gumijai $\lambda = 0{,}16$ W/(m·K). Siltuma plūsmas lineāro blīvumu caur izolācijas slāni aprēķina pēc formulas (2.14):

$$q_L = \frac{t_{v1} - t_{v2}}{\dfrac{1}{2\pi\lambda} \ln \dfrac{d_2}{d_1}} = \frac{70 - 45}{\dfrac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}16} \ln \dfrac{0{,}007}{0{,}003}} = 29{,}6 \text{ W/m}.$$



2.5. att. 2.1.24. uzdevumam.

Pieļaujamo strāvas stiprumu atrod no izteiksmes $q_L = I^2 R$:

$$I = \sqrt{\frac{q_L}{R}} = \sqrt{\frac{29{,}6}{0{,}0040}} = 86\ \text{A}.$$

2.1.24. Aprēķināt siltuma plūsmu caur 0,5 m² lielu alumīnija plāksni, kuras biezums $\delta = 10$ mm, ja plāksne no vienas puses apribota (2.5. att.). Apribojuma koeficients $m = S_2/S_1 = 5$. Gludo virsmu apskalo siltumnesējs ar temperatūru $t_{s1} = 120\,°\text{C}$ un vidējo siltumatdeves koeficientu $\alpha_1 = 200\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$, bet apriboto virsmu (ieskaitot ar ribām nepārklāto virsmu) — ar temperatūru 22 °C un $\alpha_2 = 10\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Aprēķināt arī siltuma plūsmu caur plāksni gadījumā, ja tai nav apribojuma.

Atrisinājums. Siltuma plūsmu caur apribotu plāksni, attiecinot uz gludās (neapribotās) virsmas laukumu, var aprēķināt pēc formulas (2.26):

$$\Phi_r = q_{r1} S_1 = \frac{(t_{s1} - t_{s2}) S_1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{m\alpha_2}} = \frac{(120 - 22)\,0{,}5}{\dfrac{1}{200} + \dfrac{0{,}01}{213} + \dfrac{1}{5\cdot 10}} =$$

$$= 1956\ \text{W}.$$

Ja plāksne būtu bez ribām, tad saskaņā ar izteiksmēm (2.8) un (2.9)

$$\Phi = \frac{(t_{s1} - t_{s2}) S_1}{\dfrac{1}{\alpha_1} + \dfrac{\delta}{\lambda} + \dfrac{1}{\alpha_2}} = \frac{(120 - 22)\,0{,}5}{\dfrac{1}{200} + \dfrac{0{,}01}{213} + \dfrac{1}{10}} = 466\ \text{W}.$$

Alumīnija siltumvadītspējas koeficienta vērtību atrod 2.1. tabulā — $\lambda = 213\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$.

2.1.25. Aprēķināt siltuma plūsmas lineāro blīvumu apribotā alumīnija caurulē, ja $d_1 = 20$ mm, $d_2 = 30$ mm. Caurulē plūst siltumnesējs ar $t_{s2} = -15\,°\text{C}$ un vidējo siltumatdeves koeficientu $\alpha_1 = 100\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$, bet ārējo (apriboto) virsmu apskalo gaiss ar 30 °C un $\alpha_2 = 8\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$. Apribojuma koeficients $m = 10$.

Atrisinājums. 2.1. tabulā atrod, ka alumīnijam $\lambda = 209\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$. Pēc formulas (2.29) aprēķina

$$q_{rL} = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\dfrac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \dfrac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda} + \dfrac{1}{m \pi d_2 \alpha_2}} =$$

$$= \frac{30 - (-15)}{\dfrac{1}{3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 100} + \dfrac{0{,}005}{3{,}14\cdot 0{,}025\cdot 209} + \dfrac{1}{10\cdot 3{,}14\cdot 0{,}03\cdot 8}} =$$

$$= 154\ \text{W/m}.$$

2.1.26. Kādam jābūt apribojuma koeficientam, lai, pastāvot 2.1.25. uzdevuma nosacījumiem, siltuma plūsmas lineārais blīvums būtu $q_{rL} = 50$ W/m?

Atrisinājums. No izteiksmes (2.29) izriet, ka

$$m = \frac{1}{\left[\dfrac{t_{s1} - t_{s2}}{q_{rL}} - \left(\dfrac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \dfrac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda}\right)\right] \pi d_2 \alpha_2} =$$

$$= \frac{1}{\left[\dfrac{30 - (-15)}{50} - \left(\dfrac{1}{3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 100} + \dfrac{0{,}005}{3{,}14\cdot 0{,}025\cdot 209}\right)\right]} \times$$

$$\times \frac{1}{3{,}14\cdot 0{,}03\cdot 8} = 1{,}8.$$

2.2. SILTUMVADĪŠANA NESTACIONĀRĀ REŽĪMĀ

Aprēķinu formulas

Bezdimensionālā virstemperatūra

$$\theta = \frac{\vartheta}{\vartheta_0} = \frac{t - t_s}{t_0 - t_s} = f\,[\text{Bi}, \text{Fo}, X\ (\text{vai}\ r)]. \qquad (2.30)$$

Līdzības skaitļi

$$\text{Fo} = \frac{a\tau}{l^2}; \qquad (2.31)$$

$$\text{Bi} = \frac{\alpha l}{\lambda}. \qquad (2.32)$$

Temperatūras difūzijas (vadītspējas) koeficients

$$a = \frac{\lambda}{\rho c}. \qquad (2.33)$$

Bezdimensionālā virstemperatūra plāksnē

$$\theta=\sum_{i=1}^{\infty}\frac{2\sin\sigma_i\cos(\sigma_i X)}{\sigma_i+\sin\sigma_i\cos\sigma_i}e^{-\sigma_i^2\mathrm{Fo}}, \tag{2.34}$$

kur X — raksturīgais bezdimensionālais izmērs x/δ;
σ_i — transcendentā vienādojuma $\sigma_i \operatorname{tg}\sigma_i=\mathrm{Bi}$ saknes.

Plāksnes atdotais (saņemtais) siltuma daudzums

$$Q=Q_0(1-\bar{\theta}), \tag{2.35}$$

kur $Q_0=2\delta Sc\rho\vartheta_0$ — plāksnes siltuma kapacitāte atdzišanas (silšanas) sākuma momentā.

Plāksnes vidējā bezdimensionālā virstemperatūra dzišanas beigu momentā

$$\bar{\theta}=\sum_{i=1}^{n}\frac{2\mathrm{Bi}^2}{\sigma_i^2(\sigma_i^2+\mathrm{Bi}^2+\mathrm{Bi})}e^{-\sigma_i^2\mathrm{Fo}}. \tag{2.36}$$

Dzišanas (silšanas) temps siltuma regulārajā režīmā

$$m=\frac{\ln\vartheta_1-\ln\vartheta_2}{\tau_2-\tau_1}. \tag{2.37}$$

Ķermeņa formas koeficients bezgalīgai plāksnei

$$K=\frac{1}{\left(\frac{\pi}{2\delta}\right)^2}, \tag{2.38}$$

lodei

$$K=\frac{1}{\left(\frac{\pi}{r}\right)^2}, \tag{2.39}$$

paralēlskaldnim

$$K=\frac{1}{\left(\frac{\pi}{L_1}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L_2}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L_3}\right)^2}, \tag{2.40}$$

cilindram

$$K=\frac{1}{\left(\frac{2{,}405}{r}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L}\right)^2}. \tag{2.41}$$

Temperatūras difūzijas koeficientu ar siltuma regulārā režīma metodi var atrast pēc izteiksmes

$$a=Km. \tag{2.42}$$

2.4. tabula

Vienādojuma $\sigma_i \operatorname{tg}\sigma_i=\mathrm{Bi}$ sakņu vērtības

Bi	σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5
0	0,000	3,142	6,283	9,425	12,566
0,01	0,100	3,145	6,285	9,426	12,567
0,1	0,311	3,173	6,299	9,435	12,574
0,2	0,433	3,204	6,315	9,446	12,582
0,5	0,653	3,292	6,362	9,478	12,606
1,0	0,860	3,426	6,437	9,529	12,645
2,0	1,077	3,644	6,578	9,630	12,722
5,0	1,314	4,034	6,910	9,893	12,935
10,0	1,429	4,306	7,228	10,200	13,214
20,0	1,496	4,492	7,495	10,512	13,542
50,0	1,540	4,620	7,701	10,783	13,867
100,0	1,555	4,666	7,776	10,887	13,998
∞	1,571	4,712	7,854	10,996	14,137

Aprēķinu piemēri

2.2.1. Gumijas plāksnei pēc vulkanizēšanas ir 145 °C temperatūra visā biezumā. Pēc cik ilga laika temperatūra uz plāksnes virsmas būs 45 °C, ja to novieto telpā ar 20 °C temperatūru? Plāksnes biezums $2\delta=10$ mm, siltumatdeves koeficients no plāksnes uz apkārtējo vidi $\alpha=40$ W/(m²·K). Plāksne tiek dzesēta no abām pusēm. Noteikt arī, kāda būs temperatūra plāksnes vidū (centrālajā plaknē).

Atrisinājums. No 2.2. tabulas atrod, ka gumijai $\rho=1200$ kg/m³; $\lambda=0{,}15$ W/(m·K); $c=1400$ J/(kg·K). Temperatūras difūzijas (vadītspējas) koeficienta vērtību var atrast speciālā literatūrā vai arī aprēķināt:

$$a=\frac{\lambda}{\rho c}=\frac{0{,}15}{1200\cdot1400}=8{,}93\cdot10^{-8}\ \mathrm{m^2/s}.$$

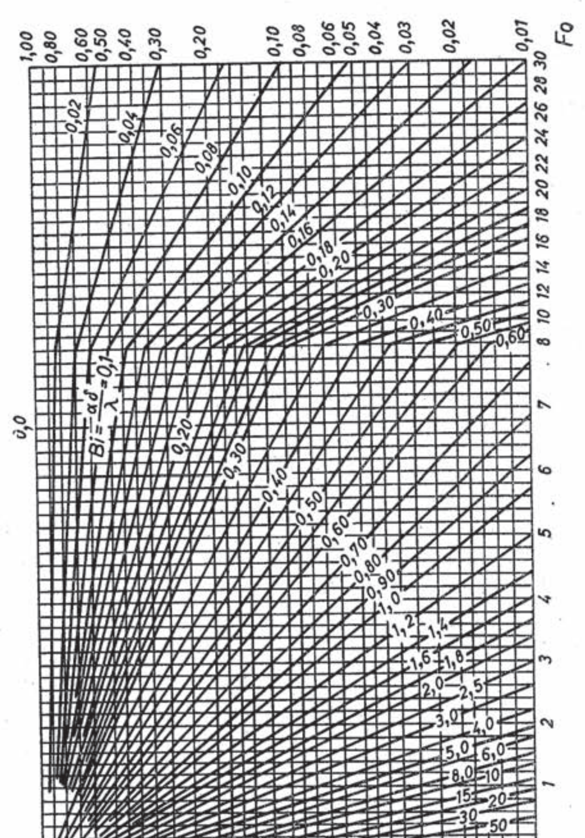
Aprēķina bezdimensionālo virstemperatūru (izteiksme (2.30)) uz plāksnes virsmām:

$$\theta_v=\frac{t_v-t_s}{t_0-t_s}=\frac{45-20}{145-20}=0{,}2.$$

Bio līdzības skaitlis plāksnei (izteiksme (2.32))

$$\mathrm{Bi}=\frac{\alpha\delta}{\lambda}=\frac{40\cdot0{,}005}{0{,}15}=1{,}33.$$

Plāksnei, ja to dzesē (vai silda) no abām pusēm, par raksturīgo izmēru pieņem pusi no biezuma.



2.6. *att.* Sakarības $\theta=f_2(\text{Bi, Fo}, \delta)$ nomogramma relatīvi plānas plāksnes virsmai $(\theta=\theta_v)$.

Zinot θ_v un Bi, pēc nomogrammas (2.6. att.) atrod Furjē skaitli:

$$\text{Fo}=\frac{a\tau}{\delta^2}=1{,}35.$$

No šejienes aprēķina laika sprīdi, pēc kura gumijas plāksnes virsma atdzisīs līdz temperatūrai $t_v=45\,°\text{C}$:

$$\tau=\frac{\text{Fo}\,\delta^2}{a}=\frac{1{,}35\cdot 0{,}005^2}{8{,}93\cdot 10^{-8}}=378\ \text{s}=6{,}3\ \text{min}.$$

Bezdimensionālo virstemperatūru, kas iestāsies plāksnes vidū pēc 378 s, atrod nomogrammā (2.7. att.) pēc zināmiem Bi un Fo skaitļiem:

$$\theta_c=\frac{t_c-t_s}{t_0-t_s}=0{,}35.$$

No šejienes atrod, ka temperatūra plāksnes vidū pēc 378 s ir

$$t_c=t_s+\theta\,(t_0-t_s)=20+0{,}35\,(145-20)=63{,}7\,°\text{C}.$$

2.2.2. Atrisināt 2.2.1. uzdevumu, ja plāksne tiek dzesēta no vienas puses, bet otra puse ir ideāli izolēta.

Atrisinājums. Šajā gadījumā maksimālā temperatūra būs uz izolētās virsmas, tāpēc Bi un Fo līdzības skaitļos par raksturīgo izmēru jāņem viss plāksnes biezums 2δ.

$$\text{Bi}=\frac{\alpha\,2\delta}{\lambda}=\frac{40\cdot 0{,}01}{0{,}15}=2{,}67.$$

Iepriekš izrēķinājām, ka $\theta_v=0{,}2$. Nomogrammā (sk. 2.6. att.) atrod

$$\text{Fo}=0{,}7.$$

No šejienes aprēķina, pēc cik ilga laika gumijas virsma atdzisīs līdz 45 °C:

$$\tau=\frac{\text{Fo}\,(2\delta)^2}{a}=\frac{0{,}7\cdot 0{,}01^2}{8{,}93\cdot 10^{-8}}=784\ \text{s}\approx 13\ \text{min}.$$

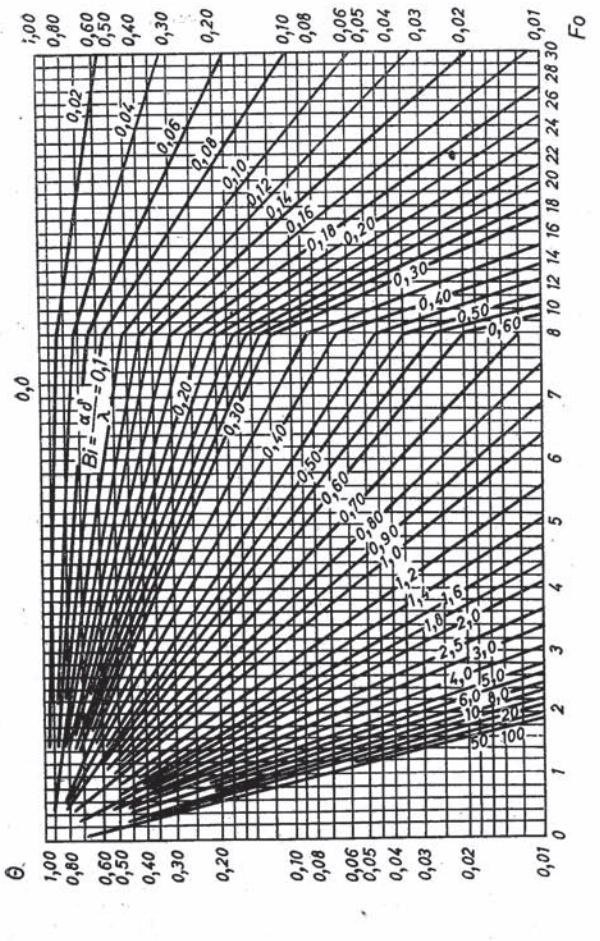
Bezdimensionālo virstemperatūru, kas iestāsies uz plāksnes izolētās virsmas pēc 784 s, atrod nomogrammā (2.7. att.) pēc zināmiem Bi un Fo:

$$\theta_c=0{,}45.$$

Temperatūra uz izolētās virsmas

$$t_{v1}=t_s+\theta\,(t_0-t_s)=20+0{,}45\,(145-20)=76{,}3\,°\text{C}.$$

2.2.3. Krāsns sienai visā $2\delta=500$ mm biezumā ir 600 °C temperatūra. Pēkšņi sienu sāk dzesēt no abām pusēm ar gaisu, kura temperatūra 20 °C. Aprēķināt, kāda temperatūra iestāsies uz sienas virsmām pēc 2,5 stundām un cik daudz siltuma šajā laikā



2.7. *att.* Sakarības $\theta = f_1(\mathrm{Bi}, \mathrm{Fo}, \delta)$ nomogramma relatīvi plānas plāksnes vidum ($\theta = \theta_c$).

atdos katrs m^2 sienas, ja siena mūrēta no dinasa ķieģeļiem, kuriem $\rho = 1300\ \mathrm{kg/m^3}$; $c = 1{,}10\ \mathrm{kJ\,(kg \cdot K)}$; $\lambda = 0{,}7\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$. Siltumatdeves koeficients $\alpha = 56\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$. Aprēķinam izmantot formulas.

Atrisinājums. Tā kā siena tiek dzesēta no abām pusēm, tad par raksturīgo izmēru jāpieņem puse no sienas biezuma, t. i., δ.

Sienas materiāla temperatūras difūzijas koeficients

$$a = \frac{\lambda}{\rho c} = \frac{0{,}7}{1300 \cdot 1100} = 0{,}49 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}.$$

Līdzības skaitļi:

$$\mathrm{Fo} = \frac{a\tau}{\delta^2} = \frac{0{,}49 \cdot 10^{-6}(2{,}5 \cdot 3600)}{0{,}25^2} = 0{,}071;$$

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha\delta}{\lambda} = \frac{56 \cdot 0{,}25}{0{,}7} = 20.$$

Sienas virsmu bezdimensionālās virstemperatūras aprēķinam izmanto izteiksmi (2.34). Bezdimensionālā koordināte sienas virsmai $X = x/\delta = 1$ (plāksnes vidū būtu $X = 0$).

Tā kā $\mathrm{Fo} < 0{,}3$, tad nedrīkst aprobežoties ar rindas pirmo locekli. Vienkāršības dēļ ņemsim vērā tikai rindas pirmos trīs locekļus.

Transcendentā vienādojuma sakņu σ_i vērtības radiānos atrod 2.4. tabulā atbilstoši Bi skaitliskai vērtībai:

$$\sigma_1 = 1{,}496; \quad \sigma_2 = 4{,}492; \quad \sigma_3 = 7{,}495.$$

Loka grādos tās ir šādas:

$$85{,}7°; \quad 257{,}4°; \quad 429{,}3°.$$

Tad

$$\theta_v = \sum_{i=1}^{3} \frac{2 \sin\sigma_i \cos\sigma_i}{\sigma_i + \sin\sigma_i \cos\sigma_i} e^{-\sigma_i^2 \mathrm{Fo}} =$$

$$= \frac{2 \sin 85{,}7 \cos 85{,}7}{1{,}496 + \sin 85{,}7 \cos 85{,}7} e^{-1{,}496^2 \cdot 0{,}071} +$$

$$+ \frac{2 \sin 257{,}4 \cos 257{,}4}{4{,}492 + \sin 257{,}4 \cos 257{,}4} e^{-4{,}492^2 \cdot 0{,}071} +$$

$$+ \frac{2 \sin 429{,}3 \cos 429{,}3}{7{,}495 + \sin 429{,}3 \cos 429{,}3} e^{-7{,}495^2 \cdot 0{,}071} =$$

$$= 0{,}081\,21 + 0{,}021\,60 + 0{,}001\,566 = 0{,}104\,38 \approx 0{,}1044.$$

Ja ņem vērā rindas piecus locekļus, tad

$$\theta_v = 0{,}104\,39.$$

Temperatūra uz sienas ārējās virsmas pēc 2,5 stundām saskaņā ar izteiksmi (2.30):

$$t_v = t_s + \theta_v (t_0 - t_s) = 20 + 0,1044 (600 - 20) = 80,5\ °C.$$

Sienas atdoto siltuma daudzumu aprēķina pēc formulas (2.35). Iepriekš aprēķina sienas vidējo bezdimensionālo virstemperatūru dzišanas beigu momentā (izteiksme (2.36)):

$$\bar{\theta} = \sum_{i=1}^{3} \frac{2\mathrm{Bi}^2}{\sigma_i^2(\sigma_i^2 + \mathrm{Bi}^2 + \mathrm{Bi})} e^{-\sigma_i^2 \mathrm{Fo}} =$$

$$= \frac{2 \cdot 20^2}{1,496^2 (1,496^2 + 20^2 + 20)} e^{-1,496^2 \cdot 0,071} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 20^2}{4,492^2 (4,492^2 + 20^2 + 20)} e^{-4,492^2 \cdot 0,071} +$$

$$+ \frac{2 \cdot 20^2}{7,495^2 (7,495^2 + 20^2 + 20)} e^{-7,495^2 \cdot 0,071} =$$

$$= 0,7222 + 0,0215 + 0,000\,55 \approx 0,744.$$

Pēc formulas (2.35) atrod:

$$Q = Q_0 (1 - \bar{\theta}) = 414\,700 (1 - 0,744) = 106\,163\ \mathrm{kJ} \approx 106\ \mathrm{MJ},$$

kur

$$Q_0 = 2\delta S c \rho \vartheta_0 = 0,5 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1300 (600 - 20) = 414\,700\ \mathrm{kJ}.$$

Šeit $\vartheta_0 = t_0 - t_s$.

Ja sienu dzesētu tikai no vienas puses, piemēram, ārpuses, bet iekšpusi varētu uzskatīt par ideāli izolētu, tad aprēķins būtu jāizpilda analogi, tikai par raksturīgo izmēru Bi un Fo līdzības skaitļu izteiksmēs būtu jāpieņem viss sienas biezums $2\delta = 0,5$ m.

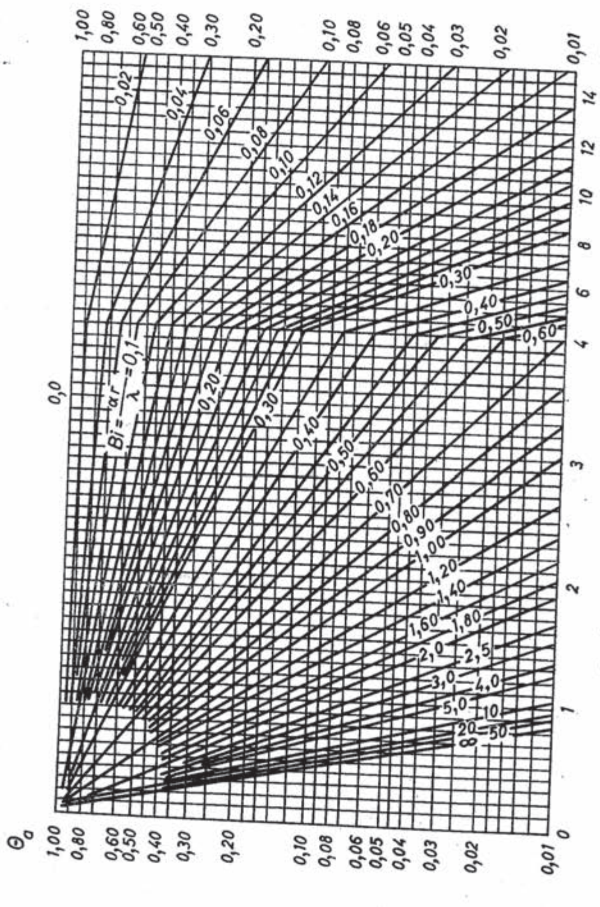
2.2.4. Garu tērauda cilindru, kura temperatūra ir 10 °C, ievieto krāsnī ar temperatūru 1000 °C. Aprēķināt, pēc cik ilga laika cilindra vidū temperatūra sasniegs 700 °C un kāda šajā momentā būs cilindra virsmas temperatūra, ja cilindram $d = 400$ mm; tēraudam $\lambda = 52$ W/(m·K), $\rho = 7860$ kg/m³, $a = 12,9 \cdot 10^{-6}$ m²/s. Siltumatdeves koeficienta vērtība no krāsns vides uz cilindra virsmu $\alpha = 150$ W/(m²·K).

Atrisinājums. Aprēķina bezdimensionālo virstemperatūru (izteiksme (2.30)) uz cilindra ass, kura iestāsies karsēšanas beigās:

$$Q_a = \frac{t_c - t_s}{t_0 - t_s} = \frac{700 - 1000}{10 - 1000} = \theta,303.$$

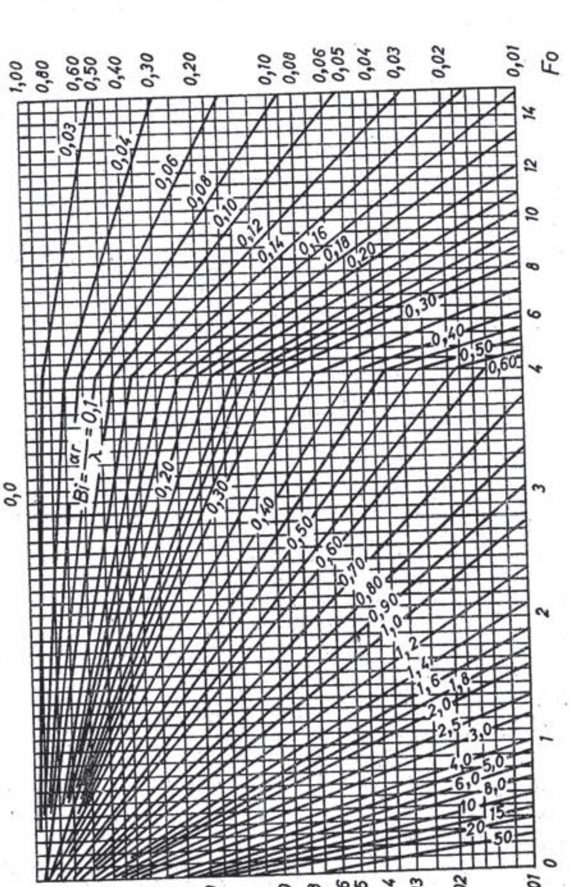
Atrod Bi līdzības skaitli:

$$\mathrm{Bi} = \frac{\alpha r}{\lambda} = \frac{150 \cdot 0,2}{52} = 0,58.$$



2.8. att. Sakarības $\theta_a = f_4(\mathrm{Bi}, \mathrm{Fo}, r)$ nomogramma relatīvi gara cilindra asij.

11 — 2149



2.9. att. Sakarības $\theta_v=f_3(\mathrm{Bi}, \mathrm{Fo}, r)$ nomogramma relatīvi gara cilindra virsmai.

Pēc šīm θ un Bi vērtībām atrod Furjē līdzības skaitli nomogrammā (2.8. att.):

$$\mathrm{Fo}=1{,}3.$$

Tā kā

$$\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{r^2},$$

tad laiks, kurš nepieciešams, lai temperatūra uz cilindra ass sasniegtu 700 °C, ir

$$\tau=\frac{r^2\mathrm{Fo}}{a}=\frac{0{,}2^2\cdot 1{,}3}{12{,}9\cdot 10^{-6}}=4031\ \mathrm{s}=67{,}2\ \mathrm{min}.$$

Zinot Fo un Bi, pēc nomogrammas (2.9. att.) var atrast cilindra virsmas bezdimensionālo virstemperatūru:

$$\theta_v=0{,}24.$$

Cilindra virsmas temperatūra

$$t_v=t_s+\theta(t_0-t_s)=1000+0{,}24(10-1000)=762\ °\mathrm{C}.$$

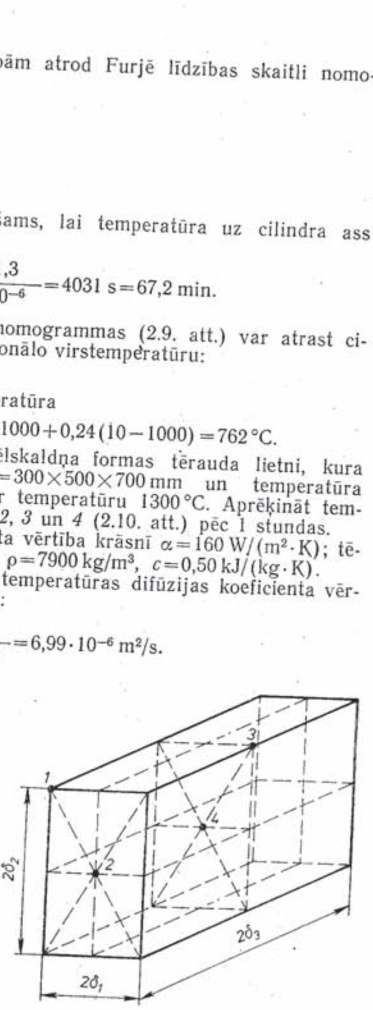
2.2.5. Taisnstūra paralēlskaldņa formas tērauda lietni, kura izmēri ir $2\delta_1\times 2\delta_2\times 2\delta_3=300\times 500\times 700$ mm un temperatūra $t_0=20$ °C, ievieto krāsnī ar temperatūru 1300 °C. Aprēķināt temperatūru lietņa punktos *1, 2, 3* un *4* (2.10. att.) pēc 1 stundas.

Siltumatdeves koeficienta vērtība krāsnī $\alpha=160$ W/(m²·K); tēraudam $\lambda=27{,}6$ W/(m·K), $\rho=7900$ kg/m³, $c=0{,}50$ kJ/(kg·K).

Atrisinājums. Aprēķina temperatūras difūzijas koeficienta vērtību dotajai tērauda šķirnei:

$$a=\frac{\lambda}{\rho c}=\frac{27{,}6}{7900\cdot 500}=6{,}99\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s}.$$

Šajā uzdevumā ir trīsdimensiju temperatūras lauks. Bezdimensionālo virstemperatūru atbilstošos punktos atrod kā triju bezgalīgu plākšņu bezdimensionālo virstemperatūru reizinājumu. Bezdimensionālās virstemperatūras jāmeklē plaknēs, kas krustojoties veido punktu, kurā jānosaka temperatūra. Aprēķinot Bi un Fo līdzības skaitļus, par raksturīgiem plāksnes izmēriem jāizvēlas šīm plaknēm atbilstošie biezumi.



2.10. att. 2.2.5. uzdevumam.

Punktu *1* veido paralēlskaldņa trīs ārējās plaknes, tāpēc virstemperatūras jāmeklē nomogrammā (sk. 2.6. att.) plāksnes virsmām ar raksturīgiem izmēriem δ. Tātad

$$Bi_{1\delta_1}=\frac{\alpha\delta_1}{\lambda}=\frac{160\cdot 0{,}15}{27{,}6}=0{,}87;$$

$$Fo_{1\delta_1}=\frac{a\tau}{\delta_1^2}=\frac{6{,}99\cdot 10^{-6}\cdot 3600}{0{,}15^2}=1{,}12.$$

Nomogrammā atrod, ka atbilstošais $\theta_{1\delta_1}=0{,}36$.

$$Bi_{1\delta_2}=\frac{\alpha\delta_2}{\lambda}=\frac{160\cdot 0{,}25}{27{,}6}=1{,}45;$$

$$Fo_{1\delta_2}=\frac{a\tau}{\delta_2^2}=\frac{6{,}99\cdot 10^{-6}\cdot 3600}{0{,}25^2}=0{,}40.$$

Tiem atbilstošais $\theta_{1\delta_2}=0{,}45$.

$$Bi_{1\delta_3}=\frac{\alpha\delta_3}{\lambda}=\frac{160\cdot 0{,}35}{27{,}6}=2{,}03;$$

$$Fo_{1\delta_3}=\frac{a\tau}{\delta_3^2}=\frac{6{,}99\cdot 10^{-6}\cdot 3600}{0{,}35^2}=0{,}205.$$

Sajā gadījumā $\theta_{1\delta_3}=0{,}45$. To atrod precīzākās nomogrammās (piemēram, grāmatā [2.6]).

Bezdimensionālā virstemperatūra punktā *1*:

$$\theta_1=\theta_{1\delta_1}\theta_{1\delta_2}\theta_{1\delta_3}=0{,}36\cdot 0{,}45\cdot 0{,}45=0{,}073.$$

Punktu *2* veido paralēlskaldņa viena sānu plakne un divas vidusplaknes, kurām līdzības skaitļus Bi un Fo jau izskaitļojām:

$$Bi_{2\delta_1}=Bi_{1\delta_1}=0{,}87;$$

$$Fo_{2\delta_1}=Fo_{1\delta_1}=1{,}12.$$

Bezdimensionālo virstemperatūru meklē nomogrammā (sk. 2.7. att.) plāksnes vidum:

$$\theta_{2\delta_1}=0{,}54.$$

Analogi

$$Bi_{2\delta_2}=Bi_{1\delta_2}=1{,}45;$$

$$Fo_{2\delta_2}=Fo_{1\delta_2}=0{,}40;$$

$$\theta_{2\delta_2}=0{,}78.$$

Trešā plakne, kas veido punktu *2*, ir paralēlskaldņa sānu plakne, tāpēc par raksturīgo izmēru jāņem δ_3 un bezdimensionālā virstemperatūra jāmeklē nomogrammā plāksnes sānu virsmām (sk. 2.6. att.). To jau atradām, kad meklējām punkta *1* bezdimensionālo virstemperatūru:

$$\theta_{2\delta_3}=\theta_{1\delta_3}=0{,}45.$$

Bezdimensionālā virstemperatūra punktā *2*:

$$\theta_2=\theta_{2\delta_1}\theta_{2\delta_2}\theta_{2\delta_3}=0{,}54\cdot 0{,}78\cdot 0{,}45=0{,}19.$$

Punktu *3* veido divas sānu plaknes un viena vidusplakne. Sānu plaknēm bezdimensionālās virstemperatūras jau atradām:

$$\theta_{3\delta_1}=\theta_{1\delta_1}=0{,}36;$$

$$\theta_{3\delta_2}=\theta_{1\delta_2}=0{,}45.$$

$\theta_{3\delta_3}$ meklē nomogrammā plāksnes vidum atbilstoši $Bi_{3\delta_3}=Bi_{1\delta_3}=2{,}03$ un $Fo_{3\delta_3}=Fo_{1\delta_3}=0{,}205$.

Tā kā $Fo_{3\delta_3}$ vērtība ir samērā maza, tad $\theta_{3\delta_3}$ jāmeklē precīzākās nomogrammās (piemēram, [2.6]) vai jāaprēķina pēc formulām. Atrod, ka

$$\theta_{3\delta_3}=0{,}91.$$

Bezdimensionālā temperatūra punktā *3*:

$$\theta_3=\theta_{3\delta_1}\theta_{3\delta_2}\theta_{3\delta_3}=0{,}36\cdot 0{,}45\cdot 0{,}91=0{,}15.$$

Punktu *4* veido paralēlskaldņa trīs vidusplaknes, tāpēc bezdimensionālās virstemperatūras šīm plaknēm jāmeklē nomogrammā plāksnes vidum (sk. 2.7. att.). Tās atradām jau iepriekš:

$$\theta_{4\delta_1}=\theta_{2\delta_1}=0{,}54;$$

$$\theta_{4\delta_2}=\theta_{2\delta_2}=0{,}78;$$

$$\theta_{4\delta_3}=\theta_{3\delta_3}=0{,}91.$$

Tad

$$\theta_4=\theta_{4\delta_1}\theta_{4\delta_2}\theta_{4\delta_3}=0{,}54\cdot 0{,}78\cdot 0{,}91=0{,}38.$$

Temperatūras atbilstošajos punktos atrod pēc izteiksmes (2.30):

$$t_i=t_s+\theta_i(t_0-t_s);$$

$$t_1=1300+0{,}073(20-1300)=1207\,°C;$$

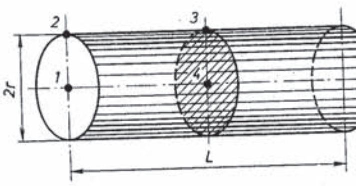
$$t_2=1300+0{,}19(20-1300)=1057\,°C;$$

$$t_3=1300+0{,}15(20-1300)=1108\,°C;$$

$$t_4=1300+0{,}38(20-1300)=814\,°C.$$

2.2.6. Cilindriskas formas siera gabalu ievieto saldēšanas kamerā, kur temperatūra ir $-10\,°C$. Siera temperatūra pirms saldēšanas bija 30 °C. Siltumatdeves koeficients kamerā $\alpha=8\,W/(m^2\cdot K)$. Sieram $\rho=1080\,kg/m^3$, $\lambda=0{,}35\,W/(m\cdot K)$, $c=2{,}440\,kJ/(kg\cdot K)$.

Noteikt temperatūras siera gabala punktos *1*, *2*, *3* un *4* (2.11. att.) pēc 2 stundām. Cilindra garums $L=300$ mm, diametrs $2r=100$ mm.



2.11. att. 2.2.6. uzdevumam.

Atrisinājums. Vispirms aprēķina temperatūras difūzijas (vadītspējas) koeficienta vērtību sieram:

$$a=\frac{\lambda}{\rho c}=\frac{0{,}35}{1080\cdot 2440}=1{,}33\cdot 10^{-7}\ \mathrm{m^2/s}.$$

Bezdimensionālās virstemperatūras punktiem *1* un *4* jāmeklē kā bezgalīgi gara cilindra ass un bezgalīgas plāksnes virsmas un vidusplakņu bezdimensionālo virstemperatūru reizinājums. Aprēķina atbilstošos līdzības skaitļus:

cilindram

$$\mathrm{Bi_c}=\frac{\alpha r}{\lambda}=\frac{8\cdot 0{,}05}{0{,}35}=1{,}14;$$

$$\mathrm{Fo_c}=\frac{a\tau}{r^2}=\frac{1{,}33\cdot 10^{-7}\cdot 2\cdot 3600}{0{,}05^2}=0{,}38;$$

plāksnei

$$\mathrm{Bi_p}=\frac{\alpha 0{,}5L}{\lambda}=\frac{8\cdot 0{,}5\cdot 0{,}3}{0{,}35}=3{,}43;$$

$$\mathrm{Fo_p}=\frac{a\tau}{(0{,}5L)^2}=\frac{1{,}33\cdot 10^{-7}\cdot 2\cdot 3600}{0{,}15^2}=0{,}043.$$

Bezdimensionālā temperatūra punktam *1* jāmeklē kā bezgalīgi gara cilindra ass un bezgalīgas plāksnes virsmas bezdimensionālo virstemperatūru reizinājums. Nomogrammā (sk. 2.8. att.) atrod, ka atbilstoši $\mathrm{Bi_c}$ un $\mathrm{Fo_c}$ uz cilindra ass

$$\theta_{1ca}=0{,}64.$$

Saskaņā ar $\mathrm{Bi_p}$ un $\mathrm{Fo_p}$ nomogrammā (sk. 2.6. att.) atrod, ka plāksnes virsmai

$$\theta_{1pv}=0{,}52.$$

Tad

$$\theta_1=\theta_{1ca}\theta_{1pv}=0{,}64\cdot 0{,}52=0{,}33.$$

Punktam *2* jāreizina cilindra un plāksnes virsmas bezdimensionālās temperatūras. Nomogrammā (sk. 2.9. att.) atrod

$$\theta_{2cv}=0{,}39,$$

bet 2.6. attēlā jau iepriekš atradām, ka

$$\theta_{2pv}=\theta_{1pv}=0{,}52.$$

Punktā *2* bezdimensionālā temperatūra

$$\theta_2=\theta_{2cv}\theta_{2pv}=0{,}39\cdot 0{,}52=0{,}20.$$

Punktam *3* bezdimensionālo virstemperatūru atrod kā cilindra virsmas un plāksnes vidus bezdimensionālo virstemperatūru reizinājumu. Nomogrammā (sk. 2.8. att.) jau iepriekš atradām

$$\theta_{3cv}=\theta_{2cv}=0{,}39.$$

2.7. attēlā atrod, ka plāksnes vidū

$$\theta_{3pc}=1{,}0.$$

Tad

$$\theta_3=\theta_{3cv}\theta_{3pc}=0{,}39\cdot 1{,}0=0{,}39.$$

Punktam *4*

$$\theta_4=\theta_{4ca}\theta_{4pc}=0{,}64\cdot 1{,}0=0{,}64,$$

jo

$$\theta_{4ca}=\theta_{1ca}\ \text{un}\ \theta_{4pc}=\theta_{3pc}.$$

Temperatūras atbilstošajos punktos aprēķina pēc izteiksmes (2.30):

$$t_i=t_s+\theta_i(t_0-t_s);$$
$$t_1=-10+0{,}33(30-(-10))=3{,}2\ ^\circ;$$
$$t_2=-10+0{,}20(30-(-10))=-2{,}0\ ^\circ\mathrm{C};$$
$$t_3=-10+0{,}39(30-(-10))=5{,}6\ ^\circ\mathrm{C};$$
$$t_4=-10+0{,}64(30-(-10))=15{,}6\ ^\circ\mathrm{C}.$$

2.2.7. Ar kādu ātrumu kvadrātiska šķērsgriezuma vara vads jāvelk caur 4 m garu krāsni, kurā temperatūra $t_s=900\ ^\circ\mathrm{C}$, lai vada vidū tā sasniegtu 400 °C. Cik liela temperatūra tad būs vada šķautnē (kvadrāta stūrī), ja vada temperatūra pirms ievietošanas krāsnī bija 15 °C, vada šķērsgriezums 12×12 mm? Varam $\lambda=380\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$, $a=1{,}05\cdot 10^{-4}\ \mathrm{m^2/s}$. Siltumatdeves koeficienta vērtība krāsnī $\alpha=95\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$.

Atrisinājums. Taisnstūrveida šķērsgriezuma bezgalīgi garā stienī ir divdimensiju temperatūras lauks. Tā kā šķērsgriezuma forma ir kvadrāts, tad bezdimensionālo virstemperatūru uz vada ass pēc karsēšanas var izteikt kā divu bezdimensionālo virstemperatūru plāksnes vidū reizinājumu:

$$\theta_a=\theta_{pc}\theta_{pc}=\theta_{pc}^2.$$

Saskaņā ar formulu (2.30) uz vada simetrijas-ass

$$\theta_a=\frac{t-t_s}{t_0-t_s}=\frac{400-900}{15-900}=0{,}56.$$

Tad bezdimensionālā virstemperatūra plāksnes vidū būs

$$\theta_{pc}=\sqrt{\theta_a}=\sqrt{0{,}56}=0{,}75.$$

Atrod plāksnei līdzības skaitli

$$\mathrm{Bi}=\frac{\alpha\delta}{\lambda}=\frac{95\cdot 0{,}006}{380}=1{,}5\cdot 10^{-3}.$$

Nomogrammā ([2.6] vai citur) atrod, ka atbilstoši θ_{pc} un Bi plāksnes vidū

$$\mathrm{Fo}=210.$$

No šejienes izrēķina laiku, kurš nepieciešams, lai uz vara vada ass iestātos 400 °C temperatūra:

$$\tau=\frac{\delta^2\mathrm{Fo}}{a}=\frac{0{,}006^2\cdot 210}{1{,}05\cdot 10^{-4}}=72\ \mathrm{s}.$$

Ātrums, ar kādu vads jāvelk caur krāsni,

$$w=\frac{l}{\tau}=\frac{4}{72}=0{,}056\ \mathrm{m/s}.$$

Bezdimensionālo virstemperatūru uz vada šķautnes $\theta_š$ atrod kā divu bezdimensionālo virstemperatūru plāksnes virsmai reizinājumu. Atkarībā no Bi un Fo nomogrammā (piemēram, [2.6]) atrod

$$\theta_{pv}=0{,}73.$$

Tad

$$\theta_š=\theta_{pv}^2=0{,}73^2=0{,}53$$

un temperatūra

$$t_š=t_s+\theta_š(t_0-t_š)=900+0{,}53(15-900)=431\ °\mathrm{C}.$$

2.2.8. Cik lielai jābūt siltumatdeves koeficienta vidējai vērtībai saldēšanas skapī, lai, atdzesējot kubveida sviesta gabalu, pēc 10 h tā centrā iestātos 0 °C temperatūra? Aprēķināt arī temperatūru kuba stūros.

Sviesta gabala izmēri 16×16×16 cm, $\lambda=0{,}2\ \mathrm{W/(m\cdot K)}$, $a=9{,}8\cdot 10^{-8}\ \mathrm{m^2/s}$. Sviesta temperatūra pirms ievietošanas saldēšanas kamerā 30 °C, temperatūra kamerā −20 °C.

Atrisinājums. Kubu var iedomāties izveidotu trīs bezgalīgu plākšņu krustošanās rezultātā. Plākšņu biezums dotajā gadījumā 16 cm.

Kubveida ķermenī ir trīsdimensiju temperatūras lauks. Bezdimensionālo virstemperatūru kuba centrā var izteikt kā trīs bezdimensionālo virstemperatūru plāksnes vidū reizinājumu:

$$\theta_c=\theta_{pc}\theta_{pc}\theta_{pc}=\theta_{pc}^3.$$

Saskaņā ar izteiksmi (2.30) kuba centrā

$$\theta_c=\frac{t_c-t_s}{t_0-t_s}=\frac{0-(-20)}{30-(-20)}=0{,}4.$$

Bezdimensionālai virstemperatūrai uz katras kubu veidojošās plāksnes vidus plaknes jābūt

$$\theta_{pc}=\sqrt[3]{\theta_c}=\sqrt[3]{0{,}4}=0{,}74.$$

Aprēķina kubu veidojošām plāksnēm Fo līdzības skaitli:

$$\mathrm{Fo}=\frac{a\tau}{\delta^2}=\frac{9{,}8\cdot 10^{-8}(10\cdot 3600)}{0{,}08^2}=0{,}55.$$

Pēc Fo un θ_{pc} nomogrammā plāksnes vidum (sk. 2.7. att.) atrod Bi līdzības skaitli:

$$\mathrm{Bi}=1{,}0.$$

Atceroties, ka

$$\mathrm{Bi}=\frac{\alpha\delta}{\lambda},$$

atrod

$$\alpha=\frac{\lambda\mathrm{Bi}}{\delta}=\frac{0{,}2\cdot 1{,}0}{0{,}08}=2{,}5\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Sviesta gabala stūrī bezdimensionālo virstemperatūru izsaka kā triju kubu veidojošo (iedomāto) plākšņu virsmu bezdimensionālo virstemperatūru risinājumu:

$$\theta_{st}=\theta_{pv}^3.$$

Zinot Bi un Fo, plāksnes virsmai nomogrammā (sk. 2.6. att.) atrod

$$\theta_{pv}=0{,}48.$$

Tad

$$\theta_{st}=\theta_{pv}^3=0{,}48^3=0{,}11$$

un temperatūra sviesta gabala stūrī 10 h pēc ievietošanas saldēšanas kamerā

$$t_{st}=t_s+\theta_{st}(t_0-t_s)=-20+0{,}11(30-(-20))=-14{,}5\ °\mathrm{C}.$$

2.2.9. Ar siltuma regulārā režīma metodi jānosaka cietas vielas temperatūras difūzijas koeficients a. Pētāmā materiāla ķermenim ir cilindriska forma ar $r=30$ mm un $L=80$ mm. Pēc uzsildīšanas cilindru ievieto ūdens termostatā, kurā tiek uzturēta nemainīga temperatūra $t_s=20\,°C$. Pēc regulārā režīma iestāšanās temperatūra cilindra vidū izmainījās no 45 °C līdz 24 °C 7 minūšu laikā.

Atrisinājums. Vispirms nosaka ķermeņa dzišanas tempu (izteiksme (2.37)):

$$m=\frac{\ln\vartheta_1-\ln\vartheta_2}{\tau_2-\tau_1}.$$

Šeit $\vartheta_1=t_1-t_s=45-20=25\,°C$;

$\vartheta_2=t_2-t_s=24-20=4\,°C$;

$\tau_2-\tau_1=7\text{ min}=420\text{ s}$.

Tad

$$m=\frac{\ln 25-\ln 4}{420}=4{,}36\cdot10^{-3}\text{ s}^{-1}.$$

Saskaņā ar formulu (2.41) cilindra formas koeficients

$$K=\frac{1}{\left(\frac{2{,}405}{r}\right)^2+\left(\frac{\pi}{L}\right)^2}=$$

$$=\frac{1}{\left(\frac{2{,}405}{0{,}03}\right)^2+\left(\frac{3{,}14}{0{,}08}\right)^2}=1{,}26\cdot10^{-4}\text{ m}^2.$$

Temperatūras difūzijas (vadītspējas) koeficientu aprēķina pēc vienādojuma (2.42):

$$a=Km=1{,}26\cdot10^{-4}\cdot4{,}36\cdot10^{-3}=5{,}49\cdot10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}.$$

2.3. EKSPERIMENTĀLO DATU APSTRĀDE AR LĪDZĪBAS TEORIJAS METODĒM

Biežāk lietojamie līdzības skaitļi — kritēriji doti 2.5. tabulā. Kanāla šķērsgriezuma ekvivalentais diametrs

$$d_e=\frac{4S}{U}, \tag{2.43}$$

kur S — kanāla šķērsgriezums, U — perimetrs.

2.5. tabula

Siltumapmaiņas procesos biežāk lietojamie līdzības skaitļi un kritēriji

Kritērijs	Apzīmējums	Nosaukums un īss raksturojums
$\frac{wl}{\nu}$	Re	Reinoldsa skaitlis — raksturo plūsmas režīmu
$\frac{\Delta p}{\varrho w^2}$	Eu	Eilera skaitlis — raksturo spiediena lauku līdzību
$\frac{gl^3}{\nu^2}$	Ga	Galileja skaitlis — brīvās plūsmas līdzības kritērijs
$\frac{wl}{a}=\text{RePr}$	Pe	Peklē skaitlis — izsaka siltumu līdzību
$\frac{\nu}{a}=\frac{\text{Pe}}{\text{Re}}$	Pr	Prandtla skaitlis — temperatūras un ātruma lauku līdzības kritērijs
$\frac{a\tau}{l^2}$	Fo	Furjē skaitlis — raksturo temperatūras lauka izmaiņas ātrumu
$\frac{\alpha l}{\lambda}$	Nu	Nuselta kritērijs — bezdimensionālais siltumatdeves koeficients
$\frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}$	Gr	Grashofa skaitlis — raksturo kinemātisko līdzību brīvajā konvekcijā
$\frac{\alpha l}{\lambda_\text{r}}$	Bi	Bio kritērijs — raksturo siltumatdevi uz ķermeņa robežvirsmas

Aprēķinu piemēri

2.3.1. Lai izpētītu cilindriska cauruļvada hidraulisko pretestību un ātruma lauku laboratorijas apstākļos, izgatavots cauruļvada modelis ar iekšējo diametru $d_m=45$ mm, kas ir 30 reižu mazāks nekā dotā cauruļvada diametrs. Cauruļvads paredzēts dūmgāzu transportēšanai ar ātrumu $w_d=8$ m/s. Dūmgāzu kinemātiskais viskozitātes koeficients 500 °C temperatūrā ir $\nu_d=76{,}3\cdot10^{-6}$ m²/s. Aprēķināt, ar kādu ātrumu jāsūknē modelī ūdens 20 °C temperatūrā, lai ātruma lauks modelī atbilstu ātruma laukam dūmgāzu caurulē.

Atrisinājums. No 2.10. tabulas atrod, ka ūdenim $\nu=1\cdot10^{-6}$ m²/s. Hidrodinamiskā līdzība izpildās ar nosacījumu, ka $\text{Re}_d=\text{Re}_m$, t. i., Reinoldsa skaitļi ir vienādi.

Dotajam darba režīmam dūmvadā

$$\text{Re}_d=\frac{w_d d}{\nu_d}=\frac{8(0{,}045\cdot30)}{76{,}3\cdot10^{-6}}=1{,}42\cdot10^5.$$

No izteiksmes $Re_m=\frac{w_m d_m}{\nu_m}$ atrod nepieciešamo ūdens ātrumu modeļa cauruļvadā:

$$w_m=\frac{Re_m\nu_m}{d_m}=\frac{1{,}42\cdot10^5\cdot1\cdot10^{-6}}{0{,}045}=3{,}16\ \text{m/s}.$$

2.3.2. Ūdens sildītāja cauruļu kūli apskalo ūdens, kura vidējais ātrums $w_k=0{,}55$ m/s un temperatūra 60 °C. Lai noteiktu ūdens sildītāja hidraulisko pretestību, izgatavots 2,5 reizes mazāks modelis, kura cauruļu kūli apskalo gaiss 20 °C temperatūrā zem 0,1013 MPa spiediena. Spiediena kritums modelī (eksperimentāli noteikts) $\Delta p_m=2{,}7$ kPa.

Aprēķināt gaisa vidējo ātrumu modelī un ūdens sildītāja hidraulisko pretestību.

Atrisinājums. Gaisa vidējo ātrumu modelī var aprēķināt, izmantojot nosacījumu, ka Reinoldsa skaitļiem sildītāja cauruļu kūlī un modelī jābūt vienādiem, t. i.,

$$Re_k=Re_m$$

vai

$$\frac{w_k l_k}{\nu_k}=\frac{w_m l_m}{\nu_m}$$

Pēc uzdevuma nosacījumiem

$$l_k=2{,}5\ l_m,$$

tāpēc

$$w_m=\frac{\nu_m l_k}{\nu_k l_m}w_k=2{,}5\frac{\nu_m}{\nu_k}w_k=$$

$$=2{,}5\cdot\frac{15{,}06\cdot10^{-6}}{0{,}479\cdot10^{-6}}\cdot0{,}55=43{,}2\ \text{m/s}.$$

Kinemātiskās viskozitātes koeficienta vērtības ūdenim un gaisam var atrast atbilstoši 2.10. un 2.12. tabulā.

Sildītāja hidraulisko pretestību aprēķina, pielīdzinot Eilera līdzības skaitļus modelim un sildītājam:

$$Eu_k=Eu_m$$

vai

$$\frac{\Delta p_k}{\rho_k w_k^2}=\frac{\Delta p_m}{\rho_m w_m^2},$$

no kurienes

$$\Delta p_k=\frac{\rho_k}{\rho_m}\left(\frac{w_k}{w_m}\right)^2\Delta p_m=\frac{983{,}2}{1{,}205}\left(\frac{0{,}55}{43{,}2}\right)^2 2700=357\ \text{Pa}.$$

Ūdens un gaisa blīvumu atrod 2.10. un 2.12. tabulā.

2.3.3. Paredzēts noteikt garas cilindriskas tērauda vārpstas temperatūras lauku 3 h pēc ievietošanas krāsnī. Vārpstas diametrs ir 500 mm. Vārpstas materiālam $\lambda_v=45{,}7$ W/(m·K); $a_v=10{,}3\cdot10^{-6}$ m²/s. Siltumatdeves koeficienta vērtība krāsnī $\alpha_v=100$ W/(m²·K).

Temperatūras lauka pētīšanai izmanto karstumizturīgā tērauda 1X18H9T modeli ar mazāku diametru. Aprēķināt nepieciešamo cilindra modeļa diametru d_m un laika sprīdi pēc modeļa ievietošanas krāsnī τ_m, kad jāsāk mērīt modeļa temperatūras lauku, ja siltumatdeves koeficienta vērtība no krāsns uz modeli $\alpha_m=175$ W/(m²·K). Modeļa tēraudam $\lambda_m=23{,}8$ W/(m·K); $\rho_m=7900$ kg/m³; $c_m=0{,}50$ kJ/(kg·K).

Atrisinājums. Modeļa stieņa diametru atrod, izmantojot nosacījumu $Bi_v=Bi_m$.

Vārpstai

$$Bi_v=\frac{\alpha_v r_v}{\lambda_v}=\frac{100\cdot0{,}250}{45{,}7}=0{,}547.$$

Zinot, ka

$$Bi_m=\frac{\alpha_m r_m}{\lambda_m},$$

atrod

$$r_m=\frac{Bi_m\lambda_m}{\alpha_m}=\frac{0{,}547\cdot23{,}8}{175}=0{,}074\ \text{m}$$

vai

$$d_m=2r_m=148\ \text{mm}.$$

Laiku τ_m atrod, zinot, ka abiem stieņiem temperatūras lauku līdzība iestājas, ja $Fo_v=Fo_m$. Vārpstai

$$Fo_v=\frac{a_v\tau_v}{r_v^2}=\frac{10{,}3\cdot10^{-6}\cdot3\cdot3600}{0{,}25^2}=1{,}78.$$

No izteiksmes

$$Fo_m=\frac{a_m\tau_m}{r_m^2}$$

atrod

$$\tau_m=\frac{r_m^2 Fo_m}{a_m}=\frac{0{,}074^2\cdot1{,}78}{6{,}03\cdot10^{-6}}=1616\ \text{s}=27\ \text{min}.$$

Temperatūras difūzijas koeficienta vērtību atrod iepriekš pēc izteiksmes (2.33):

$$a_m=\frac{\lambda_m}{c_m\rho_m}=\frac{23{,}8}{0{,}50\cdot10^3\cdot7900}=6{,}03\cdot10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}.$$

2.3.4. Atrast vispārinātu siltumatdeves koeficienta aprēķināšanas formulu siltumnesēja plūsmai vītņveida caurulē, izmantojot eksperimentālos datus.

Eksperimentāli noteiktās siltumatdeves koeficienta α vidējās vērtības siltumnesēja (šajā gadījumā ūdens) dažādiem plūsmas ātrumiem dotas 2.6. tabulā.

2.6. tabula

Eksperimentālie dati 2.3.4. uzdevumam

Mēģinājuma №	Siltumnesēja			α (W/(m² · K))
	ātrums w (m/s)	temperatūras (°C)		
		t_s	t_v	
1	0,1637	15,22	23,50	2020
2	0,322	14,20	24,00	2880
3	0,878	11,60	19,75	4890
4	1,437	11,22	20,60	8100
5	2,000	10,60	17,92	10950

Caurules ekvivalentais diametrs $d_e = 13{,}92$ mm.

Atrisinājums. Aprēķina formula jāmeklē līdzības kritēriju formā. Līdzības teorija pierāda, ka šādas formulas struktūra ir

$$\mathrm{Nu} = C\,\mathrm{Re}^n\,\mathrm{Pr_s}^m \left(\frac{\mathrm{Pr_s}}{\mathrm{Pr_v}}\right)^p. \tag{2.44}$$

Daudzu pētījumu rezultātā atrasts, ka $m=0{,}43$ un $p=0{,}25$. Izmantojot eksperimentālo datu tabulu, nosaka C un n skaitliskās vērtības. Tad iegūto aprēķina izteiksmi var izmantot, lai aprēķinātu siltumatdevi jebkura izmēra ģeometriski līdzīgās caurulēs ar dažādiem siltumnesējiem zināmā plūsmas ātruma režīmu diapazonā.

Katram mēģinājuma punktam no tabulām atrod: kinemātiskā viskozitātes koeficienta ν un siltumvadītspējas koeficienta λ vērtības ūdenim, Prandtla līdzības skaitļa vērtības ūdens vidējā temperatūrā $\mathrm{Pr_s}$ un caurules virsmas temperatūrā $\mathrm{Pr_v}$. Atgādināsim, ka attiecība $\mathrm{Pr_s}/\mathrm{Pr_v}$ ņem vērā siltuma plūsmas blīvuma un virziena ietekmi uz siltumatdevi.

Atbilstoši aprēķina katrā punktā:

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha d_e}{\lambda}; \quad \mathrm{Re} = \frac{w d_e}{\nu}.$$

Tabulās atrastās vērtības un aprēķinu rezultāti apkopoti 2.7. tabulā. Aprēķina piemērs dots 1. mēģinājumam.

$$\mathrm{Nu} = \frac{\alpha d_e}{\lambda} = \frac{2020 \cdot 0{,}01392}{0{,}587} = 47{,}9;$$

$$\mathrm{Re} = \frac{w d_e}{\nu} = \frac{0{,}1637 \cdot 0{,}01392}{1{,}133 \cdot 10^{-6}} = 2010.$$

2.7. tabula

Dati 2.3.4. uzdevumam

Mēģinājuma №	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	λ (W/(m · K))	$\mathrm{Pr_s}$	$\mathrm{Pr_v}$	Nu	Re	K
1	1,138	0,587	8,22	6,55	47,9	2010	18,29
2	1,170	0,5845	8,47	6,48	68,6	3830	25,60
3	1,257	0,578	9,12	7,08	117,8	9750	42,74
4	1,271	0,577	9,22	6,94	195,4	15 730	70,02
5	1,291	0,5755	9,37	7,54	264,9	21 600	95,86

Pārveido izteiksmi (2.44):

$$C\,\mathrm{Re}^n = \mathrm{Nu}\,\mathrm{Pr_s}^{-0,43}\left(\frac{\mathrm{Pr_s}}{\mathrm{Pr_v}}\right)^{-0,25}. \tag{2.45}$$

Apzīmē

$$C\,\mathrm{Re}^n = K.$$

Izmantojot vienādojumu (2.45), atrod K vērtības visiem mēģinājumiem un rezultātus ieraksta 2.7. tabulā. 2. mēģinājumam

$$K = \mathrm{Nu}\,\mathrm{Pr_s}^{-0,43}\left(\frac{\mathrm{Pr_s}}{\mathrm{Pr_v}}\right)^{-0,25} =$$

$$= 68{,}6 \cdot 8{,}47^{-0,43}\left(\frac{8{,}47}{6{,}48}\right)^{-0,25} = 25{,}6.$$

Šai pakāpju funkcijai jāatrod C un n vērtības. Kā zināms, pakāpju funkcija logaritmiskajā koordinātu sistēmā attēlojas ar taisni:

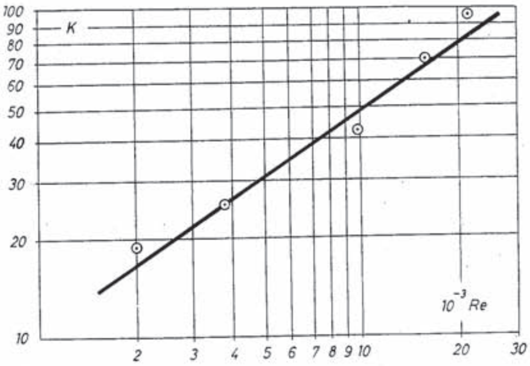
$$\lg K = \lg C + n \lg \mathrm{Re}.$$

Atcerēsimies, ka taisnes vispārīgais vienādojums ir

$$y = b + ax.$$

Mūsu gadījumā $y = \lg K$; $b = \lg C$; $a = n$ un $x = \lg \mathrm{Re}$.

Eksperimenta kļūdu dēļ iegūtie punkti (ar koordinātēm $\lg K$, $\lg \mathrm{Re}$) neatrodas precīzi uz taisnes (2.12. att.). Caur šiem punktiem taisni var novilkt ar dažādām metodēm. Viena no precīzākajām ir mazāko kvadrātu metode. Ja pieejami elektroniskie skaitļotāji, taisnes vienādojuma koeficientu a un b (resp. n un $\lg C$) vērtību aprēķinam var izmantot standartprogrammas. Pretējā gadījumā jālieto mikrokalkulatori. Paskaidrosim aprēķinu gaitu.



2.12. att. 2.3.4. uzdevumam.

Koeficientu a un b vērtības atrod no vienādojumu sistēmas

$$\left.\begin{aligned} a\sum_{k=1}^{n} x_k^2 + b\sum_{k=1}^{n} x_k &= \sum_{k=1}^{n} x_k y_k;\\ a\sum_{k=1}^{n} x_k + bn &= \sum_{k=1}^{n} y_k, \end{aligned}\right\} \qquad (2.46)$$

kur $n=5$ — mēģinājumā iegūto punktu skaits.

Ērtākai skaitļošanai ieteicams izmantot 2.8. tabulu.

2.8. tabula

Taisnes vienādojuma koeficientu aprēķins

Mēģinājuma №	x (lg Re)	y (lg K)	x^2	xy
1	3,303 20	1,262 21	10,9111	4,169 33
2	3,583 20	1,408 24	12,8393	5,046 00
3	3,989 00	1,630 83	15,9121	6,505 38
4	4,196 73	1,845 22	17,6125	7,743 89
5	4,334 45	1,981 64	18,7874	8,589 32
Σ	19,406 58	8,128 14	76,0624	32,053 92

Ievietojot atrastos 2.8. tabulas lielumus vienādojumu sistēmā (2.46), iegūst:

$$\left.\begin{aligned} 76{,}0624a + 19{,}406\,58b &= 32{,}053\,92;\\ 19{,}406\,58a + 5b &= 8{,}128\,14. \end{aligned}\right\}$$

No šejienes atrod, ka

$$a = 0{,}684\,45; \quad b = -1{,}030\,93.$$

Taisnes vienādojums logaritmiskajās koordinātēs:

$$y = 0{,}684\,45x - 1{,}030\,93.$$

Pārejot uz sākuma apzīmējumiem,

$$\lg K = 0{,}684\,45 \lg \mathrm{Re} - 1{,}030\,93.$$

Potencējot un noapaļojot iegūst meklēto aprēķina vienādojumu

$$K = 0{,}0093\,\mathrm{Re}^{0{,}684}$$

vai, ņemot vērā izteiksmes (2.45) un (2.46),

$$\mathrm{Nu} = 0{,}093\,\mathrm{Re}^{0{,}684}\,\mathrm{Pr_s}^{0{,}43}\left(\frac{\mathrm{Pr_s}}{\mathrm{Pr_v}}\right)^{0{,}25}.$$

2.4. SILTUMATDEVE BRĪVĀ KONVEKCIJĀ

Aprēķinu izteiksmes

Brīvās konvekcijas siltumatdeves aprēķina pamatformula:

$$\mathrm{Nu} = C(\mathrm{Gr\,Pr_s})^n(\mathrm{Pr_s/Pr_v})^{0{,}25}. \qquad (2.47)$$

2.9. tabula

Koeficienta C un pakāpes rādītāja n vērtības izteiksmē (2.47)

Siltumatdeves apstākļi	C	n
Vertikālai sienai un caurulei:		
1) lamināram robežslānim $10^3 \leqslant \mathrm{GrPr} \leqslant 10^9$, ja		
$\mathrm{Pr}=0{,}1$	0,389	0,25
$\mathrm{Pr}=1{,}0$	0,535	0,25
$\mathrm{Pr}=10$	0,616	0,25
$\mathrm{Pr}=100$	0,655	0,25
2) turbulentam robežslānim $10^9 \leqslant \mathrm{GrPr} \leqslant 10^{13}$	0,15	0,33
Horizontālai caurulei:		
$10^{-3} \leqslant \mathrm{GrPr} \leqslant 10^3$	1,18	0,125
$10^3 \leqslant \mathrm{GrPr} \leqslant 10^8$	0,5	0,25

Līdzības skaitļos par raksturīgo izmēru pieņem: vertikālām virsmām — augstumu, bet horizontālām caurulēm — diametru. Gr skaitlī

$$\Delta t = t_v - t_s.$$

Fizikālo parametru λ, ν, a un β vērtības jāizvēlas vidējai robežslāņa temperatūrai

$$\bar{t} = 0{,}5\,(t_v + t_s).$$

Siltumatdeve vertikālām virsmām, ja $\mathrm{Gr\,Pr} > 10^9$:

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_l \frac{h_x}{h} + \bar{\alpha}_t \left(1 - \frac{h_x}{h}\right), \tag{2.48}$$

kur $\bar{\alpha}_l$ — siltumatdeves koeficienta vidējā vērtība apakšējai virsmas daļai (laminārs režīms),

$\bar{\alpha}_t$ — augšējai virsmas daļai (turbulents režīms).

2.10. tabula

Ūdens īpašības uz piesātinājuma līknes (šeit piesātinājuma līkne sākas no 100 °C)

t (°C)	p (MPa)	ϱ' (kg/m³)	$\beta \cdot 10^4$ (1/K)	c_p (kJ/(kg · K))	λ (W/(m · K))	$\mu \cdot 10^6$ (Pa · s)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
0	0,1013	999,8	−0,7	4,217	0,551	1788	1,790	13,7
10	0,1013	999,6	0,95	4,192	0,574	1305	1,300	9,5
20	0,1013	998,2	2,1	4,182	0,599	1004	1,000	7,0
30	0,1013	995,6	3,0	4,178	0,618	801	0,805	5,4
40	0,1013	992,2	3,9	4,178	0,634	653	0,659	4,3
60	0,1013	983,2	5,3	4,184	0,659	470	0,479	3,0
80	0,1013	971,8	6,3	4,196	0,675	355	0,366	2,25
100	0,1013	958,3	7,5	4,216	0,683	282	0,295	1,75
120	0,1985	943,1	8,5	4,250	0,686	237	0,244	1,43
140	0,3614	926,1	9,7	4,287	0,685	201	0,212	1,23
160	0,6180	907,4	10,8	4,346	0,683	174	0,191	1,10
180	1,003	886,9	12,1	4,417	0,675	153	0,173	1,01
200	1,555	864,7	13,5	4,505	0,663	136	0,160	0,95
220	2,320	840,3	15,2	4,614	0,645	125	0,149	0,90
240	3,348	813,6	17,2	4,756	0,628	115	0,141	0,86
260	4,694	784,0	20,0	4,949	0,605	106	0,135	0,86
280	6,419	750,7	23,8	5,230	0,575	98,1	0,131	0,89
300	8,592	712,5	29,5	5,736	0,540	91,2	0,128	0,98
320	11,29	667,1	38,0	6,574	0,494	85,3	0,128	1,13
340	14,61	609,4	47,5	8,165	0,437	77,5	0,127	1,45
360	18,67	524,0	—	13,984	0,356	66,7	0,127	1,91
370	21,05	448,0	—	40,321	0,293	56,9	0,127	2,18

2.11. tabula

Sausa piesātināta ūdens tvaika īpašības

t (°C)	p (MPa)	ϱ'' (kg/m³)	c_p (kJ/(kg · K))	r (kJ/kg)	λ $\nu \cdot 10^2$ (W/(m · K))	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
100	0,1013	0,598	2,135	2257	2,37	20,02	1,08
120	0,1985	1,121	2,206	2203	2,59	11,46	1,09
140	0,3614	1,966	2,315	2145	2,79	6,89	1,12
160	0,6180	3,258	2,479	2082	3,01	4,39	1,18
180	1,003	5,157	2,709	2014	3,27	2,93	1,25
200	1,555	7,862	3,023	1939	3,55	2,03	1,36
220	2,320	11,62	3,408	1856	3,90	1,45	1,47
240	3,348	16,76	3,881	1764	4,29	1,06	1,61
260	4,694	23,72	4,468	1660	4,80	0,794	1,75
280	6,419	33,19	5,234	1542	5,49	0,600	1,90
300	8,592	46,21	6,280	1403	6,27	0,461	2,13
320	11,29	64,72	8,206	1236	7,51	0,353	2,50
340	14,61	92,76	12,35	1025	9,30	0,272	3,35
360	18,67	144,0	23,03	723	12,79	0,202	5,23
370	21,05	203,0	56,52	440	17,10	0,166	11,10

2.12. tabula

Sausa gaisa īpašības 0,1013 MPa spiedienā

t (°C)	ϱ (kg/m³)	c_p (kJ/(kg · K))	$\lambda \cdot 10^2$ (W/(m · K))	$\mu \cdot 10^6$ (Pa · s)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
−30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	0,723
−20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	0,716
−10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	0,699
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	0,696
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	0,692
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	0,688
150	0,830	1,015	3,57	24,1	28,95	0,683
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	0,677
300	0,566	1,047	4,60	29,7	48,33	0,674

2.13. tabula

Dūmgāzu īpašības 0,1013 MPa spiedienā (dūmgāzu sastāvs: $r_{CO_2}=0{,}13$; $r_{H_2O}=0{,}11$; $r_{N_2}=0{,}76$, kur r — komponenta saturs tilpuma daļās)

t (°C)	ϱ (kg/m³)	c_p (kJ/(kg · K))	$\lambda \cdot 10^2$ (W/(m · K))	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
100	0,950	1,068	3,13	21,54	0,69
200	0,748	1,097	4,01	32,80	0,67
300	0,617	1,122	4,84	45,81	0,65
400	0,525	1,151	5,70	60,38	0,64
500	0,457	1,185	6,56	76,30	0,63
600	0,405	1,214	7,42	93,61	0,62
700	0,363	1,239	8,27	112,1	0,61
800	0,330	1,264	9,15	131,8	0,60
1000	0,275	1,306	10,90	174,3	0,58
1200	0,240	1,340	12,62	221,0	0,56

2.14. tabula

Transformatoru eļļas īpašības atkarībā no temperatūras

t (°C)	ϱ (kg/m³)	$\beta \cdot 10^4$ (1/K)	c_p (kJ/(kg · K))	λ (W/(m · K))	$\mu \cdot 10^4$ (Pa · s)	$\nu \cdot 10^6$ (m²/s)	Pr
0	892,5	6,80	1,55	0,112	629,8	70,5	866
10	886,4	6,85	1,61	0,111	335,5	37,9	484
20	880,3	6,90	1,67	0,111	198,2	22,5	298
30	874,2	6,95	1,73	0,110	128,5	14,7	202
40	868,2	7,00	1,79	0,109	89,4	10,3	146
50	862,1	7,05	1,85	0,108	65,3	7,58	111
60	856,0	7,10	1,90	0,107	49,5	5,78	87,8
80	843,9	7,20	2,03	0,106	30,8	3,66	59,3
100	831,8	7,30	2,14	0,104	21,3	2,56	43,9
120	819,6	7,40	2,26	0,102	15,7	1,92	34,9

Laminārā slāņa augstumu h_x atrod no izteiksmes

$$\mathrm{Gr\,Pr}=\frac{g\beta\Delta t h_x^3}{\nu^2}\mathrm{Pr}=10^9. \tag{2.49}$$

Tilpuma izplešanās koeficients ideālai gāzei

$$\beta=\frac{1}{T} \tag{2.50}$$

Slēgtās spraugās, ja platuma δ attiecība pret augstumu h ir $0{,}05\ldots1{,}0$, $\mathrm{Gr\,Pr}=10^3\ldots10^7$ un $\mathrm{Pr}=1\ldots1000$, tad

$$\mathrm{Nu}=\frac{\alpha\delta}{\lambda}=0{,}28\left(\mathrm{Gr\,Pr}\frac{\delta}{h}\right)^{0{,}25}. \tag{2.51}$$

Aprēķinu piemēri

2.4.1. Aprēķināt siltumatdeves koeficienta vērtību un siltuma plūsmu no neizolētas horizontālas tvaika caurules virsmas, kuras ārējais diametrs ir 250 mm, virsmas temperatūra 270 °C, bet gaisa temperatūra apkārtējā telpā 30 °C. Caurules garums ir 3 m.

Atrisinājums. Aprēķinam jāizmanto izteiksme (2.47). No 2.12. tabulas atrod gaisa fizikālos parametrus vidējā temperatūrā $\bar{t}=0{,}5(t_v+t_s)=0{,}5(270+30)=150$ °C:

$$\lambda=0{,}0357\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \nu=28{,}95\cdot10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};\quad \mathrm{Pr_s}=0{,}683.$$

Aprēķina tilpuma izplešanās koeficienta vērtību (formula (2.50)):

$$\beta=\frac{1}{T}=\frac{1}{150+273}=2{,}36\cdot10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}.$$

Aprēķina Grashofa līdzības skaitli (2.5. tab.):

$$\mathrm{Gr}=\frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot0{,}25^3\cdot2{,}36\cdot10^{-3}(270-30)}{(28{,}95\cdot10^{-6})^2}=$$
$$=1{,}036\cdot10^8.$$

Tā kā $\mathrm{Gr\,Pr}=1{,}036\cdot10^8\cdot0{,}683=0{,}708\cdot10^8$, tad saskaņā ar 2.9. tabulu izteiksmē (2.47) $C=0{,}5$ un $n=0{,}25$.

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}5(\mathrm{Gr\,Pr_s})^{0{,}25}=0{,}5(0{,}708\cdot10^8)^{0{,}25}=45{,}9.$$

Gāzēm Pr maz mainās atkarībā no temperatūras, tāpēc nav jāievied labojums attiecībā uz siltuma plūsmas virzienu ($\mathrm{Pr_s}/\mathrm{Pr_v}$).

Zinot (2.5. tab.), ka

$$\mathrm{Nu}=\frac{\alpha d}{\lambda},$$

atrod

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{0{,}0357\cdot45{,}9}{0{,}25}=6{,}5\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$$

un

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_v-t_s)=6{,}5\pi0{,}25\cdot3(270-30)=3675\ \mathrm{W}.$$

2.4.2. Atrisināt 2.4.1. uzdevumu gadījumā, ja caurule novietota vertikāli.

Atrisinājums. Aprēķina Gr līdzības skaitli:

$$\mathrm{Gr}=\frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot3^3\cdot2{,}36\cdot10^{-3}(270-30)}{(28{,}95\cdot10^{-6})^2}=17{,}9\cdot10^{10}.$$

Tā kā $\mathrm{Gr\,Pr}=17{,}9\cdot10^{10}\cdot0{,}683=12{,}2\cdot10^{10}$, tad siltumatdeves koeficientu aprēķina pēc formulas (2.48). Iepriekš atrod laminārā slāņa augstumu h_x no izteiksmes (2.49):

$$h_x=\sqrt[3]{\frac{10^9\nu^2}{g\beta\Delta t\,\mathrm{Pr}}}=\sqrt[3]{\frac{10^9(28{,}95\cdot10^{-6})^2}{9{,}81\cdot2{,}36\cdot10^{-3}\cdot240\cdot0{,}683}}=0{,}6\ \mathrm{m}.$$

Vertikālās caurules apakšējā daļā augstumā h_x gar virsmu ir lamināra plūsma. Šajā joslā siltumatdeves koeficientu saskaņā ar 2.9. tabulu atrod pēc formulas

$$\overline{\mathrm{Nu}}_l=0{,}535(\mathrm{Gr}_l\,\mathrm{Pr_s})^{0{,}25}=0{,}535(10^9)^{0{,}25}=95{,}1.$$

Šeit $(\mathrm{Gr\,Pr_s})=10^9$, jo šādam nosacījumam tika aprēķināts h_x (laminārais režīms pāriet turbulentajā).

Caurules laminārā režīma joslā

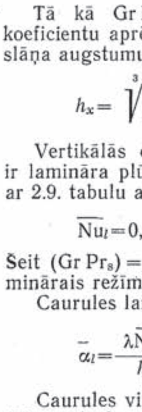
$$\bar\alpha_l=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}_l}{h_x}=\frac{0{,}0357\cdot95{,}1}{0{,}6}=5{,}66\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Caurules virsmas augšējai daļai ar turbulento plūsmas režīmu jāizmanto formula (sk. 2.9. tab.)

$$\overline{\mathrm{Nu}}_t=0{,}15(\mathrm{Gr_t\,Pr_s})^{0{,}33}=0{,}15(12{,}2\cdot10^{10})^{0{,}33}=683.$$

No šejienes

$$\bar\alpha_t=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}_t}{h}=\frac{0{,}0357\cdot683}{3}=8{,}13\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$



2.13. att. 2.4.3. uzdevumam.

Aprēķinot Gr_t un $\bar\alpha_t$, par raksturīgo izmēru izmantots pilnais caurules augstums, jo plūsmas attīstība notiek arī laminārajā joslā.

Siltumatdeves koeficienta vidējo vērtību var aprēķināt pēc vienādojuma (2.48):

$$\bar\alpha=\bar\alpha_l\frac{h_x}{h}+\bar\alpha_t\left(1-\frac{h_x}{h}\right)=5{,}66\cdot\frac{0{,}6}{3}+8{,}13\left(1-\frac{0{,}6}{3}\right)=7{,}64\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Siltuma plūsma no vertikālās caurules

$$\Phi=\bar\alpha S(t_v-t_s)=7{,}64\pi0{,}25\cdot3\cdot240=4318\ \mathrm{W}.$$

2.4.3. Aprēķināt brīvas konvekcijas veida siltuma plūsmas blīvumu slēgtā spraugā, kuru veido dubultlogu stikli, ja stiklu virsmu temperatūras ir $t_{v1}=15$ °C un $t_{v2}=-5$ °C (2.13. att.). Spraugas platums $\delta=12$ cm, augstums $h=80$ cm.

Atrisinājums. Siltumatdeves aprēķinam izmanto izteiksmi (2.51). Vispirms atrod Grashofa skaitli:

$$\mathrm{Gr}=\frac{gl^3\beta\Delta t}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot0{,}12^3\cdot3{,}60\cdot10^{-3}\cdot20}{(13{,}77\cdot10^{-6})^2}=6{,}44\cdot10^6.$$

Gaisa fizikālos parametrus meklē 2.12. tabulā vidējā temperatūrā $\bar t=0{,}5(t_{v1}+t_{v2})=0{,}5[15+(-5)]=5$ °C:

$$\lambda=0{,}0248\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \nu=13{,}77\cdot10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};\quad \mathrm{Pr}=0{,}706;$$

$$\beta=\frac{1}{T}=\frac{1}{273+5}=3{,}60\cdot10^{-3}\ \mathrm{K^{-1}}.$$

Par raksturīgo izmēru Gr skaitļa izteiksmē jāizmanto spraugas platums δ un temperatūru diference

$$\Delta t=t_{v1}-t_{v2}=15-(-5)=20\ ^\circ\mathrm{C}.$$

$$\mathrm{Nu}=0{,}28\left(\mathrm{Gr\,Pr}\frac{\delta}{h}\right)^{0{,}25}=0{,}28\left(6{,}44\cdot10^6\cdot0{,}706\cdot\frac{0{,}12}{0{,}80}\right)^{0{,}25}=8{,}05.$$

$$\alpha=\frac{\lambda\mathrm{Nu}}{\delta}=\frac{0{,}0248\cdot8{,}05}{0{,}12}=1{,}66\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

$$q=\alpha(t_{v1}-t_{v2})=1{,}66\cdot20=33{,}2\ \mathrm{W/m^2}.$$

2.5. SILTUMATDEVE PIESPIEDU KONVEKCIJĀ

Aprēķinu izteiksmes

Laminārai plūsmai gar plakanu virsmu:

1) lokālās siltumatdeves gadījumā

$$\mathrm{Nu}_x=0{,}332\,\mathrm{Re}_x^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}^{0{,}33}; \qquad (2.52)$$

2) vidējās siltumatdeves gadījumā

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}664\,\mathrm{Re}^{0{,}5}\,\mathrm{Pr}^{0{,}33}. \qquad (2.53)$$

Šeit raksturīgais izmērs ir plāksnes garums plūsmas virzienā.

Turbulentai plūsmai gar plakanu virsmu

$$\mathrm{Nu}=C\,\mathrm{Re}^{0{,}80}\,\mathrm{Pr_s}^{0{,}43}(\mathrm{Pr_s/Pr_v})^{0{,}25}. \qquad (2.54)$$

Šajās izteiksmēs plūsmas režīms uzskatāms par turbulentu, ja $\mathrm{Re}>5\cdot10^5$.

Aprēķinot lokālo siltumatdevi, $C=0{,}0296$, bet vidējai siltumatdevei $C=0{,}037$. Gāzēm $\mathrm{Pr_s/Pr_v}\approx1$. Par raksturīgo izmēru lokālai siltumatdevei jāizmanto attālums no plāksnes priekšējās malas. $\mathrm{Pr_s}$, ν, λ un a vērtības izvēlas plūsmas vidējā temperatūrā, $\mathrm{Pr_v}$ — sienas virsmas temperatūrā.

Laminārai plūsmai caurulēs

$$\overline{\mathrm{Nu}}=1{,}6\left(\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\right)^{1/3}\psi, \tag{2.55}$$

kur $\psi=(\mu_s/\mu_v)^{0{,}14}$. (2.56)

Šeit μ_s un μ_v jāizvēlas atbilstoši siltumnesēja un virsmas temperatūrā.

Ja $\mathrm{Pe}\frac{d}{l}<12$, tad $\mathrm{Nu}\approx 3{,}66=\mathrm{const}$.

λ un a vērtības jāizvēlas robežslāņa temperatūrā, ko tuvināti atrod šādi:

$$t_r=t_v\pm 0{,}5\,(t_v-t_s). \tag{2.57}$$

Zīme «+» jāliek, ja šķidrumu dzesē, «−», ja to karsē.

Turbulentai plūsmai caurulēs ($\mathrm{Re}>10^4$)

$$\overline{\mathrm{Nu}}=C\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr}_s^{0{,}4}(\mu_s/\mu_v)^n. \tag{2.58}$$

Šeit $C=0{,}021$, ja $0{,}7\leqslant\mathrm{Pr}\leqslant 1$, un
$C=0{,}023$, ja $2{,}0\leqslant\mathrm{Pr}\leqslant 150$.

Siltumnesēja sildīšanas gadījumā $n=0{,}11$, bet dzesējot $n=0{,}25$.

Siltumnesēja fizikālo parametru vērtības formulā (2.58) jāizvēlas plūsmas vidējā temperatūrā, izņemot μ_v, kurš jāizvēlas sienas virsmas temperatūrā.

Jauktam režīmam:

1) vertikālā caurulē, ja piespiedu un brīvās konvekcijas virzieni sakrīt,

$$\overline{\mathrm{Nu}}_v=0{,}35\left(\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\right)^{0{,}3}\left(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}\frac{d}{l}\right)^{0{,}18}; \tag{2.59}$$

2) horizontālā caurulē

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}8\left(\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\right)^{0{,}4}(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})^{0{,}1}\psi; \tag{2.60}$$

3) vertikālā caurulē, ja piespiedu un brīvās konvekcijas virzieni pretēji,

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}037\,\mathrm{Re}^{0{,}75}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}(\mu_s/\mu_v)^n. \tag{2.61}$$

a, β, ν, λ un Pr vērtības jāizvēlas robežslāņa vidējā temperatūrā

$$\bar{t}=0{,}5\,(\bar{t}_s+\bar{t}_v). \tag{2.62}$$

Izņēmums ir λ_v (siltumnesēja siltumvadītspējas koeficients), kuru satur Nuselta kritērijs izteiksmē (2.59) un (2.61):

$$\overline{\mathrm{Nu}}_v=\frac{\bar{\alpha}d}{\lambda_v}. \tag{2.63}$$

λ_v jāizvēlas caurules virsmas temperatūrā.

Izteiksmē (2.59) $\bar{\alpha}$ attiecināts uz temperatūru starpību caurules sākumā. Formula derīga, ja $20\leqslant l/d\leqslant 130$; $\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\leqslant 1100$; $7\cdot 10^5\leqslant\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}\leqslant 4\cdot 10^8$ un $\mathrm{Re}<\mathrm{Re}_{kr}$.

Re_{kr} atkarība no $(\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr})_r$ dota 2.15. tabulā.

2.15. tabula

Re_{kr} atkarība no $(\mathrm{GrPr})_r$

$(\mathrm{GrPr})_r$	0	$8\cdot 10^5$	$5\cdot 10^6$	$1\cdot 10^7$	$2\cdot 10^7$ un vairāk
Re_{kr}	2300	3000	5000	6300	7200

Formula (2.60) derīga, ja $\mathrm{Re}<3000$; $\mathrm{Pe}\frac{d}{l}<120$; $10^6\leqslant\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}\leqslant 13\cdot 10^8$; $2\leqslant\mathrm{Pr}\leqslant 10$. ψ aprēķina pēc formulas (2.56).

Izteiksmei (2.61) pakāpes rādītāju n izvēlas tāpat kā vienādojumā (2.58). Tā derīga, ja $250\leqslant\mathrm{Re}\leqslant 10^4$; $1{,}5\cdot 10^6\leqslant\mathrm{Gr}\,\mathrm{Pr}\leqslant 12\cdot 10^6$; $2\leqslant\mathrm{Pr}\leqslant 10$.

Ja caurules šķērsgriezums nav apaļš, tad d vietā jāizmanto ekvivalentais diametrs (izteiksme (2.43)).

Cilindra siltumatdevei šķērsplūsmā

$$\overline{\mathrm{Nu}}=(0{,}43+C\,\mathrm{Re}^m\,\mathrm{Pr}^{0{,}38})\,\varepsilon_\varphi. \tag{2.64}$$

ε_φ ievēro siltumatdeves izmaiņu atkarībā no plūsmas virziena leņķa attiecībā pret caurules garenasi.

2.16. tabula

Koeficienta C un pakāpes rādītāja m vērtības izteiksmē (2.64)

Re	C	m
$1\ldots 4\cdot 10^3$	0,55	0,50
$4\cdot 10^3\ldots 4\cdot 10^4$	0,20	0,62
$4\cdot 10^4\ldots 4\cdot 10^5$	0,027	0,80

Re jāaprēķina plūsmas ātrumam pirms saskaršanās ar cilindru. Raksturīgais izmērs — cilindra diametrs. Fizikālos parametrus izvēlas temperatūrā, kāda ir plūsmai pirms saskaršanās ar cilindru.

2.17. tabula

Labojuma koeficienta ε_φ vērtības izteiksmē (2.64)

$\varphi°$	90	70	60	50	40	30	20
ε_φ	1,00	0,98	0,94	0,86	0,77	0,66	0,60

Vidējo siltumatdevi šķērsplūsmā cauruļu kūļa trešajai un nākamajām cauruļu rindām aprēķina pēc formulas

$$\overline{\mathrm{Nu}}=C\,\mathrm{Re}^{n}\,\mathrm{Pr}_s^{0,33}(\mathrm{Pr}_s/\mathrm{Pr}_v)^{0,25}\varepsilon_s. \qquad (2.65)$$

2.18. tabula

Koeficienta C un pakāpes rādītāja n vērtības izteiksmē (2.65)

Cauruļu izvietojums kūlī	C	n
Taisnstūru virsotnēs (kolonnās)	0,26	0,65
Rombu virsotnēs (šahveidā)	0,41	0,60

Izteiksme (2.65) derīga plūsmām, kurām $10^3 \leqslant \mathrm{Re} \leqslant 10^5$ un $0{,}7 \leqslant \mathrm{Pr} \leqslant 500$. Raksturīgo ātrumu izvēlas šaurākajā vietā starp caurulēm, raksturīgo izmēru — caurules ārējo diametru.

2.19. tabula

Labojuma koeficienta ε_s vērtības izteiksmē (2.65)

Cauruļu izvietojums	ε_s
Taisnstūrveida	$(s_2/d)^{-0,15}$
Rombiskais: $s_1/s_2<2$	$(s_1/s_2)^{1/6}$
$s_1/s_2 \geqslant 2$	1,12

Pirmajai cauruļu rindai $\alpha_1=0{,}6\alpha_3$, bet otrajai rindai taisnstūrveida izvietojumā $\alpha_2=0{,}9\alpha_3$ un rombiskajā izvietojumā $\alpha_2=0{,}7\alpha_3$ (α_3 — pēc formulas (2.65) aprēķinātā α vērtība)

Vidējā α vērtība visam cauruļu kūlim:

$$\bar{\alpha}=\frac{\alpha_1 S_1+\alpha_2 S_2+\alpha_3 \sum\limits_{i=3}^{n} S_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} S_i}, \qquad (2.66)$$

kur S_i — cauruļu sildvirsmu laukumi atsevišķās rindās.

Aprēķinu piemēri

2.5.1. Plānu plāksni garenvirzienā apskalo sauss piesātināts ūdens tvaiks ar temperatūru 120 °C un ātrumu $w=2$ m/s. Plāksnes virsmu temperatūra ir 200 °C, plāksnes garums 1,7 m, platums 0,6 m.

Aprēķināt vidējo siltuma plūsmu no plāksnes un siltumatdeves koeficientu 0,5 m attālumā no plāksnes priekšējās malas.

Atrisinājums. Lai izvēlētos aprēķina formulu, vispirms jānosaka plūsmas režīms. Tvaika fizikālos parametrus izvēlas pēc 2.11. tabulas 120 °C temperatūrā:

$$\nu=11{,}46\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};\quad \mathrm{Pr}=1{,}09;\quad \lambda=0{,}0259\ \mathrm{W/(m\cdot K)}.$$

Visai plāksnei

$$\mathrm{Re}=\frac{wl}{\nu}=\frac{2\cdot 1{,}7}{11{,}46\cdot 10^{-6}}=2{,}97\cdot 10^5.$$

Tā kā $\mathrm{Re}=2{,}97\cdot 10^5<5\cdot 10^5$, tad plūsmas režīms robežslānī jāuzskata par lamināru un aprēķiniem jāizmanto izteiksmes (2.52) un (2.53).

Vidējai siltumatdevei

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}664\,\mathrm{Re}^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,33}=0{,}664\,(2{,}97\cdot 10^5)^{0,5}\,1{,}09^{0,33}=372.$$

Vidējais siltumatdeves koeficients

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda \mathrm{Nu}}{l}=\frac{0{,}0259\cdot 372}{1{,}7}=5{,}67\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Siltuma plūsma no abām plāksnes pusēm

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_v-t_s)=5{,}67\cdot 2\cdot 1{,}7\cdot 0{,}6\,(200-120)=925\ \mathrm{W}.$$

Aprēķinot lokālo siltumatdevi (izteiksme (2.52)), Reinoldsa skaitlī par raksturīgo izmēru jāizvēlas attālums no priekšējās malas:

$$\mathrm{Re}_x=\frac{wx}{\nu}=\frac{2\cdot 0{,}5}{11{,}46\cdot 10^{-6}}=87{,}26\cdot 10^3.$$

$$\mathrm{Nu}_x=0{,}332\,\mathrm{Re}_x^{0,5}\,\mathrm{Pr}^{0,33}=0{,}332\,(87{,}26\cdot 10^3)^{0,5}\,1{,}09^{0,33}=100{,}9;$$

$$\alpha_x=\frac{\lambda \mathrm{Nu}_x}{x}=\frac{0{,}0259\cdot 100{,}9}{0{,}5}=5{,}23\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

2.5.2. Aprēķināt vidējo siltumatdeves koeficientu ūdens plūsmai, kura apskalo nepārtraukti dzesētu plānu plāksni. Ūdens ātrums $w=2$ m/s, vidējā temperatūra 80 °C. Plāksnes garums 3,2 m, virsmas temperatūra 20 °C.

Atrisinājums. Vispirms aprēķina plūsmas režīmu. Ūdens fizikālos parametrus atrod 2.10. tabulā:

$$\lambda=0{,}675\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \nu=0{,}366\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};$$

$$\mathrm{Pr}_s=2{,}25;\quad \mathrm{Pr}_v=7{,}0.$$

$$\mathrm{Re}=\frac{wl}{\nu}=\frac{2\cdot 3{,}2}{0{,}366\cdot 10^{-6}}=17{,}49\cdot 10^6.$$

Tā kā $Re>5\cdot10^5$, tad aprēķinam jāizmanto formula (2.54):

$$\overline{Nu}=0{,}037\,Re^{0,80}\,Pr_s^{0,43}(Pr_s/Pr_v)^{0,25}=$$
$$=0{,}037(17{,}49\cdot10^6)^{0,80}2{,}25^{0,43}(2{,}25/7{,}0)^{0,25}=24{,}6\cdot10^3.$$

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{Nu}}{l}=\frac{0{,}675\cdot24{,}6\cdot10^3}{3{,}2}=5189\ W/(m^2\cdot K).$$

2.5.3. Aprēķināt vidējo siltumatdeves koeficientu un siltuma plūsmu transformatoru eļļas plūsmai caurulē, kuras iekšējais diametrs ir 12 mm un garums 0,8 m. Eļļas vidējā temperatūra 40 °C, caurules virsmas vidējā temperatūra 80 °C. Eļļa plūst ar ātrumu $w=0{,}6$ m/s.

Atrisinājums. Vispirms jānosaka plūsmas režīms, lai varētu izvēlēties aprēķina formulu.

$$Re=\frac{wd}{\nu}=\frac{0{,}6\cdot0{,}012}{5{,}78\cdot10^{-6}}=1246.$$

Tā kā $Re<2300$, tad plūsma ir lamināra.

Eļļas fizikālo parametru vērtības izvēlas pēc 2.14. tabulas robežslāņa vidējā temperatūrā (izteiksme (2.57)) $t_r\approx t_v-0{,}5(t_v-t_s)=80-0{,}5(80-40)=60\,°C$:

$$\nu=5{,}78\cdot10^{-6}\ m^2/s;\quad c_p=1{,}90\ kJ/(kg\cdot K);$$
$$\lambda=0{,}107\ W/(m\cdot K);\quad \rho=856\ kg/m^3.$$

Siltumatdevi aprēķina pēc izteiksmes (2.55):

$$\overline{Nu}=1{,}6\left(Pe\frac{d}{l}\right)^{1/3}\psi,$$

kur

$$Pe=\frac{wd}{a}=\frac{0{,}6\cdot0{,}012}{6{,}58\cdot10^{-8}}=10{,}94\cdot10^4.$$

Šeit

$$a=\frac{\lambda}{c_p\rho}=\frac{0{,}107}{1900\cdot856}=6{,}58\cdot10^{-8}\ m^2/s.$$

Saskaņā ar izteiksmi (2.56) labojuma koeficients

$$\psi=(\mu_s/\mu_v)^{0,14}=\left(\frac{89{,}4\cdot10^{-4}}{30{,}8\cdot10^{-4}}\right)^{0,14}=1{,}16.$$

Tad

$$\overline{Nu}=1{,}6\left(10{,}94\cdot10^4\cdot\frac{0{,}012}{0{,}8}\right)^{1/3}1{,}16=21{,}8;$$

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{Nu}}{d}=\frac{0{,}107\cdot21{,}8}{0{,}012}=194\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltuma plūsma

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_v-t_s)=194\pi dl(80-40)=$$
$$=194\cdot3{,}14\cdot0{,}012\cdot0{,}8\cdot40=234\ W.$$

2.5.4. Noteikt siltuma plūsmu no karstā ūdens, kurš plūst pa apaļu cauruli, ja ūdens ātrums ir 1,5 m/s, ūdens vidējā temperatūra $t_s=80\,°C$. Caurules garums 4 m, iekšējais diametrs 36 mm, caurules sienas virsmas vidējā temperatūra $t_v=70\,°C$.

Atrisinājums. Vispirms jānosaka plūsmas režīms:

$$Re=\frac{wd}{\nu}=\frac{1{,}5\cdot0{,}036}{0{,}366\cdot10^{-6}}=14{,}8\cdot10^4>1\cdot10^4.$$

Plūsma ir turbulenta, tāpēc aprēķiniem izmantosim formulu (2.58).

Ūdens fizikālos parametrus atrod pēc 2.10. tabulas 80 °C temperatūrā:
$\lambda=0{,}675$ W/(m·K); $\nu=0{,}366\cdot10^{-6}$ m²/s; $\mu_s=355\cdot10^{-6}$ Pa·s; $Pr_s=2{,}25$. Sienas virsmas temperatūrā (70 °C) $\mu_v=406\cdot10^{-6}$ Pa·s.

Tā kā $2{,}0\leqslant Pr_s\leqslant150$, tad izteiksmē (2.58) koeficients $C=0{,}023$ un

$$\overline{Nu}=0{,}023\,Re^{0,8}\,Pr_s^{0,4}(\mu_s/\mu_v)^{0,25}=$$
$$=0{,}023(14{,}8\cdot10^4)^{0,8}2{,}25^{0,4}\left(\frac{355\cdot10^{-6}}{406\cdot10^{-6}}\right)^{0,25}=421.$$

Siltumatdeves koeficienta vidējā vērtība

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{Nu}}{d}=\frac{0{,}675\cdot421}{0{,}036}=7894\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltuma plūsma

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_s-t_v)=\bar{\alpha}\pi dl(80-70)=$$
$$=7894\cdot3{,}14\cdot0{,}036\cdot4\cdot10=35\,690\ W\approx35{,}7\ kW.$$

2.5.5. Taisnstūrveida šķērsgriezuma (0,5×0,4 m) kanālā plūst karsts gaiss ar vidējo temperatūru $t_s=150\,°C$ spiedienā 0,1013 MPa. Gaisa ātrums 12,5 m/s. Kanāla sienu vidējā temperatūra 60°C. Aprēķināt vidējo siltumatdeves koeficientu.

Atrisinājums. Atrod gaisa fizikālo parametru vērtības temperatūrā $t_s=150\,°C$:
$\lambda=0{,}0357$ W/(m·K); $\nu=28{,}95\cdot10^{-6}$ m²/s; $Pr=0{,}683$; $\mu_s=24{,}1\cdot10^{-6}$ Pa·s. Kanāla sienu temperatūrā (60 °C) $\mu_v=20{,}1\cdot10^{-6}$ Pa·s.

Vispirms jānosaka plūsmas režīms:

$$Re=\frac{wd_e}{\nu}.$$

Kanāla šķērsgriezuma ekvivalentais diametrs (izteiksme (2.43)):

$$d_e = \frac{4S}{U} = \frac{4\cdot 0{,}5\cdot 0{,}4}{2(0{,}5+0{,}4)} = 0{,}444 \text{ m}.$$

Tad

$$\mathrm{Re} = \frac{wd_e}{\nu} = \frac{12{,}5\cdot 0{,}444}{28{,}95\cdot 10^{-6}} = 1{,}92\cdot 10^5.$$

Plūsmas režīms ir turbulents, tāpēc aprēķinos jāizmanto izteiksme (2.58) ar $C=0{,}021$:

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0{,}021\,\mathrm{Re}^{0{,}8}\,\mathrm{Pr_s}^{0{,}4}\left(\frac{\mu_s}{\mu_v}\right)^{0{,}25} =$$

$$= 0{,}021\,(1{,}92\cdot 10^5)^{0{,}8} 0{,}683^{0{,}4}\left(\frac{24{,}1\cdot 10^{-6}}{20{,}1\cdot 10^{-6}}\right)^{0{,}25} = 318.$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d_e} = \frac{0{,}0357\cdot 318}{0{,}444} = 25{,}6 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}.$$

2.5.6. Aprēķināt vidējo siltumatdeves koeficientu un siltuma plūsmu vertikālā caurulē, pa kuru plūst ūdens no apakšas uz augšu, ja caurules $d=20$ mm, garums $L=2{,}5$ m, vidējā virsmas temperatūra $\bar{t}_v=70\,°\text{C}$. Ūdens vidējā temperatūra $\bar{t}_s=50\,°\text{C}$, plūsmas ātrums $w=0{,}04$ m/s.

Atrisinājums. Vispirms jānosaka plūsmas režīms. 2.10. tabulā atrod ūdens fizikālos parametrus robežslāņa vidējā temperatūrā (izteiksme (2.62)) $\bar{t}=0{,}5(\bar{t}_v+\bar{t}_s)=0{,}5(70+50)=60\,°\text{C}$: $\beta=5{,}3\cdot 10^{-4}\text{ K}^{-1}$; $\nu=0{,}479\cdot 10^{-6}\text{ m}^2/\text{s}$; $\mathrm{Pr}=3{,}0$; $c_p=4184$ J/(kg·K); $\rho=983{,}2\text{ kg/m}^3$; $\lambda=0{,}659$ W/(m·K).

Tad

$$\mathrm{Re} = \frac{wd}{\nu} = \frac{0{,}04\cdot 0{,}02}{0{,}479\cdot 10^{-6}} = 1670.$$

Tā kā $\mathrm{Re}<2300$, tad plūsmas režīms ir laminārs. Tālāk jānovērtē brīvās konvekcijas ietekme uz siltumatdevi. Šim nolūkam aprēķina Grashofa skaitli:

$$\mathrm{Gr} = \frac{g\beta d^3\Delta t}{\nu^2} = \frac{9{,}81\cdot 5{,}3\cdot 10^{-4}\cdot 0{,}02^3\cdot 20}{(0{,}479\cdot 10^{-6})^2} = 3{,}63\cdot 10^6.$$

Šeit par raksturīgo izmēru izvēlas caurules diametru d. Tā kā

$$\mathrm{Gr\,Pr} = 3{,}63\cdot 10^6\cdot 3{,}0 = 10{,}9\cdot 10^6 > 8\cdot 10^5,$$

tad siltumatdevi ietekmē arī brīvā konvekcija. Aprēķiniem jāizmanto izteiksme (2.59), jo brīvās un piespiedu konvekcijas virzieni sakrīt.

Vispirms aprēķina Pe skaitli (2.5. tab.):

$$\mathrm{Pe} = \frac{wd}{a},$$

kur $a = \frac{\lambda_v}{c_p\rho} = \frac{0{,}668}{4184\cdot 983{,}2} = 1{,}62\cdot 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}.$

Šeit λ_v jāizvēlas caurules virsmas temperatūrā. Tad

$$\mathrm{Pe} = \frac{0{,}04\cdot 0{,}02}{1{,}62\cdot 10^{-7}} = 4938$$

un

$$\overline{\mathrm{Nu}}_v = 0{,}35\left(\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\right)^{0{,}3}\left(\mathrm{Gr\,Pr}\frac{d}{l}\right)^{0{,}18} =$$

$$= 0{,}35\left(\frac{4938\cdot 0{,}02}{2{,}5}\right)^{0{,}3}\left(\frac{10{,}9\cdot 10^6\cdot 0{,}02}{2{,}5}\right)^{0{,}18} = 8{,}17.$$

Vidējais siltumatdeves koeficients

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}_v}{d} = \frac{0{,}659\cdot 8{,}17}{0{,}02} = 269 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$$

un siltuma plūsma

$$\Phi = \bar{\alpha}S(t_v - t_s) = \bar{\alpha}\pi dL(70-50) =$$

$$= 269\cdot 3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 2{,}5\cdot 20 = 845 \text{ W}.$$

2.5.7. Atrisināt 2.5.6. uzdevumu gadījumā, kad ūdens plūst caurulē no augšas uz leju.

Atrisinājums. Šajā gadījumā piespiedu un brīvās konvekcijas virzieni ir pretēji, tāpēc aprēķiniem jāizmanto formula (2.61). No 2.10. tabulas atrod $\mu_s=549\cdot 10^{-6}$ Pa·s un $\mu_v=406\cdot 10^{-6}$ Pa·s. Tad

$$\overline{\mathrm{Nu}} = 0{,}037\,\mathrm{Re}^{0{,}75}\,\mathrm{Pr}^{0{,}4}(\mu_s/\mu_v)^{0{,}11} =$$

$$= 0{,}037\cdot 1670^{0{,}75} 3{,}0^{0{,}4}\left(\frac{549\cdot 10^{-6}}{406\cdot 10^{-6}}\right)^{0{,}11} = 15{,}51.$$

$\overline{\mathrm{Nu}}$ izteiksmē λ vērtība jāievieto šķidruma vidējā temperatūrā, t. i., $\lambda=0{,}634$ W/(m·K). Tad

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d} = \frac{0{,}634\cdot 15{,}51}{0{,}02} = 492 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}.$$

Siltuma plūsma

$$\Phi = \bar{\alpha}S(t_v - t_s) = 492\cdot 3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 2{,}5\cdot 20 = 1545 \text{ W}.$$

2.5.8. Atrisināt 2.5.6. uzdevumu ar nosacījumu, ka caurule novietota horizontāli.

Atrisinājums. Aprēķinam jāizmanto formula (2.60):

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}8\left(\mathrm{Pe}\frac{d}{l}\right)^{0,4}(\mathrm{Gr\,Pr})^{0,1}\left(\frac{\mu_s}{\mu_v}\right)^{0,4}=$$

$$=0{,}8\left(\frac{4938\cdot 0{,}02}{2{,}5}\right)^{0,4}(10{,}9\cdot 10^6)^{0,1}\left(\frac{549\cdot 10^{-6}}{406\cdot 10^{-6}}\right)^{0,14}=$$

$$=18{,}37.$$

Tad

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{0{,}634\cdot 18{,}37}{0{,}02}=582\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$$

un

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_v-t_s)=582\cdot 3{,}14\cdot 0{,}02\cdot 2{,}5\cdot 20=1827\ \mathrm{W}.$$

2.5.9. Caurulē, kuras iekšējais diametrs $d=50$ mm, plūst ūdens ar ātrumu $w=2{,}5$ m/s. Caurules iekšējās virsmas temperatūra ir 60 °C. Ūdens caurulē ieplūst ar temperatūru 20 °C. Aprēķināt, cik liels nepieciešams caurules garums, lai ūdens temperatūra izplūdē būtu 32 °C.

Atrisinājums. Vispirms jānosaka plūsmas režīms. Ūdens vidējā temperatūra

$$t_s=0{,}5(t_{s1}+t_{s2})=0{,}5(20+32)=26\ °\mathrm{C}.$$

Ūdenim 26 °C temperatūrā $\nu=0{,}883\cdot 10^{-6}$ m²/s (atrod 2.10. tabulā interpolējot). Tad

$$\mathrm{Re}=\frac{wd}{\nu}=\frac{2{,}5\cdot 0{,}05}{0{,}883\cdot 10^{-6}}=1{,}416\cdot 10^5.$$

Plūsmas režīms ir turbulents, tāpēc aprēķiniem izmanto izteiksmi (2.58). Ūdens fizikālie parametri 26 °C temperatūrā: $\lambda=0{,}610$ W/(m·K); $\mathrm{Pr}_s=6{,}04$; $\mu_s=882\cdot 10^{-6}$ Pa·s; $\rho=996{,}6$ kg/m³; $c_p=4{,}180$ kJ(kg·K).

Ūdenim caurules iekšējās virsmas temperatūrā

$$\mu_v=470\cdot 10^{-6}\ \mathrm{Pa\cdot s}.$$

Saskaņā ar izteiksmi (2.58)

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}023\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}_s^{0,4}\left(\frac{\mu_s}{\mu_v}\right)^{0,11}=$$

$$=0{,}023(1{,}416\cdot 10^5)^{0,8}6{,}04^{0,4}\left(\frac{882\cdot 10^{-6}}{470\cdot 10^{-6}}\right)^{0,11}=668.$$

Siltumatdeves koeficienta vidējā vērtība

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{0{,}61\cdot 668}{0{,}05}=8150\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Nepieciešamā caurules garuma aprēķinam izmanto siltuma bilances vienādojumu, kurā caurules virsmas atdoto siltuma plūsmu pielīdzina caurplūstošā ūdens siltuma kapacitātei laika vienībā:

$$\Phi=\bar{\alpha}\pi dL(t_v-t_s)=Mc_p(t_{s2}-t_{s1}).$$

Ūdens caurplūdums

$$M=\rho w\frac{\pi d^2}{4}=996{,}6\cdot 2{,}5\frac{3{,}14\cdot 0{,}05^2}{4}=4{,}89\ \mathrm{kg/s}.$$

Siltuma plūsma

$$\Phi=Mc_p(t_{s2}-t_{s1})=4{,}89\cdot 4180(32-20)=245\cdot 10^3\ \mathrm{W}.$$

Nepieciešamais caurules garums

$$L=\frac{\Phi}{\bar{\alpha}\pi d(t_v-t_s)}=\frac{245\cdot 10^3}{8150\cdot 3{,}14\cdot 0{,}05(60-26)}=5{,}63\ \mathrm{m}.$$

2.5.10. Ūdens ar sākuma temperatūru $t_{s1}=10$ °C ieplūst 3,6 m garā caurulē, kuras iekšējais diametrs 16 mm. Caurules iekšējās virsmas temperatūra $t_v=40$ °C.

Ar kādu temperatūru ūdens izplūdīs no caurules, ja caurplūdums $M=0{,}14$ kg/s?

Atrisinājums. Lai izvēlētos ūdens fizikālo parametru vērtības, jāzina tā vidējā temperatūra. Dota ir tikai sākuma (ieplūdes) temperatūra, tāpēc uzdevumu risina ar tuvinājumu metodi. Sākumā pieņem, ka ūdens temperatūra izplūdē ir 30 °C. Tad

$$\bar{t}_s=0{,}5(t_{s1}+t_{s2})=0{,}5(10+30)=20\ °\mathrm{C}.$$

Šādā temperatūrā saskaņā ar 2.10. tabulu $\rho=998{,}2$ kg/m³; $\nu=1\cdot 10^{-6}$ m²/s.

Plūsmas ātrums caurulē

$$w=\frac{4M}{\rho\pi d^2}=\frac{4\cdot 0{,}14}{998{,}2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}016^2}=0{,}698\ \mathrm{m/s}.$$

$$\mathrm{Re}=\frac{wd}{\nu}=\frac{0{,}698\cdot 0{,}016}{1\cdot 10^{-6}}=11\,170.$$

Plūsmas režīms turbulents, tāpēc siltumatdeves aprēķinam izmanto formulu (2.58). Atrod arī $\lambda=0{,}599$ W/(m·K); $\mathrm{Pr}_s=7{,}0$; $c_p=4182$ kJ/(kg·K); $\mu_s=1004\cdot 10^{-6}$ Pa·s un caurules virsmas temperatūrā (40 °C) $\mu_v=653\cdot 10^{-6}$ Pa·s.

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0{,}023\,\mathrm{Re}^{0,8}\,\mathrm{Pr}_s^{0,4}\left(\frac{\mu_s}{\mu_v}\right)^{0,11}=$$

$$=0{,}023\cdot 11\,170^{0,8}7^{0,4}\left(\frac{1004\cdot 10^{-6}}{653\cdot 10^{-6}}\right)^{0,11}=90{,}9.$$

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{0{,}599\cdot 90{,}9}{0{,}016}=3403\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Ūdens temperatūru izplūdē atrod pēc siltuma bilances vienādojuma

$$Mc_p(t_{s2}-t_{s1})=\bar{\alpha}\pi dL\Delta t_{lg},$$

kur Δt_{lg} — vidēji logaritmiskā temperatūru starpība. Ir zināms, ka

$$\Delta t_{lg}=\frac{t_{s2}-t_{s1}}{\ln\dfrac{t_v-t_{s1}}{t_v-t_{s2}}}.$$

Tad

$$\ln(t_v-t_{s2})=\ln(t_v-t_{s1})-\frac{\bar{\alpha}\pi dL}{Mc_p}=$$

$$=\ln(40-10)-\frac{3403\cdot 3{,}14\cdot 0{,}016\cdot 3{,}6}{0{,}14\cdot 4182}=2{,}35.$$

No šejienes

$$t_v-t_{s2}=10{,}49\,°C$$

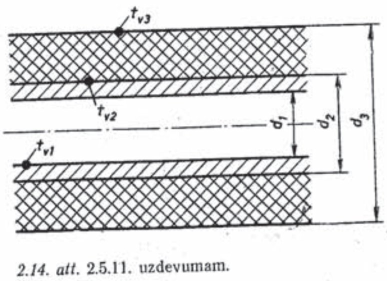
un

$$t_{s2}=t_v-10{,}49=40-10{,}49=29{,}51\,°C.$$

Rezultāts pirmajā tuvinājumā ir apmierinošs — atšķirība 1,6%. Ja vēlas precīzāku rezultātu, tad jāņem tālākie tuvinājumi.

2.5.11. Pa horizontāli novietotu izolētu tērauda cauruļvadu plūst karsts ūdens ar vidējo temperatūru $t_{s1}=80\,°C$ un ātrumu $w=0{,}5$ m/s. Caurules diametri $d_1/d_2=75/85$ mm. Izolācijas materiāls — minerālvate ar $\lambda_{iz}=0{,}08$ W/(m·K), izolācijas slāņa biezums 25 mm.

Aprēķināt siltumatdevi brīvās konvekcijas veidā no cauruļvada uz apkārtējo gaisu, kura temperatūra $t_{s2}=20\,°C$, un noteikt virsmu temperatūras t_{v1}, t_{v2} un t_{v3} (2.14. att.). Tēraudam pieņemt $\lambda_t=51$ W/(m·K).



2.14. att. 2.5.11. uzdevumam.

Atrisinājums. 2.10. tabulā atrod ūdens fizikālo īpašību parametrus vidējā temperatūrā 80 °C:

$\lambda_{s1}=0{,}675$ W/(m·K); $\nu_{s1}=0{,}366\cdot 10^{-6}$ m²/s; $Pr_s=2{,}25$.

Nosaka ūdens plūsmas režīmu caurulē:

$$Re=\frac{wd_1}{\nu_{s1}}=\frac{0{,}5\cdot 0{,}075}{0{,}366\cdot 10^{-6}}=10{,}25\cdot 10^4.$$

Plūsmas režīms ir turbulents, tāpēc siltumatdeves koeficienta noteikšanai no ūdens uz caurules iekšējo virsmu izmantosim formulu (2.58).

Tā kā siltumatdeve no ūdens uz caurules iekšējo virsmu ir daudzkārt lielāka nekā brīvā konvekcijā no ārējās virsmas uz apkārtējo gaisu, tad var pieņemt $t_{s1}\approx t_{v1}$ un labojums $(\mu_s/\mu_v)^{0,25}\approx\approx 1$. Tāpēc

$$\overline{Nu}=0{,}023\,Re^{0,8}\,Pr_s^{0,4}=0{,}023(10{,}25\cdot 10^4)^{0,8}2{,}25^{0,4}=324{,}5$$

un

$$\bar{\alpha}_1=\frac{\lambda_{s1}\overline{Nu}}{d_1}=\frac{0{,}675\cdot 324{,}5}{0{,}075}=2920\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltumatdeve no caurules ārējās virsmas brīvā konvekcijā atkarīga no temperatūru starpības $\Delta t=t_{v3}-t_{s2}$. Tā kā caurules ārējās virsmas temperatūra t_{v3} nav zināma, tad aprēķins izpildāms ar tuvinājumu metodi. Siltumatdeves koeficients no caurules ārējās virsmas α_2 būs daudzkārt mazāks nekā α_1, tāpēc pirmajā tuvinājumā pieņemam $t_{v3}=40\,°C$.

Siltumatdevi brīvā konvekcijā aprēķina pēc izteiksmes (2.47). Iepriekš nosaka vidējo robežslāņa temperatūru

$$\bar{t}=0{,}5(t_v+t_{s2})=0{,}5(40+20)=30\,°C.$$

2.12. tabulā atrod gaisa fizikālo parametru vērtības:

$\lambda_{s2}=2{,}67\cdot 10^{-2}$ W/(m·K); $\nu_{s2}=16\cdot 10^{-6}$ m²/s; $Pr_{s2}=0{,}701$.

Aprēķina Gr skaitli:

$$Gr=\frac{gd_3^3\beta\Delta t}{\nu_{s2}^2}.$$

Šeit saskaņā ar formulu (2.50)

$$\beta=\frac{1}{T}=\frac{1}{20+273}=3{,}41\cdot 10^{-3}\,K^{-1};$$

$$d_3=d_2+2\delta=85+2\cdot 25=135\ mm.$$

Tad

$$Gr=\frac{9{,}81\cdot 0{,}135^3\cdot 3{,}41\cdot 10^{-3}(40-20)}{(16\cdot 10^{-6})^2}=6{,}43\cdot 10^6.$$

Gāzēm labojums $(Pr_s/Pr_v)^{0,25} \approx 1$, tāpēc saskaņā ar formulu (2.47) un 2.9. tabulu un ņemot vērā, ka

$$Gr\,Pr_s = 6{,}43 \cdot 10^6 \cdot 0{,}701 = 4{,}51 \cdot 10^6 > 10^3,$$
$$Nu = 0{,}5\,(Gr\,Pr_s)^{0,25} = 0{,}5\,(4{,}51 \cdot 10^6)^{0,25} = 23{,}0$$

un

$$\alpha_2 = \frac{\lambda_{s2} Nu}{d_3} = \frac{2{,}67 \cdot 10^{-2} \cdot 23{,}0}{0{,}135} = 4{,}55\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}.$$

Lineārais siltumpārejas koeficients (izteiksme (2.22)) pirmajā tuvinājumā:

$$k_L = 1 \Big/ \left(\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_t} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{2\pi\lambda_{iz}} \ln \frac{d_3}{d_2} + \right.$$
$$\left. + \frac{1}{\pi d_3 \alpha_2} \right) = 1 \Big/ \left(\frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}075 \cdot 2920} + \right.$$
$$+ \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 51} \ln \frac{0{,}085}{0{,}075} + \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}08} \ln \frac{0{,}135}{0{,}085} +$$
$$\left. + \frac{1}{3{,}14 \cdot 0{,}135 \cdot 4{,}55} \right) = 0{,}694\ \mathrm{W/(m \cdot K)}.$$

Siltuma plūsmas lineārais blīvums (formula (2.19)) pirmajā tuvinājumā:

$$q_L = k_L (t_{s1} - t_{s2}) = 0{,}694\,(80 - 20) = 41{,}64\ \mathrm{W/m}$$

un cauruļvada izolācijas ārējās virsmas temperatūra (no izteiksmes (2.24)) pirmajā tuvinājumā:

$$t_{v3} = t_{s2} + \frac{q_L}{\pi d_3 \alpha_2} = 20 + \frac{41{,}64}{3{,}14 \cdot 0{,}135 \cdot 4{,}55} = 41{,}6\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Otrajā tuvinājumā pieņem $t_{v3} = 41\ ^\circ\mathrm{C}$ un atkārto aprēķinu. Tad iegūst

$Gr = 6{,}75 \cdot 10^6$;
$Nu = 23{,}3$;
$\alpha_2 = 4{,}61\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}$;
$k_L = 0{,}697\ \mathrm{W/(m \cdot K)}$;
$q_L = 41{,}8\ \mathrm{W/m}$;
$t_{v3} = 41{,}4\ ^\circ\mathrm{C}$.

Aprēķinātās un pieņemtās temperatūras t_{v3} vērtības atšķiras mazāk par 1%, tāpēc rezultāts $t_{v3} = 41{,}4\ ^\circ\mathrm{C}$ jāuzskata par apmierinošu.

Aprēķina pārējo virsmu temperatūras (izteiksme (2.23)):

$$t_{v1} = t_{s1} - \frac{q_L}{\pi d_1 \alpha_1} = 80 - \frac{41{,}8}{3{,}14 \cdot 0{,}075 \cdot 2920} = 79{,}94\ ^\circ\mathrm{C};$$

$$t_{v2} = t_{s1} - \frac{q_L}{\pi} \left(\frac{1}{d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\lambda_t} \ln \frac{d_2}{d_1} \right) =$$
$$= 80 - \frac{41{,}8}{3{,}14} \left(\frac{1}{0{,}075 \cdot 2920} + \frac{1}{2 \cdot 51} \ln \frac{0{,}085}{0{,}075} \right) = 79{,}92\ ^\circ\mathrm{C}.$$

2.5.12. Aprēķināt siltumatdeves koeficientu un lineāro siltuma plūsmas blīvumu no caurules virsmas, kuru apskalo gaisa plūsma ar ātrumu 3,0 m/s un temperatūru $t_s = 10\ ^\circ\mathrm{C}$. Gaisa spiediens 101,3 kPa, caurules ārējais diametrs 25 mm, virsmas temperatūra $t_v = 60\ ^\circ\mathrm{C}$. Uzdevumu atrisināt, ja

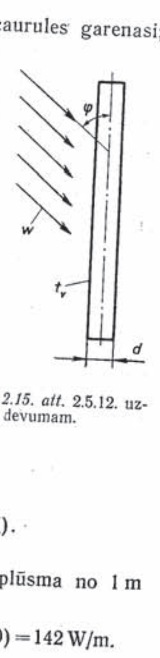
1) gaiss plūst leņķī $\varphi = 90^\circ$ attiecībā pret caurules garenasi;
2) gaisa plūsmas virziens veido ar caurules garenasi 50° leņķi (2.15. att.).

Atrisinājums. Siltumatdeves aprēķinam izmanto formulu (2.64). No 2.12. tabulas atrod gaisa fizikālos parametrus:

$$\nu = 14{,}16 \cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};$$
$$\lambda = 2{,}51 \cdot 10^{-2}\ \mathrm{W/(m \cdot K)};\quad Pr = 0{,}705.$$

Nosaka plūsmas režīmu:

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{3 \cdot 0{,}025}{14{,}16 \cdot 10^{-6}} = 5297.$$



2.15. att. 2.5.12. uzdevumam.

Saskaņā ar 2.16. tabulu

$$\overline{Nu} = (0{,}43 + 0{,}20\,Re^{0,62}\,Pr^{0,38})\,\varepsilon_\varphi.$$

Tā kā $\varphi = 90^\circ$, tad $\varepsilon_\varphi = 1{,}0$ (2.17. tab.).

$$\overline{Nu} = 0{,}43 + 0{,}20 \cdot 5297^{0,62} \cdot 0{,}705^{0,38} = 36{,}1$$

un

$$\bar{\alpha} = \frac{\lambda \overline{Nu}}{d} = \frac{2{,}51 \cdot 10^{-2} \cdot 36{,}1}{0{,}025} = 36{,}2\ \mathrm{W/(m^2 \cdot K)}.$$

Lineārais siltuma plūsmas blīvums (siltuma plūsma no 1 m caurules):

$$q_L = \bar{\alpha} S\,(t_v - t_s) = 36{,}2 \cdot 3{,}14 \cdot 0{,}025 \cdot 1{,}0\,(60 - 10) = 142\ \mathrm{W/m}.$$

Ja gaiss apskalo cauruli leņķī $\varphi=50°$, tad labojuma koeficients formulā (2.64) ir $\varepsilon_\varphi=0,86$ (atrod 2.17. tab.) un

$$\bar{\alpha}_\varphi=\bar{\alpha}\,\varepsilon_\varphi=36,2\cdot 0,86=31,1\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)};$$
$$q_{L\varphi}=q_L\varepsilon_\varphi=142\cdot 0,86=122\ \mathrm{W/m}.$$

2.5.13. Atrisināt 2.5.12. uzdevumu, ja cauruli apskalo ūdens.
Atrisinājums. Atrod 2.10. tabulā ūdens fizikālos parametrus:

$$\nu=1,3\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};\quad \lambda=0,574\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \mathrm{Pr}=9,5.$$

$$\mathrm{Re}=\frac{wd}{\nu}=\frac{3\cdot 0,025}{1,3\cdot 10^{-6}}=57\,690;$$

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0,43+0,027\,\mathrm{Re}^{0,80}\,\mathrm{Pr}^{0,38}=$$
$$=0,43+0,027\cdot 57\,690^{0,80}\cdot 9,5^{0,38}=409,5;$$

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{0,574\cdot 409,5}{0,025}=9402\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)};$$

$$q_L=\alpha S\,(t_v-t_s)=9402\cdot 3,14\cdot 0,025\cdot 1,0\cdot 50=$$
$$=36,9\cdot 10^3\ \mathrm{W/m}.$$

Ja ūdens apskalo cauruli leņķī $\varphi=50°$, tad

$$\bar{\alpha}_\varphi=\bar{\alpha}\varepsilon_\varphi=9402\cdot 0,86==8086\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}$$

un

$$q_{L\varphi}=q_L\varepsilon_\varphi=36,9\cdot 10^3\cdot 0,86=31,7\cdot 10^3\ \mathrm{W/m}.$$

2.5.14. Apaļa šķērsgriezuma elektropārvades līnijas vara vads tiek dzesēts sausa gaisa plūsmā. Aprēķināt pieļaujamo elektriskās strāvas stiprumu, ja vada virsmas temperatūra nedrīkst pārsniegt 60 °C, vada diametrs ir 8 mm, gaisa temperatūra −10 °C, spiediens 101,3 kPa, gaisa plūsmas ātrums $w=5$ m/s.

Atrisinājums. Aprēķinam izmanto izteiksmi (2.64). Rokasgrāmatās atrod, ka vara īpatnējā elektriskā pretestība $\rho=1,75\cdot 10^{-2}\ \Omega\cdot\mathrm{mm^2/m}$, bet 2.12. tabulā atrod gaisa parametrus −10 °C temperatūrā:

$$\lambda=2,36\cdot 10^{-2}\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \nu=12,43\cdot 10^{-6}\ \mathrm{m^2/s};\quad \mathrm{Pr}=0,712.$$

Nosaka Reinoldsa skaitli:

$$\mathrm{Re}=\frac{wd}{\nu}=\frac{5\cdot 0,008}{12,43\cdot 10^{-6}}=3218.$$

Saskaņā ar 2.16. tabulu

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0,43+0,55\,\mathrm{Re}^{0,50}\,\mathrm{Pr}^{0,38}=$$
$$=0,43+0,55\cdot 3218^{0,50}0,712^{0,38}=27,9.$$

Siltumatdeves koeficients no vada virsmas:

$$\bar{\alpha}=\frac{\lambda\overline{\mathrm{Nu}}}{d}=\frac{2,36\cdot 10^{-2}\cdot 27,9}{8\cdot 10^{-3}}=82,3\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Pieļaujamo strāvas stiprumu var aprēķināt no enerģijas bilances vienādojuma:

$$I^2R=\bar{\alpha}S\,(t_v-t_s),$$

kur R — vada elektriskā pretestība (Ω).

Aprēķina pretestību 1 m garam vadam:

$$R=\frac{\rho L}{\frac{\pi d^2}{4}}=\frac{1,75\cdot 10^{-2}\cdot 1}{\frac{3,14\cdot 8^2}{4}}=3,48\cdot 10^{-4}\ \Omega.$$

Šeit vada diametrs jāizsaka milimetros (sk. ρ dimensiju).

Pieļaujamais strāvas stiprums

$$I=\sqrt{\frac{\bar{\alpha}S\,(t_v-t_s)}{R}}=\sqrt{\frac{82,3\cdot 3,14\cdot 8\cdot 10^{-3}\cdot 1\cdot 70}{3,48\cdot 10^{-4}}}=645\ \mathrm{A}.$$

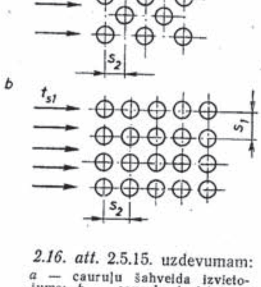
2.5.15. Cauruļu kūli šķērsplūsmā apskalo karstas dūmgāzes 101,3 kPa spiedienā ar šādu sastāvu (tilpuma daļās): $r_{CO_2}=0,13$; $r_{H_2O}=0,11$; $r_{N_2}=0,76$.

Cauruļu ārējais diametrs $d=50$ mm, cauruļu rindu skaits plūsmas virzienā ir 5. Dūmgāzu temperatūra ieplūdē $t_{s1}=800$ °C, bet izplūdē $t_{s2}=600$ °C, ātrums šaurākajā vietā starp caurulēm $w=12$ m/s. Cauruļu izvietojuma solis plūsmas šķērsvirzienā $s_1=120$ mm un garenvirzienā $s_2=100$ mm.

Aprēķināt vidējo siltumatdeves koeficientu konvekcijā no dūmgāzēm uz cauruļu kūli šādos gadījumos:

1) caurules izvietotas rombu virsotnēs (šahveidā);

2) caurules izvietotas taisnstūru virsotnēs (2.16. att.).



2.16. att. 2.5.15. uzdevumam: *a* — cauruļu šahveida izvietojums; *b* — cauruļu izvietojums kolonnu veidā.

Atrisinājums. Aprēķinam izmanto izteiksmi (2.65). Gāzēm labojums $(\mathrm{Pr_s}/\mathrm{Pr_v})^{0,25}\approx 1$.

1. Cauruļu izvietojumam rombu virsotnēs

$$\overline{\mathrm{Nu}}=0,41\,\mathrm{Re}^{0,60}\,\mathrm{Pr_s}^{0,33}\varepsilon_s.$$

Tā kā $s_1/s_2=120/100=1{,}2<2$, tad saskaņā ar 2.19. tabulu labojuma koeficients

$$\varepsilon_s=(s_1/s_2)^{1/6}=1{,}2^{1/6}=1{,}03.$$

Dūmgāzu vidējā temperatūra

$$\bar{t}_s=0{,}5(t_{s1}+t_{s2})=0{,}5(800+600)=700\,°C.$$

Atrod 2.13. tabulā dūmgāzu fizikālos parametrus 700 °C temperatūrā:

$$\lambda=8{,}27\cdot10^{-2}\ W/(m\cdot K);\quad \nu=112{,}1\cdot10^{-6}\ m^2/s;\quad Pr=0{,}61.$$

Tad

$$Re=\frac{wd}{\nu}=\frac{12\cdot0{,}05}{112{,}1\cdot10^{-6}}=5352$$

un

$$\overline{Nu}=0{,}41\cdot5352^{0{,}60}\cdot0{,}61^{0{,}33}\cdot1{,}03=61{,}9.$$

Siltumatdeves koeficients cauruļu trešajai un nākamajām rindām

$$\bar{\alpha}_3=\frac{\lambda\overline{Nu}}{d}=\frac{8{,}27\cdot10^{-2}\cdot61{,}9}{0{,}05}=102{,}4\ W/(m^2\cdot K),$$

pirmajai rindai

$$\alpha_1=0{,}6\bar{\alpha}_3=0{,}6\cdot102{,}4=61{,}4\ W/(m^2\cdot K)$$

un otrajai rindai

$$\alpha_2=0{,}7\bar{\alpha}_3=0{,}7\cdot102{,}4=71{,}7\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltumatdeves koeficienta vidējā vērtība visam kūlim, ja caurules izvietotas rombu virsotnēs un visās rindās vienāds cauruļu skaits (formula (2.66)):

$$\bar{\alpha}_r=\frac{1}{5}(\alpha_1+\alpha_2+3\bar{\alpha}_3)=$$

$$=\frac{1}{5}(61{,}4+71{,}7+3\cdot102{,}4)=88{,}06\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltumatdeves koeficienta vērtība, sākot ar trešo rindu, praktiski vairs neizmainās.

2. Cauruļu izvietojumam taisnstūru virsotnēs

$$\overline{Nu}=0{,}26\ Re^{0{,}65}\ Pr_s^{0{,}33}\varepsilon_s.$$

Labojuma koeficients (2.19. tab.):

$$\varepsilon_s=(s_2/d)^{-0{,}15}=(100/50)^{-0{,}15}=0{,}90.$$

Tad

$$\overline{Nu}=0{,}26\cdot5352^{0{,}65}\cdot0{,}61^{0{,}33}\cdot0{,}9=52{,}7$$

un

$$\bar{\alpha}_3=\frac{\lambda\overline{Nu}}{d}=\frac{8{,}27\cdot10^{-2}\cdot52{,}7}{0{,}05}=87{,}2\ W/(m^2\cdot K).$$

$$\alpha_1=0{,}6\alpha_3=0{,}6\cdot87{,}2=52{,}3\ W/(m^2\cdot K);$$

$$\alpha_2=0{,}9\alpha_3=0{,}9\cdot87{,}2=78{,}5\ W/(m^2\cdot K).$$

Siltumatdeves koeficienta vidējā vērtība visam kūlim, ja caurules izvietotas taisnstūru virsotnēs:

$$\bar{\alpha}_t=\frac{1}{5}(\alpha_1+\alpha_2+3\bar{\alpha}_3)=$$

$$=\frac{1}{5}(52{,}3+78{,}5+3\cdot87{,}2)=78{,}5\ W/(m^2\cdot K).$$

2.6. SILTUMATDEVE IZTVAIKOJOT UN KONDENSĒJOTIES

Aprēķinu izteiksmes

Kodolveida iztvaikošanas gadījumā ūdenim brīvā konvekcijā lielā tilpumā, ja absolūtais spiediens ir $0{,}1\leqslant p\leqslant3{,}0$ MPa,

$$\bar{\alpha}=6{,}02p^{0{,}20}q^{0{,}67}, \tag{2.67}$$

bet, ja spiediens $3{,}0<p\leqslant20$ MPa,

$$\alpha=3{,}37p^{0{,}75}q^{0{,}67}. \tag{2.68}$$

Spiediena vērtības jāievieto MPa, siltuma plūsmas blīvums — W/m².

Plēves kondensācijas gadījumā tīram nekustīgam tvaikam, kurš nesatur gāzes:

1) uz vertikālām caurulēm un sienām laminārai kondensāta plēves plūsmai ($Z<2300$)

$$\alpha=0{,}95\frac{r\rho\nu}{\Delta tH}Z^{0{,}78}\varepsilon_t; \tag{2.69}$$

2) tas pats, ja plēves plūsma augšgalā lamināra, bet lejā turbulenta ($Z>2300$),

$$\bar{\alpha}=\frac{1}{4}\ \frac{r\rho\nu}{\Delta tH}(253+0{,}069\ Pr^{0{,}5}(Z-2300)\ (Pr/Pr_v)^{0{,}25})^{1{,}33}; \tag{2.70}$$

3) uz horizontālu cauruļu ārējām virsmām laminārai plēves plūsmai

$$\bar{\alpha}=0{,}725\left(\frac{g\lambda^3\rho r}{\nu\Delta td}\right)^{0{,}25}\varepsilon_t. \tag{2.71}$$

Kondensāta plūsmas relatīvo garumu raksturojošais līdzības skaitlis

$$Z=\mathrm{Ga}^{0,33}\frac{\lambda\Delta t}{r\rho\nu}\,. \qquad (2.72)$$

Galileja jeb brīvās plūsmas līdzības skaitlis

$$\mathrm{Ga}=\frac{gH^3}{\nu^2}\,. \qquad (2.73)$$

Labojuma koeficients

$$\varepsilon_t=\left(\frac{\lambda_v{}^3}{\lambda^3}\,\frac{\mu}{\mu_v}\right)^{0,125}. \qquad (2.74)$$

Šajās formulās kondensāta fizikālie parametri Pr, ν, μ un λ jāizvēlas piesātinājuma temperatūrā, bet Pr_v, μ_v un λ_v — sildvirsmas temperatūrā.

Aprēķinu piemēri

2.6.1. Aprēķināt siltumatdeves koeficientu no sildvirsmas uz verdošu ūdeni brīvā konvekcijā lielā tilpumā un sildvirsmas temperatūru, ja ūdens spiediens 0,4 MPa, siltuma plūsmas blīvums $q=180$ kW/m². Iztvaikošana ir kodolveida.

Atrisinājums. Aprēķinam izmanto formulu (2.67):

$$\bar{\alpha}=6{,}02p^{0,20}q^{0,67}=6{,}02\cdot0{,}4^{0,20}(180\cdot10^3)^{0,67}=$$
$$=16{,}6\cdot10^3\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Sildvirsmas temperatūru t_v var aprēķināt pēc formulas

$$q=\bar{\alpha}(t_v-t_s).$$

Šeit t_s atrod piesātināta ūdens tvaika tabulās atbilstoši spiedienam $p=0{,}4$ MPa:

$$t_s=143{,}6\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Tad

$$t_v=t_s+\frac{q}{\bar{\alpha}}=143{,}6+\frac{180\cdot10^3}{16{,}6\cdot10^3}=154{,}4\ ^\circ\mathrm{C}.$$

2.6.2. Atrisināt 2.6.1. uzdevumu, ja ūdens vārās spiedienā 15 MPa.

Atrisinājums. Jāizmanto formula (2.68):

$$\bar{\alpha}=3{,}37p^{0,75}q^{0,67}=3{,}37\cdot15^{0,75}(180\cdot10^3)^{0,67}=$$
$$=85{,}3\cdot10^3\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Ūdens vārīšanās temperatūra spiedienā 15 MPa:

$$t_s=342{,}1\ ^\circ\mathrm{C}.$$

Tad sildvirsmas temperatūra

$$t_v=t_s+\frac{q}{\bar{\alpha}}=342{,}1+\frac{180\cdot10^3}{85{,}3\cdot10^3}=344{,}2\ ^\circ\mathrm{C}.$$

2.6.3. Aprēķināt siltumatdeves koeficientu un siltuma plūsmu sausa piesātināta ūdens tvaika plēves kondensācijā uz vertikālas caurules ārējās virsmas, ja tvaika spiediens 0,618 MPa, caurules virsmas temperatūra $t_v=140\ ^\circ C$, caurules diametrs $d=40$ mm un augstums $H=1{,}6$ m.

Atrisinājums. Vispirms 2.10. un 2.11. tabulā atrod kondensāta fizikālos parametrus:
$r=2082$ kJ/kg; $\nu=0{,}191\cdot10^{-6}$ m²/s; $\lambda=0{,}683$ W/(m·K);
$t_s=160$ °C; $\rho=907{,}4$ kg/m³; $\mathrm{Pr}=1{,}10$.

Nosaka kondensāta plūsmas relatīvo garumu raksturojošo līdzības skaitli (izteiksme (2.72)):

$$Z=\mathrm{Ga}^{0,33}\frac{\lambda\Delta t}{r\rho\nu}\,.$$

Šeit Galileja skaitlis (izteiksme (2.73))

$$\mathrm{Ga}=\frac{gH^3}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot1{,}6^3}{(0{,}191\cdot10^{-6})^2}=1{,}1\cdot10^{15}.$$

Tad

$$Z=(1{,}1\cdot10^{15})^{0,33}\frac{0{,}683(160-140)}{2082\cdot10^3\cdot907{,}4\cdot0{,}191\cdot10^{-6}}=3482.$$

Tā kā $Z>2300$, tad kondensāta plūsmas režīms caurules lejasdaļā ir turbulents. Tas nozīmē, ka uz virsmas kopumā plūsmas režīms ir jaukts, jo augšdaļā tas ir laminārs. Tāpēc siltumatdeves aprēķinam jāizmanto izteiksme (2.70):

$$\bar{\alpha}=\frac{1}{4}\,\frac{r\rho\nu}{\Delta tH}\,[253+0{,}069\,\mathrm{Pr}^{0,5}(Z-2300)\,(\mathrm{Pr}/\mathrm{Pr}_v)^{0,25}]^{1,33}=$$
$$=\frac{2082\cdot10^3\cdot907{,}4\cdot0{,}191\cdot10^{-6}}{4(160-140)1{,}6}\left[253+0{,}069\cdot1{,}1^{0,5}(3482-\right.$$
$$\left.-2300)\left(\frac{1{,}10}{1{,}23}\right)^{0,25}\right]^{1,33}=6463\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Šeit $\mathrm{Pr}_v=1{,}23$ izraudzīts virsmas temperatūrā (140 °C).

Siltuma plūsma

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_s-t_v)=6463\cdot3{,}14\cdot0{,}04\cdot1{,}6(160-140)=$$
$$=25{,}98\cdot10^3\ \text{W}.$$

2.6.4. Atrisināt 2.6.3. uzdevumu, ja caurule novietota horizontāli.

Atrisinājums. Vispirms pārbauda kondensāta plūsmas režīmu. Šim nolūkam izskaitļo Ga un Z.

$$\text{Ga}=\frac{gd^3}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot0{,}04^3}{(0{,}191\cdot10^{-6})^2}=1{,}72\cdot10^{10};$$

$$Z=\text{Ga}^{0,33}\frac{\lambda\Delta t}{r\rho\nu}=$$

$$=(1{,}72\cdot10^{10})^{0,33}\frac{0{,}683\cdot20}{2082\cdot10^3\cdot907{,}4\cdot0{,}191\cdot10^{-6}}=90{,}3<2300.$$

Tā kā kondensāta plēves plūsmas režīms ir laminārs, tad siltumapmaiņas koeficientu nosaka pēc formulas (2.71):

$$\bar{\alpha}=0{,}725\left(\frac{g\lambda^3\rho r}{\nu\Delta td}\right)^{0,25}\varepsilon_t.$$

2.5. tabulā atrod kondensāta parametrus caurules virsmas temperatūrā $t_v=140\,^\circ\text{C}$:
$\lambda_v=0{,}685\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$; $\mu_v=201\cdot10^{-6}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$. Piesātinājuma temperatūrā (160 °C) $\mu=174\cdot10^{-6}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$.

Tad labojuma koeficients (izteiksme (2.74))

$$\varepsilon_t=\left(\frac{0{,}685^3\cdot174\cdot10^{-6}}{0{,}683^3\cdot201\cdot10^{-6}}\right)^{0,125}=0{,}98$$

un

$$\bar{\alpha}=0{,}725\left(\frac{9{,}81\cdot0{,}683^3\cdot907{,}4\cdot2082\cdot10^3}{0{,}191\cdot10^{-6}\cdot20\cdot0{,}04}\right)^{0,25}0{,}98=$$

$$=9962\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}.$$

Siltuma plūsma

$$\Phi=\bar{\alpha}S(t_s-t_v)=9962\cdot3{,}14\cdot0{,}04\cdot1{,}6\cdot20=40\cdot10^3\ \text{W}.$$

2.6.5. Aprēķināt, cik daudz sausa piesātināta tvaika kondensēsies uz vertikālas taisnstūrveida virsmas 1 stundā, ja virsmas augstums $H=0{,}5$ m, platums $b=2{,}1$ m. Tvaika spiediens 0,3614 MPa, virsmas temperatūra 130 °C.

Atrisinājums. Lai noteiktu kondensāta plūsmas režīmu, jāaprēķina Galileja skaitlis (izteiksme (2.73)) un līdzības skaitlis

Z (izteiksme (2.72)). 2.10. tabulā atrod kondensāta fizikālos parametrus piesātinājuma temperatūrā $t_s=140\,^\circ\text{C}$:
$\nu=0{,}212\cdot10^{-6}\ \text{m}^2/\text{s}$; $\lambda=0{,}685\ \text{W/(m}\cdot\text{K)}$; $\rho=926{,}1\ \text{kg/m}^3$; $\text{Pr}=1{,}23$; $\mu=201\cdot10^{-6}\ \text{Pa}\cdot\text{s}$.

2.11. tabulā atrod iztvaikošanas (kondensācijas) siltumu:

$$r=2145\ \text{kJ/kg}.$$

Galileja skaitlis

$$\text{Ga}=\frac{gH^3}{\nu^2}=\frac{9{,}81\cdot0{,}5^3}{(0{,}212\cdot10^{-6})^2}=27{,}3\cdot10^{12}$$

un

$$Z=\text{Ga}^{0,33}\frac{\lambda\Delta t}{r\rho\nu}=$$

$$=(27{,}3\cdot10^{12})^{0,33}\frac{0{,}685(140-130)}{2145\cdot10^3\cdot926{,}1\cdot0{,}212\cdot10^{-6}}=442.$$

Tā kā $Z<2300$, tad kondensāta plēves plūsmas režīms ir laminārs un siltumatdeves aprēķinam jāizmanto formula (2.69):

$$\bar{\alpha}=0{,}95\frac{r\rho\nu}{\Delta tH}Z^{0,78}\varepsilon_t.$$

Lai noteiktu labojuma koeficientu ε_t (formula (2.74)), no 2.10. tabulas izraksta kondensāta parametru vērtības sienas virsmas temperatūrā $t_v=130\,^\circ\text{C}$:

$$\lambda_v=0{,}6855\ \text{W/(m}\cdot\text{K)};\quad \mu_v=219\cdot10^{-6}\ \text{Pa}\cdot\text{s}.$$

Tad

$$\varepsilon_t=\left(\frac{\lambda_v^3}{\lambda^3}\frac{\mu}{\mu_v}\right)^{0,125}=\left(\frac{0{,}6855^3\cdot201\cdot10^{-6}}{0{,}685^3\cdot219\cdot10^{-6}}\right)^{0,125}=0{,}99$$

un

$$\bar{\alpha}=\frac{0{,}95\cdot2145\cdot10^3\cdot926{,}1\cdot0{,}212\cdot10^{-6}}{10\cdot0{,}5}442^{0,78}\cdot0{,}99=$$

$$=9167\ \text{W/(m}^2\cdot\text{K)}.$$

Siltuma plūsma kondensācijas procesā no visas virsmas

$$\Phi=\alpha S(t_s-t_v)=9167\cdot0{,}5\cdot2{,}1(140-130)=96{,}3\cdot10^3\ \text{W}.$$

Kondensētā tvaika daudzums 1 stundā:

$$M=\frac{3600\Phi}{r}=\frac{3600\cdot96{,}3\cdot10^3}{2145\cdot10^3}=161{,}6\ \text{kg}.$$

2.7. ŠĶIDRO METĀLU SILTUMATDEVE

Aprēķinu izteiksmes

Laminārām plūsmām apaļās caurulēs ($Re<2300$):

1) $t_v=\mathrm{const}$.

Ja $Pe\frac{d}{l}>12$, tad

$$Nu=1{,}61\left(Pe\frac{d}{l}\right)^{0{,}33}; \quad (2.75)$$

ja $Pe\frac{d}{l}<12$, tad

$$Nu=3{,}66; \quad (2.76)$$

2) $q_v=\mathrm{const}$.

$$Nu=4{,}36. \quad (2.77)$$

Turbulentām plūsmām ($Re>10^4$): ja $100<Pe<2\cdot10^4$, tad

$$Nu=5+0{,}0021\,Pe. \quad (2.78)$$

Aprēķinu piemēri

2.7.1. Apaļa šķērsgriezuma caurulē plūst šķidrs litijs (Li) ar ātrumu $w=2{,}6$ m/s. Caurules iekšējais diametrs $d=14$ mm, garums $L=1{,}8$ m. Litija vidējā temperatūra $t_s=400$ °C. Caurules sienas iekšējās virsmas temperatūra $t_v=300$ °C.

Aprēķināt siltumatdeves koeficientu un siltuma plūsmas lineāro blīvumu.

Atrisinājums. Vispirms jānosaka Re un Pe skaitļi. Šim nolūkam speciālā literatūrā (piemēram, [2.3]) atrod litija fizikālos parametrus temperatūrā t_s:

$$\lambda=47{,}1\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad a=2{,}2\cdot10^{-5}\ \mathrm{m^2/s};\quad \nu=81{,}7\cdot10^{-8}\ \mathrm{m^2/s}.$$

Tad

$$Re=\frac{wd}{\nu}=\frac{2{,}6\cdot0{,}014}{81{,}7\cdot10^{-8}}=44\,550.$$

Tā kā $Re>10^4$, tad siltumatdevi aprēķina pēc formulas (2.78):

$$Nu=5+0{,}0021\,Pe,$$

kur

$$Pe=\frac{wd}{a}=\frac{2{,}6\cdot0{,}014}{2{,}2\cdot10^{-5}}=1655.$$

Tad

$$Nu=5+0{,}0021\cdot1655=8{,}48$$

un siltumatdeves koeficients

$$\alpha=\frac{\lambda Nu}{d}=\frac{47{,}1\cdot8{,}48}{0{,}014}=28{,}5\cdot10^3\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

Siltuma plūsmas lineārais blīvums

$$q_L=\alpha\pi d(t_s-t_v)=28{,}5\cdot10^3\cdot3{,}14\cdot0{,}014(400-300)=$$
$$=125{,}3\cdot10^3\ \mathrm{W/m}.$$

2.7.2. Pa 1,5 m garu caurulīti ar iekšējo diametru $d=10$ mm plūst nātrijs 17 kg/h. Caurulīti apsilda ar elektrību, tāpēc siltuma plūsmas blīvums $q_v=\mathrm{const}$. Nātrija vidējā temperatūra $t_s=400$ °C.

Aprēķināt siltumatdeves koeficientu.

Atrisinājums. Atrod (grāmatā [2.3] vai [2.9]) nātrija fizikālos parametrus:

$$\lambda=68{,}7\ \mathrm{W/(m\cdot K)};\quad \nu=33{,}0\cdot10^{-8}\ \mathrm{m^2/s};\quad \rho=845\ \mathrm{kg/m^3};$$
$$a=6{,}33\cdot10^{-5}\ \mathrm{m^2/s}.$$

Vispirms nosaka nātrija plūsmas režīmu. Šim nolūkam izskaitļo plūsmas ātrumu:

$$w=\frac{4M}{\pi d^2\rho3600}=\frac{4\cdot17}{3{,}14\cdot0{,}01^2\cdot854\cdot3600}=0{,}0704\ \mathrm{m/s}.$$

Reinoldsa skaitlis

$$Re=\frac{wd}{\nu}=\frac{0{,}0704\cdot0{,}01}{33\cdot10^{-8}}=2133.$$

Tā kā $Re<2300$, tad plūsmas režīms ir lamināra un siltumatdeves aprēķinam jāizmanto izteiksme (2.77), jo $q_v=\mathrm{const}$:

$$Nu=4{,}36.$$

Tad

$$\alpha=\frac{\lambda Nu}{d}=\frac{68{,}7\cdot4{,}36}{0{,}01}=29\,953\ \mathrm{W/(m^2\cdot K)}.$$

2.7.3. Atrisināt 2.7.2. uzdevumu, ja caurules sienas virsmas temperatūra $t_v=\mathrm{const}$.

Atrisinājums. Tā kā iepriekš noteicām Reinoldsa skaitli un konstatējām, ka plūsmas režīms ir laminārs, tad aprēķiniem jāizmanto izteiksme (2.75) vai (2.76). Nosaka

$$Pe\frac{d}{L}=\frac{wd}{a}\frac{d}{L}=\frac{0{,}0704\cdot0{,}01\cdot0{,}01}{6{,}33\cdot10^{-5}\cdot1{,}5}=0{,}0741.$$