



Materiāls ir izdots ar Eiropas Sociālā fonda līdzfinansēta projekta
„Siltumenerģētikas un siltumtehnikas bakalaura un maģistra profesionālo
programmu uzlabošana” līdzekļiem

Latvijas Lauksaimniecības universitāte
Rīgas Tehniskā universitāte

Raimunds Šeļegovskis

Metodiskie norādījumi praktiskajiem darbiem
LLU TF Lauksaimniecības enerģētikas specialitātei
studiju kursā

Siltumzinību pamati

Jelgava 2006

Ievads

Šis mācību metodiskais līdzeklis paredzēts uzdevumu risināšanai praktiskajos darbos studiju kursā „Siltumzinību pamati” Latvijas Lauksaimniecības universitātes Lauksaimniecības enerģētikas specialitātes nepilna laika studentiem papildus teorētiskajam kursam. To var izmantot arī citu universitāšu tehnisko specialitāšu studenti. Metodiskā materiāla pirmajā daļā tiek doti galvenie pamatjēdzieni, to definīcija, matemātiskās sakarības starp parametriem. Materiāls sakārtots konspektīvi sākot ar vispārīgiem termodinamikas pamatjēdzieniem un beidzot ar konkrētu likumu un sakarību pielietojumu specifiskās nozarēs uzdevumu risināšanai. Tāpat šeit ir atrodamas skaitliskās sakarības starp dažādām siltumtehnikas parametru mērvienībām. Metodiskajā līdzeklī ietvertās sakarības ļauj atrisināt visus šeit dotos uzdevumus, ja ir izpratne par teorētisko kursu.

Tādēļ šis mācību līdzeklis nevar būt kā vienīgais materiāls Siltumzinību studiju kursa apguvei, taču tas var sniegt ieskatu par siltumzinību pamatjēdzieniem, matemātiskajām sakarībām un palīdzēt apgūt praktisko darbu uzdevumu risināšanu, kā arī var kalpot pamatjēdzienu atkārtošanai uzdevumu risināšanas procesa gaitā. Nepieciešamais paskaidrojošais materiāls uzdevumu risināšanai dots konspektīvi, bez sīkākas jautājumu analīzes un var kalpot tikai priekšstata veidošanai un galveno jēdzienu atgādināšanai un nevar aizstāt nopietnas teorētiskās studijas. Matemātiskās sakarības izvēlētas tā, lai tās atklātu dotā jēdziena, likuma vai parametra būtību, kā arī būtu izmantojamas uzdevumu risināšanai.

Uzdevumu risināšanai nepieciešamās tabulas parametru skaitlisko vērtību atrašanai meklējamas beigās norādītajos literatūras avotos.

Tehniskā termodinamika

Termodinamikas pamatjēdzieni

Termodinamika ir zinātne par enerģiju un tās īpašībām, tā pēta enerģijas pārvēršanos dažādos veidos, balstoties uz enerģijas nezūdamības likumu, kas nosaka kvantitatīvās sakarības starp enerģijas veidiem.

Termodinamiskā sistēma ir ķermeņu kopums, kas var enerģētiski mijiedarboties savā starpā un ar apkārtējo vidi.

Darba ķermenis (darba viela) ir materiāls jeb viela, kas kalpo siltuma akumulēšanai un pārnesei.

Termodinamiskās sistēmas stāvokli raksturo noteikti fizikāli lielumi, kurus sauc par **termodinamiskās sistēmas parametriem**.

Termodinamiskās sistēmas parametri

Temperatūra.

Temperatūra raksturo termodinamiskās sistēmas un tās sastāvdaļu sasiluma pakāpi.

Temperatūras skals ir dažādas. Šajā mācību līdzeklī pārsvarā tiks izmantota SI sistēmā pieņemtā Kelvina skalas temperatūras vienība –Kelvina grāds jeb *kelvins* (K). 1 Kelvins ir 1/273,16 no ūdens trīskārša punkta temperatūras. Šo skalu sauc par absolūto temperatūras skalu un temperatūru, ko mēra Kelvinos apzīmē ar T.

Bez absolūtās skalas šajā mācību līdzeklī, kur tas ir piemērotāk, tiks lietota arī simtgrādu jeb Celsija temperatūras skala. Celsija skalā temperatūras mērvienība ir Celsija grāds ($^{\circ}\text{C}$). Temperatūru, kas izteikta Celsija grādos, apzīmē ar t.

1 kelvins skaitliski ir vienāds ar 1°C ($1\text{K} = 1^{\circ}\text{C}$).

Sakarība starp absolūto un simtgrādu skalu:

$$T = t + 273,15$$

$$t = T - 273,15$$

Bez šīm skalām pasaulē lieto arī citas temperatūras skalas, piemēram Fārenheita skalu, kur temperatūras mērvienība ir Fārenheits (F).

Sakarība starp temperatūru pēc Celsija un Fārenheita skalas:

Spiediens

Spiediens ir spēks, ar kādu ķermenis iedarbojas uz virsmas laukuma vienību. Spiedienu apzīmē ar p. Spiediena mērvienība SI sistēmā ir *paskāls* (P). Paskāls raksturo spēku ņūtonos uz kvadrātmetru ($\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$). Biežāk lietotās mērvienības ir $\text{kPa} = 10^3 \text{ Pa}$ un $\text{MPa} = 10^6 \text{ Pa}$. Praksē izplatīta spiediena mērvienība ir *bārs* ($\text{bar} = 10^5 \text{ Pa}$).

Sakarības starp spiediena mērvienībām ir dotas 1. tabulā, kuru var izmantot, lai veiktu pārrēķinu uz citu spiediena mērvienību.

Apkārtējā vidē pastāv atmosfēras radītais spiediens, kuru sauc par *atmosfēras jeb barometrisko spiedienu* p_b .

Spiedienu, kas darbojas uz trauka iekšējo virsmu, sauc par *absolūto spiedienu* p_a .

Starpību starp absolūto un atmosfēras spiedienu sauc par *pārspiedienu jeb manometrisko spiedienu* p_m :

$$p_m = p_a - p_b.$$

Ja absolūtais spiediens traukā ir mazāks par barometrisko spiedienu, tad to starpību sauc par retinājumu p_v :

$$p_v = p_b - p_a.$$

1. tabula

Sakarības starp spiediena mērvienībām

Mēvienība	Pa (N/m ²)	MPa	Normālā fizikālā atmosfēra	Tehniskā atmosfēra, a t (kgf/cm ²)	mm H ₂ O (kgf/m ²)	mm Hg
Pa	1	10 ⁻⁶	0,987*10 ⁻⁶	10,2*10 ⁻⁶	0,102	7,5*10 ⁻³
Mpa	10 ⁶	1	9,87	10,2	102*10 ³	7,5*10 ³
Normālā fizikālā atmosfēra	101 325	0,101 325	1	1,033	1,033*10 ⁴	760
Tehniskā atmosfēra kgf/cm² (at)	9,81*10 ⁴	9,81*10 ⁻²	0,9678	1	10 ⁴	735,6
mm H₂O	9,81	0,981*10 ⁻⁵	9,68*10 ⁻⁵		1	7,36*10 ⁻²
mm Hg	133,3	1,333*10 ⁻³	1,316*10 ⁻³	13,6*10 ⁻⁴	13,6	1

Piemērs: dots spiediens 760 mm Hg, jāizsaka šis spiediens Pa..
 No 1. tabulas nolasa sakarību starp Pa un mm Hg.
 $p = 760 * 133,3 = 101\,308 \text{ Pa}$

Īpatnējais tilpums

Īpatnējais tilpums v ir darba vielas ar masu 1 kg ieņemtais tilpums. Īpatnējo tilpumu mēra m³/kg.

$$v = \frac{V}{M}$$

kur: V – darba vielas kopējais tilpums, m³,
 M darba vielas masa, kg.

Īpatnējam tilpumam apgriezts lielums ir blīvums ρ , kg/m³.

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}$$

Enerģētiskie parametri

Enerģijas daudzuma mērvienības

SI sistēmā džouls J ($1\text{kJ}=10^3\text{J}$).

Praksē siltumenerģijas mērīšanai lieto arī citas mērvienības:

kalorija cal ($\text{kcal}=10^3\text{cal}$);

kilovatstunda kWh.

Ārzemēs siltuma daudzuma mērīšanai lieto arī britu termisko vienību (*British Thermal Unit*) Btu .

2. tabulā dotas sakarības starp enerģijas mērvienībām.

2.tabula

Sakarības starp enerģijas mērvienībām

Mērvienība	kJ	kcal	kWh	Btu
kJ	1	0,23885	$2,7778 \cdot 10^{-4}$	0,9479
kcal	4,1868	1	$1,168 \cdot 10^{-3}$	3,9698
kWh	3600	859,85	1	3412
Btu	1,055	0,2519	$2,931 \cdot 10^{-4}$	1

Piemērs: dots siltuma daudzums $Q = 3300$ kcal, pārrēķināt to kJ un kWh

No 2. tabulas nolasa sakarību starp kcal un kJ un kWh.

$Q = 3300 \cdot 4,1868 = 13816,44$ kJ vai $Q = 3300 \cdot 1,168 \cdot 10^{-3} = 0,385$ kWh.

Iekšējā enerģija

Iekšējā enerģija ir termodinamiskās sistēmas pilnās enerģijas daļa, kuru nosaka sistēmas iekšējais stāvoklis.

Iekšējo enerģiju apzīmē ar U , mērvienība J (kJ). Iekšējo enerģiju, kura piemīt vienai masas vienībai (kg), sauc par īpatnējo iekšējo enerģiju, apzīmē ar u , mērvienība J/kg (kJ/kg).

Entalpija

Termodinamiskās sistēmas iekšējās enerģijas un tilpuma enerģijas summu sauc par entalpiju. To sauc arī par siltuma saturu. Entalpiju apzīmē ar H (dažreiz ar I), mērvienība J (kJ). Entalpiju, attiecinātu uz vienu masas vienību (kg) sauc par īpatnējo entalpiju un apzīmē ar h (dažreiz ar i), mērvienība J/kg (kJ/kg).

$$H = U + pV$$

$$h = u + pv$$

$$dh = du + pdv + vdp$$

Entropija ir termodinamiskās sistēmas stāvokļa funkcija, ko var izteikt kā funkciju no citiem termodinamiskajiem parametriem. Entropiju apzīmē ar S , mērvienība J/K (kJ/K).

Entropiju, izteiktu uz vienu masas vienību (kg) sauc par īpatnējo entropiju, apzīmē ar s , mērvienība J/kg*K (kJ/kg*K).

$$ds = \frac{dq}{T}.$$

Termodinamiskais process

Par **termodinamisko procesu** sauc termodinamiskās sistēmas stāvokļa parametru secīgu izmaiņu laikā.

Termodinamiskais process var būt atgriezenisks vai neatgriezenisks, kā arī tiešs vai apgriezts.

Termodinamiskajā procesā kāds no darba ķermeņa parametriem var būt nemainīgs. Tādā gadījumā tos sauc par termodinamikas **pamatprocesiem** un šādam procesam ir īpašs nosaukums:

- $v = \text{const}$ – izohorisks process;
- $p = \text{const}$ – izobārisks process;
- $t = \text{const}$ – izotermisks process;
- $q = \text{const}$ – adiabātisks process.

Vispārinātu termodinamisko procesu sauc par politropisku procesu, un ar to var izteikt jebkuru procesu, ieskaitot iepriekšminētos pamatprocesus.

Ideāla gāze

Lai vienkāršotu gāzu un tvaiku kopējo īpašību definēšanu, izmanto pieņemtu gāzes modeli - ideālu gāzi. Par **ideālu gāzi** sauc gāzes modeli, kas sastāv no absolūti nedeformējamām molekulām, kurām nav tilpuma un nav savstarpējās mijiedarbības. Šajā apakšnodaļā ideāla gāze vienkāršoti tiks saukta par gāzi.

Gāzes stāvokļa vienādojums

Galvenos gāzes termodinamiskos parametrus saista gāzes stāvokļa vienādojums:

$$pV = MRT,$$

vai 1 kg gāzes:

$$pv = RT,$$

kur: R – individuālā gāzes konstante, J/kg·K;

M – gāzes masa, kg.

Individuālā gāzes konstante ir darba daudzums, ko paveic 1 kg gāzes izplešoties, ja tās temperatūru paaugstina par 1K.

Gāzes konstanti, kas attiecināta uz 1 molu gāzes, sauc par **universālo gāzu konstanti** R_μ , mērvienība J/mol·kg. Universālā gāzu konstante visām gāzēm ir vienāda, un skaitliski $R_m = 8314 \text{ J/mol} \cdot \text{kg}$. Savstarpējā sakarība:

$$R = \frac{R_\mu}{\mu}.$$

Gāzu maisījumi

Gāzu maisījums veidoja mehāniski sajaucoties dažādām gāzēm, kurām ir dažādas fizikālo, t. sk. arī termodinamisko parametru vērtības. Atsevišķa gāze gāzu maisījumā rada parciālo spiedienu. Par dotās gāzes **parciālo spiedienu** p_i sauc spiedienu, ko

atsevišķā gāze pie dotās temperatūras radītu dotajā tilpumā, ja tā atrastos tajā viena pati. Gāzes kopējo spiedienu p veido parciālo spiedienu summa:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n = \sum_{i=1}^n p_i .$$

Par dotās gāzes **parciālo tilpumu** (jeb reducēto tilpumu) V_i sauc tilpumu, ko ieņemtu šī gāze, ja dotajā temperatūrā tā atrastos visa maisījuma kopējā spiedienā p .

$$V_i = \frac{p_i}{p} V ,$$

kur V – maisījuma kopējais tilpums.

Gāzu maisījuma, kuru veido atsevišķas komponentes, sastāvu, var izteikt:

- **masas daļās** m_i , kas ir atsevišķās komponentes masa M_i attiecināta pret kopējo maisījuma masu M :

$$m_i = \frac{M_i}{M} ;$$

$$\text{un} \quad m_1 + m_2 + \dots + m_n = \sum_{i=1}^n m_i = 1 .$$

- **tilpuma daļās** r_i , kas ir atsevišķās komponentes parciālais tilpums V_i attiecināts pret kopējo maisījuma tilpumu V :

$$r_i = \frac{V_i}{V} ;$$

$$\text{un} \quad r_1 + r_2 + \dots + r_n = \sum_{i=1}^n r_i = 1 .$$

Gāzu maisījuma konstanti R_m var aprēķināt:

$$R_m = R_1 m_1 + R_2 m_2 + \dots + R_n m_n = \sum_{i=1}^n R_i m_i ,$$

kur R_n – attiecīgās komponentes individuālā gāzes konstante.

Ja procesā, kurā siltuma apmaiņa ar vidi nenotiek, tiek sajauktas vairākas gāzes ar dažādu masu M_i katra ar individuālu temperatūru T_i un adiabatās pakāpes rādītāju k_i , tad maisījuma temperatūru un tilpumu spiedienā p var aprēķināt sekojoši:

$$T_m = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} p_i V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{k_i}{k_i - 1} \frac{p_i V_i}{T_i}} ;$$

$$V_m = \frac{T_m}{p} \sum_{i=1}^n \frac{p_i V_i}{T_i}$$

Vielas īpatnējā siltumietilpība

Par vielas **īpatnējo siltumietilpību** sauc siltuma daudzumu, kas jāpievada vielas daudzuma vienībai, lai tās temperatūru paceltu par vienu kelvinu.

Atkarībā no vielas daudzuma vienības izšķir sekojošus siltumietilpības veidus:

1. masas īpatnējā siltumietilpība, ja siltuma daudzumu attiecina uz 1 kg, apzīmē c , mērvienība J/kg*K;
2. tilpuma īpatnējā siltumietilpība, ja siltuma daudzumu attiecina uz 1 m³ (normālos apstākļos), apzīmē c' , mērvienība J/m³*K;
3. molārā īpatnējā siltumietilpība, ja siltuma daudzumu attiecina uz 1 molu, apzīmē c_μ , mērvienība J/mol*K;

Sakarības starp siltumietilpībām:

$$c = \frac{c_\mu}{\mu} = c' v$$

$$c' = \frac{c_\mu}{22,4} = c \rho$$

$$c' = \frac{c}{v}$$

Ja process norisinās pie nemainīga spiediena, iegūst siltumietilpību konstantā spiedienā, ko apzīmē attiecīgi: c_p , c'_p , $c_{\mu p}$.

Ja process norisinās nemainīgā tilpumā, iegūst siltumietilpību konstantā tilpumā, ko apzīmē attiecīgi: c_v , c'_v , $c_{\mu v}$.

Izmantojot siltumietilpību, var aprēķināt ķermenim pievadīto siltuma plūsmu un daudzumu no avota vai aizvadīto siltuma daudzumu.

Ķermenim pievadīto (vai aizvadīto) siltuma daudzumu Q , ja zināma ķermeņa masa M , var aprēķināt:

$$Q = Mc(T_2 - T_1).$$

Siltuma plūsmu jeb avota siltuma jaudu N (W), ko saņem ķermenis, var aprēķināt:

$$N = \frac{Q}{\tau},$$

kur: τ – laika periods, s

Bieži vien, lai aprēķinātu ar siltumnesēju pārnestā siltuma daudzumu, ir nepieciešams aprēķināt caurplūstošo siltumnesēja masu jeb caurplūdi caur kanālu vai cauruli ar noteiktu šķērsriezuma laukumu. To var veikt pēc sakarības:

$$M = \rho w S,$$

kur: M – caurplūde, kg/s;

w – plūsmas ātrums, m/s;

S – kanāla vai caurules šķērsriezuma laukums, m².

Pirmais termodinamikas likums

Darba ķermenim pievadītais siltums Q var veikt ārēju darbu L un izmainīt ķermeņa enerģiju E .

$$dQ = dL + dE$$

Ja darba ķermenis nemaina savu atrašanās vietu telpā, 1. termodinamikas likums vienkāršojas:

$$dq = du + dl = du + p dv$$

Integrējot šo izteiksmi, iegūst:

$$q = u_2 - u_1 + \int_{v_1}^{v_2} p dv$$

Termodinamikas pamatprocesi

Izohorisks. Termodinamisko procesu, kas noris konstantā tilpumā ($v=\text{const}$), sauc par izohorisku procesu. Spēkā sekojošas galvenās sakarības:

$$\frac{p}{T} = \text{const}$$

$$dq = du$$

$$q = u_2 - u_1 = c_{vm}(T_2 - T_1)$$

$$l = 0$$

Izbārisks. Termodinamisko procesu, kas noris pie konstantā spiediena ($p=\text{const}$), sauc par izobārisku procesu. Spēkā sekojošas galvenās sakarības:

$$\frac{v}{T} = \text{const}$$

$$dq = du = p dv = c_p dT = dh$$

$$q = u_2 - u_1 + (v_2 - v_1)p$$

$$q = h_2 - h_1 = c_{pm}(T_2 - T_1)$$

$$l = p(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$$

Izotermisks. Termodinamisko procesu, kas noris konstantā temperatūrā ($T=\text{const}$), sauc par izotermisku procesu. Spēkā sekojošas galvenās sakarības:

$$pv = \text{const}$$

$$du = 0$$

$$dq = dl$$

$$q = l = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

Adiabātisks. Termodinamisko procesu, kas noris nenotiekot siltuma apmaiņai starp darba ķermeni un apkārtējo vidi, ($q=\text{const}$), sauc par adiabātisku procesu. Spēkā sekojošas galvenās sakarības:

$$pv^k = \text{const}$$

$$dl = -du$$

$$dq = 0$$

$$l = u_1 - u_2 = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2)$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

kur: k – adiabatās pakāpes rādītājs.

Politropisks. Vispārinātu termodinamisko procesu, kurš pie noteiktiem apstākļiem var raksturot jebkuru iepriekš minēto, sauc par politropisku procesu. Spēkā sekojošas galvenās sakarības:

$$pv^n = \text{const}$$

$$l = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{RT}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)$$

$$\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^n, \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{n-1}, \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{n-1}{n}}$$

kur: n – politropas pakāpes rādītājs.

Reālas gāzes

Ūdens tvaiks

Galvenie raksturlielumi:

T_s – **vārīšanās temperatūra** pie dotā spiediena

x – **sausuma pakāpe** (tvaika saturs), izsaka sausa tvaika masu 1 kg mitra tvaika.

$T - T_s$ – tvaika **pārkarsēšanas pakāpe** (raksturo pārkarsētu tvaiku un vienāda ar starpību starp tvaika temperatūru un tvaika vārīšanās temperatūru pie dotā spiediena).

Ūdens tvaiks eksistē vairākos veidos.

3. tabula

Ūdens tvaika veidi

Tvaika stāvoklis	Raksturojums	Temperatūra	Sausuma pakāpe
Mitrs	Sastāv no sausa tvaika un ūdens pilieniem	$T = T_s$	$0 < x < 1$
Sauss piesātināts	Sastāv tikai no tvaika	$T = T_s$	$x = 1$
Pārkarsēts	Sastāv tikai no tvaika	$T > T_s$	$x = 1$

Atbilstoši tvaika stāvoklim tā parametrus raksturo ar attiecīgu indeksu, kā dots sekojošā tabulā.

Tvaika parametru apzīmējumi

Parametrs	Šķidrumam (0 °C)	Verdošam šķidrumam	Mitram tvaikam	Sausam piesātinātam tvaikam	Pārkarsētam tvaikam
Īpatnējais tilpums, m ³ /kg	v_0'	v'	v_x	v''	v
Entalpija, J/kg	h_0'	h'	h_x	h''	h
Entropija, J/kg*K	s_0'	s'	s_x	s''	s
Iekšējā enerģija, J/kg	u_0'	u'	u_x	u''	u

Tvaika parametru skaitliskās vērtības ir apkopotas tvaika tabulās atkarībā no spiediena vai temperatūras.

Iztvaikošanas siltums r (J/kg) ir siltuma daudzums, kas jāpievada 1 kg šķidra ūdens piesātināšanās stāvoklī, lai to pilnīgi pārvērstu sausā piesātinātā tvaikā.

$$r = \rho + \psi,$$

kur: ρ – iekšējais iztvaikošanas siltums, J/kg ($\rho = u'' - u'$);

ψ – ārējais iztvaikošanas siltums, J/kg ($\psi = p(v'' - v')$).

Tvaika iekšējās enerģijas aprēķins:

$$u'' = u' + \rho$$

$$u_x = u' + \rho x$$

$$u = u'' + q_p - p(v - v'') = h - pv$$

Ar q_p apzīmē siltumu, kas pievadīts sausam piesātinātam tvaikam tā pārkarsēšanai līdz dotajai pārkarsēšanas pakāpei. To sauc par pārkarsēšanas siltumu.

Tvaika entalpijas aprēķins:

$$h'' = h' + r$$

$$h_x = h' + rx = h' + (h'' - h')x$$

$$h = h'' + q_p$$

Tvaika entropijas aprēķins:

$$s' = c_{pm} \ln \frac{T_s}{T_{tr}}$$

$$s'' = s' + \frac{r}{T_s}$$

$$s_x = (1 - x)s' + s''x$$

$$s = s'' + c_{pm} \ln \frac{T}{T_s}$$

T_{tr} ir ūdens trīskāršā punkta temperatūra.

Tvaika sausuma pakāpi var aprēķināt:

$$x = \frac{m''}{m' - m''} = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{h'' - h'} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'}$$

Tvaika mitruma pakāpi var aprēķināt:

$$y = 1 - x.$$

Tā, kā mitrs tvaiks sastāv gan no šķidruma daļiņām gan tvaika fāzes, tad mitra tvaika parametru aprēķinos tiek ņemts vērā vērā katras fāzes īpatsvars kopējā lielumā.

Mitrs gaiss

Par **mitru gaisu** sauc sausa gaisa un tajā esošā ūdens tvaika maisījumu. Temperatūru, kurā gaisā esošais ūdens tvaiks pie dotā gaisa spiediena kļūst par piesātinātu, sauc par **rasas punktu**.

Gaisa mitrumu var izteikt ar sekojoši:

absolūtais mitrums: absolūtais mitrums ir vienāds ar kilogramos izteiktu ūdens tvaika masu vienā kubikmetrā mitra gaisa, apzīmē ρ_d (kg/m^3);

relatīvais mitrums: relatīvais mitrums ir absolūtā gaisa mitruma attiecība pret maksimāli iespējamo mitrumu attiecīgajā temperatūrā un spiedienā, apzīmē φ (%);

$$\varphi = \frac{\rho_d}{\rho_s} 100\%$$

mitruma saturs; mitruma saturs ir gaisā esošā ūdens tvaika masas attiecība pret sausā gaisa masu, apzīmē x ($\text{kg}_{\text{mitr}}/\text{kg}_{\text{sg}}$):

$$x = \frac{\rho_d}{\rho_g} = 0,622 \frac{p_d}{p - p_d},$$

kur: p_d – gaisā esošā ūdens tvaika parciālais spiediens, Pa.

Mitruma satur var izteikt arī gramos uz kilogramu sausa gaisa, apzīmē d ($\text{g}_{\text{mitr}}/\text{kg}_{\text{sg}}$):

$$d = \frac{\rho_d}{\rho_g} 1000 = 622 \frac{p_d}{p - p_d} = 622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s},$$

kur: p_s – tvaika parciālais spiediens mitra gaisa temperatūrā (var noteikt no tvaika tabulām pie dotās temperatūras).

Sakarības starp mitra gaisa parametriem:

$$\varphi = \frac{pd}{p_s(622 + d)}$$

$$p_d = \frac{pd}{622 + d}$$

Termodinamiskie cikli

Par **termodinamisko ciklu** sauc secīgi notiekošu termodinamisko procesu kopumu, kuru gaitā darba ķermenis mainot savu stāvokli, atgriežas sākotnējā stāvoklī. **Tiešajos ciklos** (piemēram, siltuma dzinēju cikli) darbu iegūst, **apgrieztajos ciklos** (piemēram, saldēšanas iekārtu cikli, kompresoru cikli) darbu patērē.

Termodinamiskā cikla efektivitāti raksturo ar termodinamiskā cikla **termisko lietderības koeficientu** η_t , kas izsaka darbā pārvērstā siltuma attiecību atgriezeniskā ciklā pret kopējo pievadīto siltuma daudzumu šī cikla gaitā.

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{q_o}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1};$$

kur: q_o – darbā pārvērsta siltuma daudzums;
 q_1 – ciklam pievadītais siltuma daudzums;
 q_2 – cikla gaitā aizvadītais siltuma daudzums.

Vislielāko siltuma daudzumu darbā var pārvērst tādā ciklā, kas sastāv no divām izotermām un divām adiabatām. Šādu ciklu sauc par **Karno ciklu**. Karno cikla lietderības koeficientu var izteikt:

$$\eta_t^k = \frac{T' - T''}{T'} = 1 - \frac{T''}{T'},$$

kur: T^I un T^{II} – darba ķermeņa temperatūra izotermisko procesu laikā.
Darbu termodinamiskā ciklā var izteikt kā starpību starp ciklam pievadīto un ciklam novadīto siltuma daudzumu:

$$l = q_1 - q_2 \text{ vai } L = Q_1 - Q_2$$

Pievadīto siltuma daudzumu Karno ciklā var aprēķināt:

$$q_1 = RT^I \ln \frac{v_2}{v_1},$$

kur: v_1 un v_2 – darba ķermeņa īpatnējais tilpums augšējās izotermas (izplešanās procesa) sākuma un beigu punktā;
 T^I – darba ķermeņa temperatūra augšējā izotermiskā (izplešanās) procesā.

Pievadīto siltuma daudzumu Karno ciklā var aprēķināt:

$$q_2 = RT^{II} \ln \frac{v_3}{v_4},$$

kur: v_3 un v_4 – darba ķermeņa īpatnējais tilpums apakšējās izotermas (saspiešanas procesa) sākuma un beigu punktā;
 T^{II} – darba ķermeņa temperatūra apakšējā izotermiskā (saspiešanas) procesā.

Tā, kā reālā ciklā vienmēr pastāv zudumi, tad visi reālie cikli ir ar zemāku lietderības koeficientu nekā atgriezeniskais cikls. Neatgriezeniskā Karno cikla iekšējo lietderības koeficientu var noteikt sekojoši:

$$\eta_i = \frac{l_i}{q_i},$$

kur: l_i – neatgriezeniska cikla darbs, ņemot vērā zudumus.

Karno cikla procesus raksturo adiabatās un izotermas sakarības, kuras var izmantot, lai

noteiktu cikla raksturīgo punktu parametrus:

izotermām:

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2},$$

kur: p_1 un v_1 – spiediens un īpatnējais tilpums izotermas sākuma punktā;
 p_2 un T_2 – spiediens un īpatnējais tilpums izotermas beigu punktā;

adiabātām:
$$p_2 = p_3 \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{\frac{k}{k-1}},$$

kur: k – adiabatās pakāpes rādītājs;
 p_2 un T_2 – spiediens un temperatūra adiabatās sākuma punktā;
 p_3 un T_3 – spiediens un temperatūra adiabatās beigu punktā;

Attiecību q/T sauc par reducēto siltumu. Argriezeniskā Karno ciklā reducēto siltumu summa ir vienāda ar nulli.

$$\sum \frac{q}{T} = 0,$$

$$\text{jeb } \frac{q_1}{T_1} - \frac{q_2}{T_2} = 0.$$

Siltumapmaiņa

Par **siltumapmaiņu** sauc siltumenerģijas izplatīšanās procesu ķermeņos vai ķermeņu sistēmās.

Siltumapmaiņa var notikt trīs veidos:

siltuma vadīšana – iespējama cietos, šķīdros un gāzveida ķermeņos, notiek saskaroties atomiem un molekulām,

konvekcija – iespējama šķīdumos un gāzēs, notiek sajaucoties un pārvietojoties lielām molekulu grupām (ir brīvā un piespiedu konvekcija),

siltuma starošana (siltuma radiācija) – notiek ar elektromagnētisko viļņu starpniecību.

Siltumapmaiņu konvekcijas ceļā starp cietu ķermeni un šķidrumu vai gāzi sauc par **siltumatdevi**.

Siltumatdevi starp diviem siltumnesējiem caur atdalošo sienību sauc par **siltumpāreju**.

Siltuma daudzumu, kas laika vienībā izplūst caur izotermisku virsmu, kuras laukums ir S , sauc par **siltuma plūsmu** Φ (W).

Siltuma plūsmu attiecinātu uz virsmas laukuma vienību sauc par **siltuma plūsmas blīvumu** q (W/m²). Cilindriskai virsmai siltuma plūsmu attiecinātu uz ķermeņa garuma vienību L sauc par **lineāro siltuma plūsmas blīvumu** q_L (W/m).

Ja temperatūra atsevišķos ķermeņa punktos laikā nemainās, apmaiņas process ir **stacionārs**, ja temperatūra atsevišķos ķermeņa punktos laikā mainās – **nestacionārs** (silsana, dzišana).

Siltumapmaiņa stacionārā procesā

Furjē likums: siltuma daudzums dQ , kas izplūst caur izotermiskas virsmas elementu dS laikā $d\tau$, ir proporcionāls temperatūras gradientam.

Siltuma plūsmas blīvumu q (W/m²) var aprēķināt:

$$q = \frac{dQ}{dS d\tau}.$$

Siltuma plūsmu Φ (W=J/s) caur izotermisku virsmu, var aprēķināt:

$$\Phi = \frac{dQ}{d\tau}.$$

Ja siltuma plūsma ir laikā nemainīga, tad to var aprēķināt:

$$\Phi = \frac{q}{\tau}.$$

Siltuma plūsma starp cieta ķermeņa virsmu un šķidrumu vai gāzi aptuveni ir aprēķināma pēc **Nūtona** vienādojuma:

$$\Phi = \alpha S (T_1 - T_2),$$

kur: α – **siltumatdeves koeficients** W/m²*K, kas izsaka siltuma daudzumu, kas plūst starp cieta ķermeņa virsmu un šķidrumu vai gāzi, ja starpība starp sienas virsmas temperatūru T_1 un šķidruma vai gāzes temperatūru T_2 ir 1 K.

Siltuma plūsmas blīvumu caur vienslāņa plāksni, ja dotas virsmas temperatūras, var aprēķināt:

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

kur: t_{v1} un t_{v2} – plāksnes virsmu temperatūras, $^{\circ}\text{C}$;
 δ – plāksnes biezums, m;
 λ – **siltumvadītspējas koeficients**, $\text{W/m}^{\circ}\text{K}$, kas ir vienāds ar siltuma daudzumu, kas 1 s izplūst caur 1 m^2 lielu virsmu, ja temperatūras gradients ir 1 K/m .

Siltuma plūsmas blīvumu caur daudzslāņu plāksni, ja dotas virsmas temperatūras var aprēķināt:

$$q = \frac{t_{v1} - t_{v2}}{\sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i}},$$

kur: n – slāņu skaits.

Siltuma plūsmu caur plāksni var aprēķināt:

$$\Phi = qS,$$

kur: S – plāksnes virsmas laukums, m^2 .

Siltuma plūsmu caur plāksni starp diviem siltumnesējiem, ja dotas šo siltumnesēju temperatūras, var aprēķināt:

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

kur: t_{s1} un t_{s2} – siltumnesēju temperatūras, $^{\circ}\text{C}$;
 k – siltumpārejas koeficients plāksnei.

Siltuma plūsmas blīvumu caur daudzslāņu plāksni, ja dotas siltumnesēju temperatūras var aprēķināt:

$$q = \frac{\Phi}{S} = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{k} = \frac{t_{s1} - t_{sv2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_2}},$$

kur: α_1 un α_2 – siltumatdeves koeficienti virsmām, $\text{W/m}^2\text{K}$.

Temperatūru uz vienslāņa plāksnes virsmas var aprēķināt:

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

un

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

Temperatūru uz daudzslāņu plāksnes ārējās virsmas vai atsevišķo slāņu saskarvirsmas, ja slāņu skaits ir n , var aprēķināt:

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

$$\text{vai} \quad t_{k,k+1} = t_{s2} + q \left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} \right).$$

Vienslāņa cilindriskai virsmai, piemēram, caurulei, lineāro siltuma plūsmas blīvumu q_L (W/m) var aprēķināt:

$$q_l = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{1}{2\pi \lambda} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}} = \frac{\Phi}{L}.$$

Tuvinātiem aprēķiniem, ja $d_2/d_1 < 2$, var izmantot sakarību:

$$q_l = \frac{t_{v1} - t_{v2}}{\frac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda}}.$$

Daudzslāņu cilindriskai virsmai, piemēram, izolētai caurulei lineāro siltuma plūsmas blīvumu q_L (W/m) var aprēķināt:

$$q_l = \frac{t_{v1} - t_{vn+1}}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\pi \lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\pi d_{n+1} \alpha_{n+1}}}.$$

Tuvinātiem aprēķiniem, ja $d_2/d_1 < 2$, var izmantot sakarību:

$$q_l = \frac{t_{v1} - t_{vn+1}}{\frac{1}{\pi d_1 \alpha_1} + \frac{\delta}{\pi d_{vid} \lambda} + \frac{1}{\pi d_2 \alpha_2}}.$$

Siltuma plūsmu caur ribotu plāksni var aprēķināt:

$$\Phi = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{m \alpha_2}} S_1 = \frac{t_{s1} - t_{s2}}{m \left(\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} \right) + \frac{1}{\alpha_2}} S_2,$$

kur: m – apribojumuma koeficients ($m = S_2/S_1$);
 S_1 – gludās puses virsmas laukums;
 S_2 – ribotās puses virsmas laukums.

Siltumapmaiņa brīvā konvekcijā

Brīvā konvekcija notiek atsevišķu šķidruma vai gāzes daļiņu nevienmērīgas sasilšanas rezultātā. Vairāk sasilstās daļiņas, kurām ir augstāka temperatūra, ir ar mazāku blīvumu, kā rezultātā tās ceļas uz augšu. Radusies plūsma var būt lamināra vai turbulenta. Pie lamināras plūsmas, atsevišķi slāņi plūst paralēli nesajaucoties un siltumpāreja notiek vadīšanas ceļā. Pie turbulentas plūsmas veidoja virpuļi, slāņi sajaucas un siltums tiek pārnesti arī konvekcijas ceļā, līdz ar to siltuma plūsmas

pāreja ir intensīvāka. Pārejot plūsmai no lamināras uz turbulentu vai otrādi, veidojas pārejas režīms.

Plūsmas režīmu raksturo Reinoldsa skaitlis Re :

$$Re = \frac{wd}{\nu},$$

kur: w – plūsmas ātrums, m/s;

d – plūsmas (caurules) šķērsriezuma diametrs, m;

ν – kinemātiskā viskozitāte, m^2/s .

Ja $Re \leq 2300$, plūsma ir lamināra, ja $2300 < Re < 3000 \dots 4000$, plūsmai ir pārejas režīms, ja $Re \geq 4000$, plūsmai ir turbulents režīms.

Siltumatdevi no gāzveida vielas apkārtējā vidē (piem., gaisa) uz sienīņu vai otrādi vertikāli novietotai caurulei raksturo Nuselta skaitlis Nu :

$$Nu = \frac{\alpha_{vid} l}{\lambda},$$

kur: l – raksturīgais izmērs virsmai (caurules garums, virsmas augstums), gar kuru notiek siltumatdeve;

α_{vid} – vidējais siltumatdeves koeficients, $W/m^2 \cdot K$.

Nuselta skaitlis horizontāli novietotas caurules ārējai virsmai:

$$Nu = \frac{\alpha_{vid} d}{\lambda},$$

kur: d – caurules ārējais diametrs.

Siltumatdevi brīvā konvekcijā var aprēķināt nosakot Nuselta skaitli pēc sekojošas sakarības:

$$Nu = C(Gr Pr_s)^n \left(\frac{Pr_s}{Pr_v} \right)^{0,25},$$

kur: Gr – Grashofa skaitlis;

Pr_v – Prandlta skaitlis virsmai;

Pr_s – Prandlta skaitlis gāzei vai šķidrumam, kas dots tabulās;

C – eksperimentāls koeficients, kas dots tabulās.

Gāzei $Pr_s/Pr_v = 1$.

Grashofa skaitli var aprēķināt:

$$Gr = \frac{gl^3 \beta \Delta t}{\nu^2},$$

kur: g – brīvās krišanas paātrinājums ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$);

Δt – temperatūru starpība starp siltumnesēju un virsmu, K ;

β – tilpumiskās izplešanās koeficients gāzei ($\beta = \frac{i}{T}$), K^{-1} .

Siltuma plūsmu var aprēķināt sekojoši:

$$\Phi = \alpha_{vid} S(t_v - t_s).$$

Siltumapmaiņa starošanas ceļā

Jebkurš ķermenis, kura temperatūra ir lielāka par absolūto nulli ($T > 0$ K), izstaro siltuma enerģiju infrasarkanā starojuma veidā. Jo augstāka temperatūra, jo vairāk siltuma tiek izstarots. Ķermeņa virsma, savukārt, absorbē to siltumu, ko izstaro citi ķermeņi. Tas nozīmē, ka siltumapmaiņa notiek arī starp ķermeņiem, kam ir vienāda virsmu temperatūra. Virsmas saņemto siltuma enerģiju ķermenis var gan absorbēt, gan laist cauri, kā arī atstarot.

Par **absorbējamības koeficientu** A sauc absorbētā siltuma daudzuma attiecību pret kopējo saņemto.

Par **atstarošanas koeficientu** R sauc atstarotā siltuma daudzuma attiecību pret kopējo saņemto.

Par **caurlaidības koeficientu** D sauc caurlaistā siltuma daudzuma attiecību pret kopējo saņemto.

$$A + D + R = 1$$

Izšķir integrālo un monohromatisko starojumu.

Par **integrālo starojumu** sauc summāro ķermeņa virsmas starojumu visos viļņu garumos no $\lambda_v = 0$ līdz $\lambda_v = \infty$ (λ_v – viļņa garums).

Par **monohromatisko starojumu** sauc starojumu šaurā viļņu garumu diapazonā no λ_v līdz $\lambda_v + d\lambda$.

Starotās siltuma enerģijas daudzumu, kas laika vienībā krīt uz kādu konkrētu virsmas laukumu, sauc par **starojuma plūsmu** Φ (W).

Starojuma plūsmu kas krīt uz virsmu ar laukumu 1 m^2 , sauc par **starojuma plūsmas blīvumu jeb intensitāti** E (W/m^2).

Dotās virsmas starošanas intensitātes attiecību pret absolūti melnas (siltuma starojuma izpratnē) virsmas starošanas intensitāti pie vienādiem apstākļiem sauc par **virsmas melnuma pakāpi** ε . Virsmu melnuma pakāpe ir noteikta eksperimentāli un ir robežās starp 0 un 1.

Siltuma daudzumu jeb starojuma intensitāti, ko laika vienībā izstaro ķermeņa virsma ar temperatūru T un laukumu 1 m^2 , var aprēķināt pēc sakarības:

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

kur: C_0 - absolūti melna ķermeņa starošanas koeficients $C_0 = 5,67 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$.

Siltuma plūsmas blīvumu starp divām virsmām, starp kurām notiek siltuma starošana, var aprēķināt:

$$q_{1-2} = \varepsilon_r C_0 \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \varphi_s,$$

kur: ε_r – divu paralēlu virsmu reducētā melnuma pakāpe

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_1 \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 - \varepsilon_1 \varepsilon_2} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1};$$

φ_s – starošanas leņķa koeficients (paralēlām virsmām $\varphi_s = 1$).

Siltumatdeve iztvaikošanas apstākļos

Pievadot traukam, kurā atrodas šķidrums, pie nelielas temperatūras starpības starp virsmu un šķidrumu, ja šķidruma temperatūra pārsniedz tā piesātināšanās temperatūru, sāk rasties tvaika burbulīši. Tie atraujas no sienas un ceļas uz augšu radot intensīvu brīvo konvekciju, kas nosaka siltuma pārejas intensitāti. To sauc par **kodolveida iztvaikošanu**. Šis process iztvaikojot ūdenim norisinās pie temperatūru starpības starp trauka sienas virsmu un šķidrumu, kas nepārsniedz 5 K. Paaugstinoties temperatūru starpībai robežas no 5 līdz 25 K, pastiprinās tvaika burbulīšu rašanās un strauji pieaug siltuma atdeve no sienas uz šķidrumu. Temperatūru starpībai pārsniedzot 25 K, atsevišķie burbulīši saplūst kopā un veidojas tvaika plēve, kas pasliktina siltumatdevi. Šādu procesu sauc par **plēves veida iztvaikošanu**. Pie kodolveida iztvaikošanas vidējo siltumatdeves koeficientu α_{vi} ūdenim lielā tilpumā aptuveni var aprēķināt pēc empīriskām sakarībām:

$$\alpha_{vi} = 3,8 p^{0,2} q^{0,67}, \text{ ja absolūtais spiediens ir } 0,1 \leq p \leq 3,0 \text{ MPa} \\ (1 \leq p \leq 30 \text{ bar}),$$

vai

$$\alpha_{vi} = 0,6 p^{0,75} q^{0,67}, \text{ ja absolūtais spiediens ir no } 3,0 \leq p \leq 20 \text{ MPa} \\ (30 \leq p \leq 200 \text{ bar}).$$

Abās augstāk dotajās formulās spiediena vērtība ir jāievieto MPa.

Mājas darba uzdevumi studiju kursā

Siltumzinību pamati

1.daļa

L/s enerģētikas specialitātes nepilna laika studentiem

Varianta izvēle: pēc pēdējiem diviem studenta apliecības (matrikulas) numura cipariem:

no 1...14 variants atbilst šiem cipariem
 no 15...28 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 14
 no 29...42 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 28
 no 43...56 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 42
 no 57...70 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 56
 no 71...84 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 70
 no 85...98 skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 84
 no 99(00=100)skaitlis, ko veido divi pēd. cipari - 98

Piemēram: ja matrikulas numurs ir 991227, tad varianta numurs ir: 27-14=13 variants

Gāzu parametru aprēķins

1. Tvertnē pie temperatūras $T_1^{\circ}\text{C}$ ar vakuumu p_v mm H_2O staba atrodas slāpeklis. Barometriskais spiediens 1 bar. Atrast slāpekļa blīvumu.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$T_1^{\circ}\text{C}$	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51
p_v mm H_2O	475	480	485	490	495	500	505	510	520	515	520	515	520	525

Gāzu maisījuma parametru aprēķins

2. No katlu mājas viena katla kopējā skurstenī ieplūst dūmgāzes ar daudzumu V_1 m^3/h temperatūru T_1 K un $k_1=c_p/c_v=1,33$, no otra V_2 m^3/h , T_1 K un $k_2=1,32$. Atrast dūmgāzu maisījuma temperatūru un kopējo tilpumu, ja tā spiediens vienāds ar barometrisko spiedienu apkārtējā vidē.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
V_1 m^3/h	6000	6500	6800	7000	7200	7500	8000	9400	9500	9800	10000	11000	11500	12000
T_1 K	430	425	400	460	445	440	415	418	425	420	455	450	443	440
V_2 m^3/h	10000	11000	11500	12000	10000	12500	8500	9000	9500	8900	7500	8900	8000	10000
T_2 K	443	445	480	500	480	490	460	470	480	470	433	423	425	463

Siltuma jaudas aprēķins

3. Katlu mājā vienā diennaktī sadedzina B tonnas akmeņogļu ar zemāko sildspēju 26500 kJ/kg. Katlu iekārtas lietderības koeficients ir η . Aprēķināt katlu mājas jaudu.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
B, t	1,5	1,8	0,8	2,0	2,5	2,7	3,0	2,8	4	4,5	3,2	1,6	1,8	2,2

η	0,75	0,78	0,76	0,79	0,82	0,8	0,74	0,78	0,82	0,74	0,78	0,8	0,82	0,8
--------	------	------	------	------	------	-----	------	------	------	------	------	-----	------	-----

Zemākā sildspēja ir siltuma daudzums, ko iegūst pilnīgi sadedzinot 1 kg (gāzveida kurināmiem parasti 1m³) dotā kurināmā atskaitot kurināmā mitruma iztvaicēšanai patērēto siltuma daudzumu.

Siltuma daudzuma aprēķins

4. Elektriskais sildītājs vienā stundā uzsilda M kg gaisa no temperatūras t_1 , °C uz t_2 , °C. Atrast sildītāja elektrisko jaudu.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
M, kg	400	425	450	475	500	550	500	475	450	550	600	400	300	250
t_1 , °C	18	15	20	22	15	12	10	8	11	15	17	21	20	16
t_2 , °C	30	35	40	35	30	35	40	35	30	28	32	34	42	45

5. Elektrosildītājs ar ražīgumu V m³/h (pie 30°C) uzsilda gaisu no sākuma temperatūras t_1 , °C līdz t_2 , °C. Gaisa siltumietilpība $c_{pm}=1,006$ kJ/kg K, barometriskais spiediens $p_b=760$ mmHg. Atrast patērēto siltuma daudzumu 1 m³ uzsildīšanai un sildītāja jaudu.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
V, m ³ /h	30	28	25	32	40	45	60	55	65	70	55	56	40	30
t_1 , °C	30	35	40	35	30	35	40	35	30	28	32	34	42	45
t_2 , °C	60	65	70	65	60	65	80	65	65	55	60	60	60	80

6. Vara lode ar diametru d 30 minūšu laikā uzsilst no sākotnējās temperatūras t_1 līdz vidējai temperatūrai t_2 . Aptuvenais vidējais vara blīvums $\rho = 8950$ kg/m³, siltumietilpība $c_p = 0,395$ kJ/kg*K. Aprēķināt pievadīto siltuma daudzumu, vidējo siltuma plūsmu un siltuma plūsmas blīvumu uz lodes virsmas laukuma vienību.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
d, cm	8	9	10	11	12	8	9	10	11	12	12	11	10	9
t_1 , °C	100	95	90	90	90	95	100	95	85	85	90	95	100	105
t_2 , °C	145	150	155	150	155	150	150	155	150	155	150	150	155	150

7. Mājas gaisa apsildes sistēmas taisnstūrveida šķērsriezuma gaisa vada sekcija ar garumu L un šķērsriezuma izmēriem 20x25 cm iet cauri neapsildītiem pamatiem. Karsts gaiss ieplūsts gaisa vadā ar spiedienu 100 kPa, temperatūru t_1 un vidējo plūsmas ātrumu w. Siltuma zudumu dēļ gaisa temperatūra nokrīt līdz t_2 . Aprēķināt siltuma zudumus 1 stundā un zudumu izmaksas, ja gaiss tiek sildīts ar elektrisko sildītāju. Elektroenerģijas cena 0,049 Ls/kWh.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
L, m	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	5,5	5	4,5	4	3,5	5	5,5
w, m/s	5	5	5	4,5	4,5	4,5	4	4	4	5,5	5,5	5,5	4,5	4,5
t_1 , °C	60	65	70	65	60	65	70	65	65	55	60	60	60	65
t_2 , °C	56	59	65	58	55	59	64	58	61	49	57	54	56	59

Termodinamiskie cikli

8. Karno cikls noris no maksimālās temperatūras $t_{\max}$ un spiediena $p_{\max}$ uz minimālo temperatūru $t_{\min}$ un spiedienu $p_{\min}$. Darba ķermenis ir gaiss ar masu 1 kg. Aprēķināt cikla raksturīgo punktu parametrus, iegūto darbu un termisko lietderības koeficientu.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t_{\max}, ^\circ\text{C}$	727	747	757	753	743	723	718	713	723	727	733	743	748	750
$p_{\max}, \text{MPa}$	5	4,8	4,7	4,9	5,1	5,2	5	5,1	5	4,8	5,2	5,2	5,1	5,1
$t_{\min}, ^\circ\text{C}$	127	127	127	132	132	132	127	127	127	132	132	132	127	127
$p_{\min}, \text{Mpa}$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Ūdens tvaika parametru aprēķins

9. Tvaika katlā atrodas M tonnas mitra ūdens tvaika ar sausuma pakāpi x un spiedienu P, MPa. Cik siltuma jāpievada, lai paceltu spiedienu par 0,9 MPa, un kādai jābūt katla jaudai, lai to veiktu τ stundās?

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
M, t	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,1	2,2	2,4
x	0,01	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,05
P, MPa	0,6	0,6	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,5	0,6	0,7	0,6	0,5	0,4	0,6
τ , h	2	1,5	1,5	1	2	2	1,5	3	2,5	2	1,5	2	2,5	1

Mitra gaisa parametru aprēķins

10. Gaisu ar relatīvo mitrumu ϕ un sākotnējo temperatūru t_1 atdzesē līdz t_2 . Aprēķināt ūdens daudzumu, kas izdalās no 1kg gaisa kondensējoties un atrast temperatūru, pie kuras sākas kondensācija. Gaisa spiediens 745 mm Hg.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ϕ	75	75	80	85	85	90	60	65	50	55	60	65	70	60
$t_1, ^\circ\text{C}$	45	40	40	38	40	35	50	55	60	60	55	50	45	40
$t_2, ^\circ\text{C}$	10	14	12	14	10	12	14	12	10	8	10	12	14	12

Siltumpāreja

Siltumvadīšana caur plāksni

1. Aprēķināt siltuma zudumus caur ārsienu, kas sastāv no gāzbetona ar biezumu δ_{GB} , akmens vates kārtas ar biezumu δ_{AV} cm un režģīša plāksnes ar biezumu 13 mm. Telpas gaisa temperatūra T_i °C ārējais temperatūra T_A °C. Siltumatdeves koeficienti no ārsienas uz apkārtējo vidi $\alpha_1=21$ W/m²K, no iekšsienas uz telpas vidi $\alpha_2=8$ W/m²K.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
δ_{GB} , cm	20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25	30	20	25
δ_{AV} , cm	10	5	3	15	10	5	10	7,5	3	5	10	3	10	5
T_i , °C	20	18	22	20	18	24	16	18	19	20	18	16	20	18
T_A , °C	-5	-3	-10	-15	-5	-15	-2	0	-5	3	5	-10	0	-5

Siltumvadīšana caur cilindrisku virsmu

2. Aprēķināt siltuma zudumus caur neizolētu tērauda cauruļvadu siltumvadīšanas ceļā, ja pa cauruli plūst karsts ūdens ar t_{s1} , apkārtējā gaisa t_{s2} . Caurules iekšējais diametrs ir d_1 , ārējais d_2 , Siltumatdeves koeficienti no ūdens uz cauruli $\alpha_1=1250$ W/m²K, no caurules uz gaisu $\alpha_2=12,5$ W/m²K.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t_{s1} °C	95	100	105	110	120	85	80	90	95	90	85	90	85	90
t_{s2} °C	15	12	18	8	15	10	15	10	12	16	5	8	10	6
d_1 , cm	9	7	5	9	9	6	5	4	6	7	9	7	4	6
d_2 , cm	10	8	6	10	10	7	6	5	7	8	10	8	5	7

Siltumvadīšana caur ribotu plāksni

3. Aprēķināt siltuma plūsmu caur S_1 , m² lielu vienaspusēji ribotu vara plāksni ar biezumu 5 mm, ja ribotās virsmas laukums ir S_2 , m², gludo virsmu apskalo siltumnesējs ar temperatūru t_{s1} °C un $\alpha_1=250$ W/m²K, riboto ar temperatūru t_{s1} °C un $\alpha_2=12$ W/m²K.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
t_{s1} °C	95	100	105	110	120	85	80	90	95	90	85	90	85	90
t_{s2} °C	20	15	20	15	25	20	16	20	18	15	20	22	12	10
S_1 , m ²	0,1	0,12	0,14	0,15	0,16	0,18	0,2	0,17	0,16	0,15	0,14	0,1	0,08	0,1
S_2 , m ²	0,3	0,33	0,25	0,4	0,5	0,3	0,5	0,3	0,25	0,35	0,28	0,36	0,16	0,25

Brīvā konvekcija

4. Aprēķināt siltuma plūsmu konvekcijas ceļā no 1 m garas caurules, pa kuru plūst tvaiks, ja caurules virsmas temperatūra ir t_v °C, apkārtējās vides temperatūra t_s °C. Caurule novietota horizontāli un tās ārējais diametrs d mm.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
l, m	5	6	7	8	7	6	5	4	5	6	7	8	6	4
$t_v, ^\circ C$	100	105	110	115	120	125	130	140	145	150	155	100	95	90
$t_s, ^\circ C$	20	15	20	15	25	20	16	20	18	15	20	22	12	10
d, mm	100	110	120	125	130	135	140	145	150	100	110	120	130	140

Siltuma starošana

5. Aprēķināt siltuma plūsmu starošanas ceļā no 4. uzdevumā dotā cauruļvada, ja tā izgatavota no tērauda velmējot.
6. Termosā atrodas ūdens ar temperatūru t_1 . Iekšējās virsmas temperatūra praktiski vienāda ar ūdens temperatūru, ārējās virsmas temperatūra ir t_2 . Starp sienām atrodas vakuums, tās ir apsūdrabotas un to melnuma pakāpe $\varepsilon=0,02$. Atrast siltuma plūsmu starp termosā sienām.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
$t_1, ^\circ C$	86	88	90	92	94	96	98	97	95	93	91	89	87	85
$t_2, ^\circ C$	20	15	20	15	25	20	16	20	18	15	20	22	12	10

Siltumatdeve iztvaikošanas apstākļos

7. Aprēķināt siltumatdeves koeficientu no katla sieniņas virsmas uz verdošu ūdeni, ja tajā notiek ūdens kodolveida iztvaikošana. Ūdens spiediens ir p , katla iekšējās virsmas temperatūra ir t_v un siltuma plūsma caur katla sieniņu ir Q . Sieniņas virsmas laukums ir $2 m^2$.

Variants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
P, Mpa	0,44	0,8	1,0	1,4	2,0	3,0	4,0	6,0	10,0	12,0	14,0	15,0	8,0	5,0
$t_v, ^\circ C$	152	174	184	198	215	235	253	278	312	326	338	344	296	265
Q, kW	196	158	190	142	313	91	224	205	112	173	189	299	100	83

Ieteicamā literatūra:

1. J. Nagla, P.Saveljevs, A.Cars. Siltumtehnikas aprēķini piemēros. Rīga, "Zvaigzne", 1982. – 310 lpp.
2. J. Nagla, P.Saveljevs, A.Cars. Siltumtehnikas pamati. Rīga, "Zvaigzne", 1981. – 356 lpp.