

DAGNIJA BLUMBERGA

ENERGOEFEKTIVĀTE



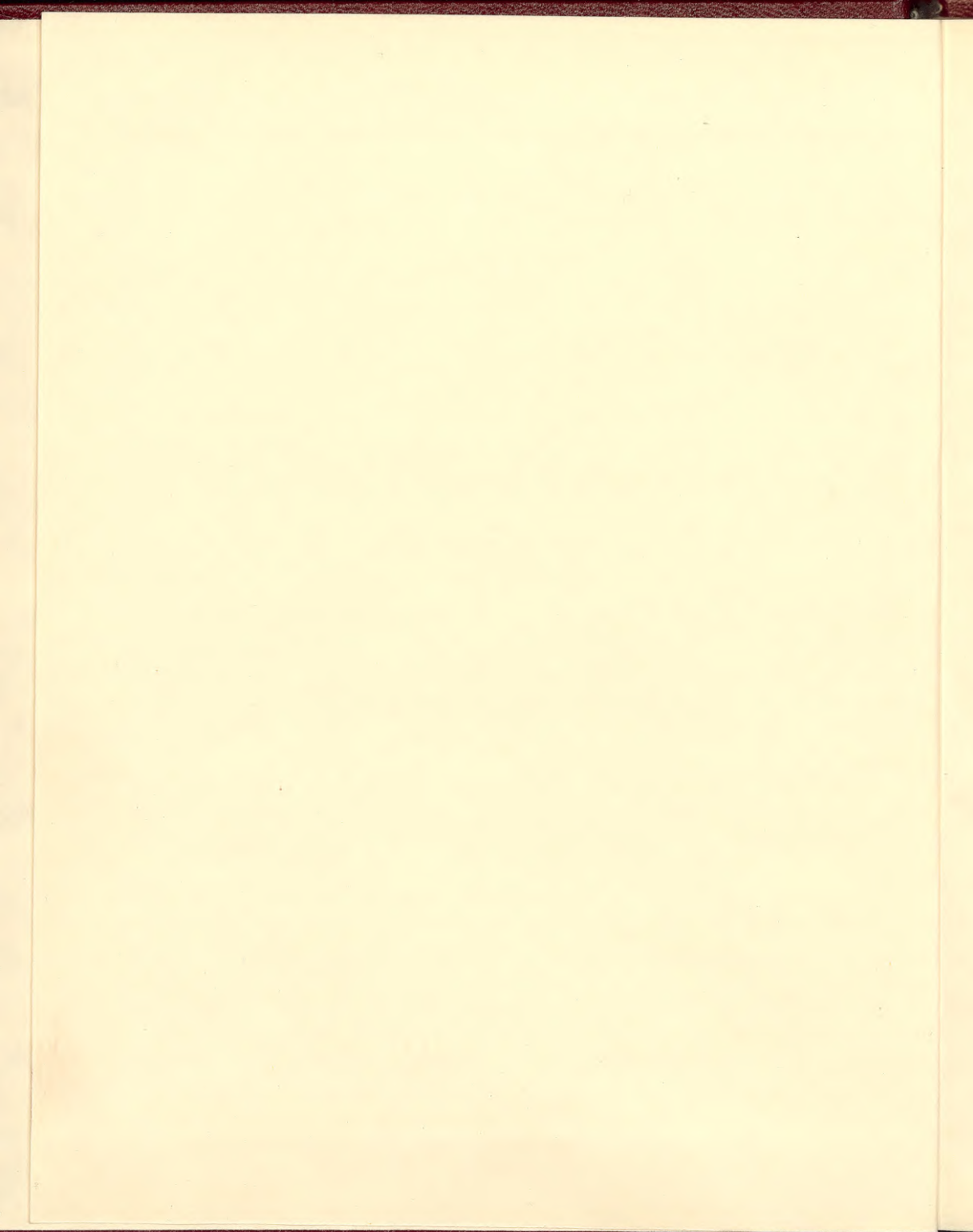
ENERGOEFEKTIVĀTE

DAGNĪA BLUMBERGA

ENERGOEFEKTĪVĪTĀTE



ENERGOTJEKTIVITÄT



UDK 621.042

~~16-6-900~~
0303025894

Monogrāfijas autore Dagnija Blumberga ir Rīgas Tehniskās universitātes Enerģētikas institūta docente, inženierzinātņu doktore.

Monogrāfijā aplūkotas energoapgādes sistēmas un to elementu (vairāk uzmanības pievēršot siltumenerģētiskajām iekārtām) energoefektivitāte no inženiertehniskajiem, ekoloģiskajiem, ekonomiskajiem un vadības aspektiem. Tajā apkopota energoefektivitātes paaugstināšanas pieredze Latvijā un ārpus tās, kā arī uzsākta diskusija par šīm problēmām.

Redaktore: M. Grudule

Vāka mākslinieks N. Blumbergs

E. Bērziņa un J. Šataikina datorsalikums

Recenzenti: habilitētais inženierzinātņu doktors I. Veidenbergs,
ekonomikas zinātņu doktore B. Sloka

Ģertrūdes ielā 19/21 - 1, Rīgā, LV-1050, telefons 272220
Reģistrācijas apliecības Nr. 000300593

ISBN 9984-504-49-2

© Dagnija Blumberga, 1996
© Apgāds «Pētergailis», 1996

Ievads	7
1. ENERGOEFEKTIVITĀTE UN ENERGOVADĪBA	10
1.1. LATVIJAS ENERĢĒTIKAS PROGRAMMAS UN ATTĪSTĪBAS VIRZIENI.....	10
1.2. ENERGOPATĒRĒTĀJA VADĪBAS STRATĒGIJA	16
1.3. ENERĢĒTISKĀS SISTĒMAS VADĪBAS ANALĪZE UZŅĒMUMĀ.....	22
1.3.1. Energovadība rūpniecības uzņēmumā.....	22
1.3.2. Datu ieguve. Analīze	25
1.3.2.1. Regresijas analīze.....	27
1.3.2.2. Korelācijas analīze	31
1.3.3. Optimālo darbības režīmu noteikšana.....	48
1.4. PROJEKTI. REALIZĀCIJAS IESPĒJAS	52
Literatūra	55
2. ENERGOEFEKTIVITĀTES INŽENIERTEHNISKIE ASPEKTI.....	58
2.1. ENERĢIJAS PĀRVEIDE	58
2.2. KURINĀMAIS UN DEGŠANA	59
2.2.1. Kurināmā degšanas procesu enerģētiskās efektivitātes inženiertehniskais raksturojums	59
2.2.1.1. Katla lietderības koeficients.....	60
2.2.1.2. Kurināmā patēriņš.....	67
2.2.2. Katlu kurtuves. To darbības īpatnības	69
2.2.2.1. Kurtuvju konstrukcijas	69
2.2.2.2. Degšanas tehnoloģijas pamatprasības	70
2.2.2.3. Ogļu dedzināšana nekustīgā slānī	70
2.2.2.4. Dabas gāzes un mazuta degšanas procesu pētījumi.....	75
2.2.2.5. Kurināmā maiņas enerģētiskais pamatojums.....	82
2.2.2.5.1. Enerģētiskās koksnes izmantošana.....	83

2.2.2.5.2.	<i>Katlu darbības enerģētiskās efektivitātes eksperimentālā izpēte</i>	86
2.2.2.5.3.	<i>Eksperimentālo pētījumu rezultāti</i>	89
2.2.2.5.4.	<i>Enerģētiski efektīvas tehnoloģijas lietojums</i>	100
2.3.	SEKUNDĀRIE ENERGORESURSI	113
2.3.1.	Sekundārās enerģijas izmantošanas koncepcija	113
2.3.2.	Siltuma un masas apmaiņa kontaktaparātos	116
2.3.2.1.	Aprēķinu metodes	118z
2.3.2.2.	Kontaktsiltummaiņu dinamika.....	119
2.3.2.3.	Siltuma un masas apmaiņas procesu matemātiskie modeļi.....	121
2.3.2.4.	Siltuma un masas apmaiņas eksperimentālie pētījumi.....	128
2.3.2.5.	Siltuma un masas apmaiņas modeļa adekvātuma pārbaude.....	144
2.3.2.6.	Siltuma un masas apmaiņas procesu izpētes inženiertehniskais lietojums.....	148
2.3.2.6.1.	<i>Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu inženiertehniskā aprēķina metodika</i>	148
2.3.2.6.2.	<i>Kontaktsiltummaiņu darbības režīmu optimizācija</i>	149
2.3.2.6.3.	<i>Tehnoloģiskās iekārtas sekundārās enerģijas izmantošanai</i>	152
2.3.3.	Siltuma sūkņu izmantošanas pieredze	157
2.3.3.1.	Siltuma sūkņa darbība	157
2.3.3.2.	Grunts temperatūras izmaiņu izpēte.....	162
2.3.3.2.1.	<i>Grunts temperatūras izmaiņu noteikšanas modelēšana</i>	162
2.3.3.3.	Grunts temperatūras izmaiņu aprēķins un pārbaude.....	171
2.3.3.4.	Siltuma sūkņu izmantošanas enerģētiskais vērtējums.....	177

Literatūra	181
3. ENERGOEFEKTIVITĀTES EKONOMISKIE ASPEKTI.....	186
3.1. IZMAKSAS.....	186
3.1.1. Kapitālieguldījumi.....	187
3.1.1.1. Kredīta procenti.....	191
3.1.1.2. Vērtības krišanās.....	193
3.1.2. Primāro energoresursu izmaksas.....	194
3.1.2.1. Koksnes šķeldas izmaksas.....	197
3.1.3. Eksploatācijas izdevumi.....	199
3.1.4. Pastāvīgās un mainīgās izmaksas.....	200
3.2. IEGULDĪJUMU IZVĒRTĒŠANAS METODES.....	202
3.2.1. Izmaksu efektivitāte.....	203
3.2.1.1. Izmaksu efektivitātes vērtējums.....	204
3.2.1.2. Izmaksu efektivitātes nenoteiktība.....	205
3.2.2. Izvērtēšanas metodes.....	211
3.2.2.1. Neto rentabilitāte (ARR).....	212
3.2.2.2. Atmaksāšanās laiks.....	214
3.2.2.3. Diskontētā naudas plūsma (DCF).....	218
3.2.2.4. Neto pašreizējā vērtība (NPV).....	220
3.2.2.5. Iekšējā peļņa (IRR).....	223
3.2.2.6. Citi faktori projekta vērtēšanā.....	225
Literatūra	227
4. ENERGOEFEKTIVITĀTES EKOLOĢISKIE ASPEKTI.....	229
4.1. ENERĢĒTISKĀS UN EKOLOĢISKĀS SITUĀCIJAS RAKSTUROJUMS LATVIJĀ.....	230
4.1.1. Kurināmā kvalitātes izraisītās problēmas.....	230
4.1.2. Siltuma avota darbības ekoloģiskais vērtējums.....	234
4.2. IZMEŠU RAKSTUROJUMS.....	236
4.2.1. Slāpekļa oksīdu raksturojums.....	236

4.2.2.	Kurināmā degšana un sēra oksīdu veidošanās teorētiskie aspekti.....	241
4.3.	IZMEŠU NOTEIKŠANA	243
4.3.1.	Teorētiskā sēra oksīdu izmešu noteikšanas metode.....	243
4.3.2.	Izmešu eksperimentālā noteikšana.....	246
4.3.3.	Izmešu noteikšanas specifika, dedzinot ogles nekustīgā slānī.....	250
4.4.	IZMEŠU SAMAZINĀŠANAS METODES.....	254
4.4.1.	Degšanas procesu optimizācija.....	254
4.4.2.	Slāpekļa oksīdu samazināšanas izpēte	255
4.4.2.1.	Slāpekļa oksīdu tehnoloģiskā samazināšana.....	256
4.4.2.2.	Slāpekļa oksīdu samazināšanas eksperimentālā pārbaude.....	259
4.4.2.3.	Slāpekļa oksīdu samazināšanas tehnoloģiskā īstenošana.....	267
4.4.3.	Sēra oksīdu izmešu samazināšanas iespējas.....	270
4.4.4.	Putekļu un pelnu uztveršana	273
4.4.4.1.	Cieto daļiņu uztveršanas mehānismi	273
4.4.4.2.	Pelnu uztveršanas efektivitātes ciklonos	282
4.4.4.3.	Putekļu uztveršanas efektivitāte kontaktsiltummainī.....	283
4.4.4.4.	Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu konstrukcijas	289
4.4.5.	Dūmgāzu tīrīšana no gāzveida komponentiem.....	292
4.4.6.	Izmešu samazināšana kurināmā maiņas gadījumā	306
4.4.7.	Siltuma sūkņa darbības ietekme uz vidi	315
	Literatūra	316

Ievads

Energoefektivitāte nav tikai moderns termins, bez tās paaugstināšanas nav iedomājams tālākais tehnikas progress. Šīs problēmas risinājums ir mūsu valsts ekonomiskās attīstības svarīgs nosacījums. Šobrīd praktiski esam izjutuši iepriekšējo gadu desmitu vieglprātīgo attieksmi pret enerģētikas problēmām valstī, uzņēmumā, mājās. Jāmainās attieksmei, izpratnei, domāšanai un, protams, darbībai enerģētikas jomā.

Energoefektivitāti pasaulē jau sen nemēra vienīgi ar inženiertehnisko mērauklu. Tās jēdziens ietver sevī daudz dziļāku jēgu, un šī problēma jāaplūko no šādiem aspektiem:

- *stratēģiskā* (valsts enerģētikas politikas);
- *inženiertehniskā* (tehnoloģija, iekārtu darbināšana, apkalpošana, automatizācijas līmenis utt.);
- *ekonomiskā* (uzņēmuma ekonomiskā situācija, kredīta izmantošanas iespējas utt.);
- *ekoloģiskā* (valsts vides aizsardzības politikas);
- *psiholoģiskā* (uzņēmuma vadītāju izpratnes un vēlmēm);
- *filozofiskā* (sabiedrības perspektīvās attīstības).

Energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumi ir saistīti ar praktisku uzdevumu risināšanu energosaimniecībā, un bieži tie balstās uz uzņēmumu speciālistu entuziasmu. Ne vienmēr ir iespējams precīzi atbildēt uz jautājumu: "Ja es racionāli izmantošu enerģiju, cik naudas es ietaupīšu?" Laika ritumā mainās kurināmā un elektroenerģijas cenas, tehnoloģijas, ekonomiskie apstākļi valstī utt.

Varbūt, raugoties no pašreizējā patērētāja pozīcijām, nemaz nav tik būtiski vienmēr rūpēties par energoefektivitāti. Tomēr vajadzētu atcerēties, ka mēs dzīvojam valstī, kurai nav savu enerģētisko resursu (gāzes, naftas, ogļu), un mēs visi kopā esam daļiņa no Latvijas un kopīgi, tajā

saimniekojot, esam atbildīgi arī nākamo paaudžu priekšā. Šī doma caurvij monogrāfiju un ir ilustrēta ar dažādiem piemēriem.

Bieži praksē nākas salīdzināt divus atšķirīgus tehniskos risinājumus enerģijas patēriņa samazināšanai uzņēmumā:

- ar zemiem kapitālieguldījumiem un lielākiem ekspluatācijas izdevumiem;
- ar lieliem kapitālieguldījumiem un maziem ekspluatācijas izdevumiem.

Tieši pēdējais kļūst arvien aktuālāks pasaules attīstītākajās valstīs. Piemēram, Zviedrijā valdība dotē (daļēji) energoefektīvu iekārtu ražošanu, lai stimulētu to attīstību.

Iepriekšminētais rāda, ka energoefektivitātes uzdevumu risinājums ir iespējams, tikai apskatot un izgaismojot sistēmas energovadības, inženiertehniskos, ekonomikas un vides aizsardzības jautājumus mijiedarbībā. Tie ir savstarpēji saistīti uzdevumi, un to izpētes gaitā jāaplūko katra aspekta īpatsvars.

Šī monogrāfija sarakstīta, balstoties uz pieredzi, kas gūta gan rūpniecības uzņēmumos, gan pašvaldībās, pildot līgumsaistības bijušajā Padomju Savienībā, strādājot kopā visdažādākajās enerģētikas programmās pēc Latvijas neatkarības atgūšanas, piemēram, ar amerikāņiem - USAID programmas ietvaros, ar dāņiem un angļiem - ERAB kredīta programmā, ar itāļiem - demonstrējot slāpekļa oksīda samazināšanas iespējas katlu kurtuvēs Milānas energopārvaldes (AEM) termoelektrostacijā Kassano un Milānas Ziemeļu dispečercentra katlu mājā, ar portugāļiem - pētot degšanas jautājumus Setubalas termoelektrostacijā, ar zviedriem - realizējot NUTEK un VATENFALL aktivitātes, kā arī papildinot zināšanas Stokholmas Karaliskajā augstskolā, izmantojot Valenberga fonda grantu. Tā ir bezgala interesanta pieredze un laba skola, kura iegūta, ejot no projekta uz projektu, analizējot un izvērtējot, pieņemot vai nepieņemot partneru noteikumus.

Rakstot grāmatu, daudz problēmu izraisa terminoloģija. Diskusijas ar kolēģiem par jaunvārdu izmantošanu ļāva izdarīt secinājumu, ka grūti atrast precīzus, lakoniskus, latviskus terminus ar energoefektivitāti

saistītajiem jēdzieniem. Dažreiz, baidoties no svešvārda lietošanas, lietojam ne visai precīzu, bet latviešu terminu. Piemēram, angļiskā termina *energoaudit* pilns latviskais variants sastāv no septiņiem vārdiem - enerģijas ražošanas, pārvades un izmantošanas pārbaudes grupa, - kurus atmetot var pazust fizikālā jēga. Tas pats ir ar terminiem energoefektivitāte, energovadība, enerģijas taupīšana u.c.

Šī monogrāfija nav viendabīga pēc struktūras. Daži jautājumi tajā aplūkoti dziļi un pamatīgi, bet citi tikai ieskicē šobrīd aktuālas enerģētikas problēmas. Tas skaidrojams ar to, ka triju gadu desmitu garumā krātā pieredze un darbība ļāvusi tuvāk iepazīt siltuma un masas apmaiņas procesus dažādās energoiekārtās, devusi iespēju atrast sakarības to energoefektivitātes paaugstināšanai. Šī iemesla dēļ tām pievērsta īpaša uzmanība.

Autore izsaka pateicību vecākiem, ģimenei un kolēģiem Rīgas Tehniskās universitātes profesoram I. Veidenbergam, netaiķim profesoram I. Iļjinam, docentiem J. Bažbaueram un S. Valterei, inženierim V. Grišinam, ar kuriem kopā realizēts ne mazums ideju energoefektivitātes un vides aizsardzības problēmu risināšanā, kā arī Latvijas Universitātes docentei B. Slokai par piezīmēm grāmatas tapšanas stadijā. Monogrāfijas veidošanā daudz palīdzēja radošā sadarbība ar profesoru J. Bubenko un inženieri L. Johanssonu no Stokholmas Karaliskā Tehnoloģiskā institūta, inženieriem H. Nilssonu, R. Bowie un G. Knutsoni no NUTEK un inženieriem R. Martenssonu, B. Andersonu un I. Lundbergu no AF-ENERGIKONSULT Zviedrijā, profesoru V. Konoņenko no Volgogradas Tehniskā oglekļa zinātniski pētnieciskā centra, doktoru J. Stankēviču no ASV, doktoru M. Gozzi un inženieri W. Čeresa no Milānas energopārvaldes (AEM), inženieri D. Keitu no amerikāņu konsultatīvās firmas *Hagler, Bailly, Inc.*, inženieriem J. Cassano un J. Afonso no Portugāles energopārvaldes (EDP). Pārlicību par grāmatas nepieciešamību radīja darbs Latvijas energosaimniecībā un uzņēmumos: to rosināja maģistrs J. Sobko no Madonas Reģionālās vides komitejas, inženieri E. Ozoliņš no Ventspils siltumtīklu uzņēmuma, J. Gredzens no Valmieras Reģionālās vides komitejas un J. Bērziņš no Cēsu rajona pašvaldības. Paldies par palīdzību!

1. ENERGOEFEKTIVĪTĀTE UN ENERGOVADĪBA

Energovadības problēmas ir aktuālas visā pasaulē, pie kam tās tiek risinātas visdažādākajos līmeņos - gan valsts, gan energoražotāja, gan energopatērētāja līmenī. Svarīgi ir ne tikai aplūkot energovadību vienā no šiem līmeņiem, bet arī konstatēt un noskaidrot to savstarpējo saistību un mijiedarbību.

Šajā nodaļā ieskicēta valsts enerģētikas stratēģijas loma, energopolitikas ietekme uz energoefektivitātes paaugstinājumu, energopieprasījuma vadības nozīme un tās realizācija. Īpaša uzmanība pievērsta energopatērētāja uzņēmuma vadības sistēmai.

1.1. LATVIJAS ENERĢĒTIKAS PROGRAMMAS UN ATTĪSTĪBAS VIRZIENI

Pēdējo piecu gadu laikā Latvijas ekonomika nogriezās no centralizētās plānošanas labi iebrauktā ceļa uz tirgus ekonomikas taku. Šis pārmaiņas ietekmēja visu tautsaimniecību, un jo īpaši enerģētiku. Jāatceras, ka mūsu valsts ir viena no nedaudzajām, kurai nav energoresursu (gāzes, ogļu, naftas) atradņu. Tās, protams, ir būtiskākās iezīmes, bet nav vienīgās ar enerģētiku saistītās problēmas. Tāpēc enerģijas ražošanas un patēriņa jautājumi Latvijā nezaudē aktualitāti un no 1992. līdz 1994. gadam izstrādātas vismaz sešas enerģētikas programmas un koncepcijas. Par būtiskākajām uzskatot trīs no tām -

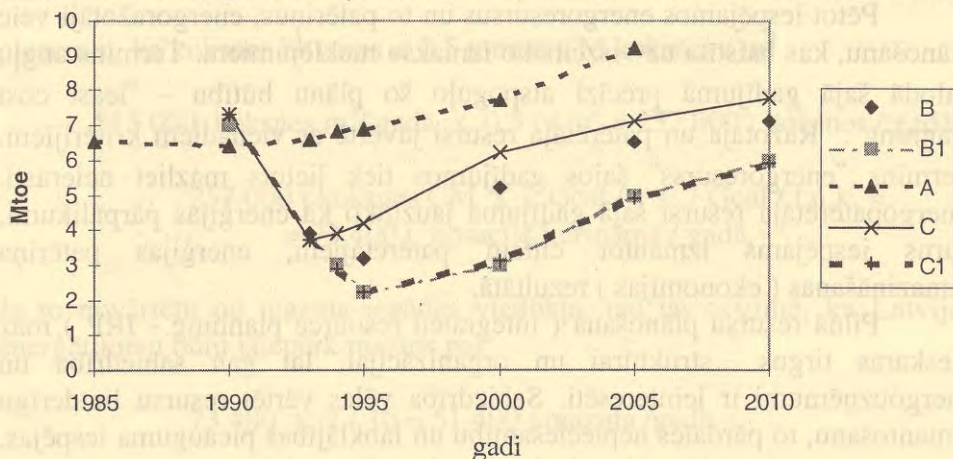
- Valsts enerģētikas programmu, 1992.g. [1.1],
- Enerģētikas attīstības programmu, 1994.g. [1.2.],

- Enerģētikas pārstrukturēšanas programmu, 1994.g. [1.3.] -

un apkopojot tajās sniegtās energoresursu patēriņu prognozes, 1.1.attēlā var redzēt, kādas tendences tiek plānotas mūsu valsts enerģētikas attīstības perspektīvā.

Grūti atzīt autoru lietoto terminu - "pesimistiskais scenārijs", jo uz enerģijas patēriņa samazinājuma tendenci vienmēr nav jālūkojas no negatīva viedokļa. Ja tam par iemeslu ir enerģijas efektivitātes paaugstinājums, tad energopatēriņa krišanās noteikti jāvērtē kā pozitīvs moments.

Tātad atklāts paliek jautājums, cik precīza ir autoru prognoze un kā izmainīsies enerģijas patēriņš Latvijā. Protams, ka atbildi uz to sniegs laiks.



1.1. att. Primāro energoresursu patēriņa prognozes Latvijā, Mtoe:

- A - Valsts enerģētikas programma,
- B - Enerģētikas pārstrukturēšanas programma (optimistiskais scenārijs),
- B₁ - Enerģētikas pārstrukturēšanas programma (pesimistiskais scenārijs),
- C - Enerģētikas attīstības programma (optimistiskais scenārijs),
- C₁ - Enerģētikas attīstības programma (pesimistiskais scenārijs).

Šeit primāro energoresursu patēriņš noteikts šķidrā kurināmā ekvivalenta tonnās (toe).

1996. gadā Rīgas Tehniskās universitātes docētāju vadībā pabeigta Latvijas Nacionālā enerģētikas programma.

Enerģētiķi var ietekmēt primāro energoresursu patēriņa līkņu izmaiņas uz vienu vai otru pusi. Energoietilpība attiecībā pret nacionālā kopprodukta vienību Austrumeiropas un Baltijas valstīs ir 2 ... 3 reizes lielāka nekā Eiropas Savienības valstīs. Paradoksāla ir situācija, ka par enerģijas, it īpaši tas attiecas uz elektroenerģiju, efektivitātes jautājumiem šobrīd vairāk rūpējas pasaules attīstītākajās valstīs: ASV, Zviedrijā, Dānijā un citās. Tas skaidrojams ar to, ka elektroenerģijas ražotāji šajās valstīs ir gatavi izstrādāt viszemāko izmaksu elektroenerģijas ražošanas plānus un ieguldīt līdzekļus to realizēšanā un tālākajā pilnveidošanā.

Pētot iespējamos energoresursus un to patēriņus, energoražotāji veic plānošanu, kas balstīta uz viszemāko izmaksu meklējumiem. Termins angļu valodā šajā gadījumā precīzi atspoguļo šo plānu būtību - "least cost planning". Ražotāja un patērētāja resursi jāvērtē ar vienādiem kritērijiem. Termins "energoresurs" šajos gadījumos tiek lietots mazliet neierasti. Energopatērētāja resursi šajā gadījumā jāuzlūko kā enerģijas pārpalikumi, kurus iespējams izmantot citiem patērētājiem, enerģijas patēriņa samazināšanas (ekonomijas) rezultātā.

Pilnā resursu plānošana (integrated resource planning - IRP) maz pieskaras tirgus struktūrai un organizācijai, lai gan sabiedrība un energouzņēmumi ir ieinteresēti. Sabiedrība vēlas vērtēt resursu lietderīgu izmantošanu, to pārdales nepieciešamību un labklājības pieauguma iespējas, bet energouzņēmumiem šie plāni ir nepieciešami, lai nospraustu biznesa stratēģiju. Atkarībā no tirgus organizācijas abas puses nav vienādi ieinteresētas atklāt savus plānus viena otrai un tāpēc sadarbībai izvēlas atšķirīgus veidus. Tādēļ būtiski ir jautājumi par līdzsvara radīšanu piegādātāja un patērētāja tirgus attiecībās [1.4.].

Energoefektivitātes paaugstināšanas ekonomiskie aspekti ļoti bieži tiek izvirzīti pirmajā plānā, aizmirstot par vidi un energoresursiem. Visvienkāršāk to ilustrēt ar piemēru vienā no Latvijas visvairāk attīstītajām rūpniecības nozarēm - kokapstrādē. Energoefektivitāte siltuma enerģijas

ražošanai, izmantojot kokapstrādes atlikumus, ir zema (parasti tā nepārsniedz 70%).

1.1. piemērs

Ja Latvijā koksni sadedzinātu efektīvāk un lietderības koeficientu paaugstinātu vidēji par 10%, un pieņemot, ka mūsu valstī gada laikā sadedzina 3,6 miljoni koksnes m^3 [1.2.], tad mums būtu iespējams iekonomēt, kas šajā gadījumā nozīmē papildus iegūt kurināmo šādā apjomā:

$$0,143 m^3 / m^3 \times 3,6 \text{ miljoni } m^3 / \text{gadā} = 515 000 \text{ koksnes } m^3 / \text{gadā},$$

pieņemot, ka koksnes blīvums ir 0,5 tonnas CM koksnes / m^3 ,

$$515 000 \text{ koksnes } m^3 / \text{gadā} \times 0,5 t / m^3 = 257 000 t \text{ koksnes} / \text{gadā}$$

$$257 000 t \text{ koksnes CM} \times 2 \text{ Gcal} / t / 7 \text{ Gcal} / t.n.k. =$$

$$= 73 400 t \text{ nosacītā kurināmā} / \text{gadā}.$$

Ja to novērtētu no mazuta iegādes viedokļa, tad tas nozīmē, ka Latvijas enerģētiķiem būtu jāiepērk mazuts par

$$73 400 \times 7 / 10 = 51 400 t \text{ mazuta} / \text{gadā}$$

mazāk vai, pārrēķinot naudas izteiksmē, tie ir:

$$51 400 \times 49 \text{ Ls} / t = 2,5 \text{ miljoni Ls} / \text{gadā}.$$

Šajā piemērā zemās enerģētiskās efektivitātes sekas aplūkotas tikai no kurināmā pārtēriņa viedokļa. Taču nedrīkst aizmirst, ka nelietderīgi sadedzinātā kurināmā degšanas procesos tikpat nelietderīgi tiek izmantota elektroenerģija dūmsūcēju, ventilatoru un kurināmā padeves sistēmu darbināšanai, lai pārvietotu papildus gaisu, dūmgāzes un koksni.

Lai prognozētu kokapstrādes tehnoloģiju ieguldījumu kurināmā pārtēriņā, informāciju var ņemt no Jaakko Poyry darba grupas pārskata [1.5.], kurā tiek paredzēts kokapstrādes atlikumu pieaugums no 0,18 milj. m³ līdz 0,82 milj. m³ gadā.

Zaudējums 2,5 miljoni latu gadā nav tikai kurināmā izmaksas, tā ir nauda, kas katru gadu neattaisnoti aizplūst uz ārzemēm un kuru mūsu valstij jācēnšas nosegt ar pakalpojumiem, saražotajām un eksportētajām precēm. Bez tam tiek izšķērdēts kurināmais, aizmirstot par to, ka nākamajām paaudzēm arī būs nepieciešama enerģija.

Lai varētu realizēt enerģijas patēriņa samazināšanos un veikt mazāko izmaksu plānošanu Latvijā, vajadzētu apzināt energoresursus gan enerģijas ražotāja, gan enerģijas patērētāja pusē. Tas ļautu noskaidrot potenciālās energopatēriņa samazināšanas iespējas.

Latvijas valdības politika enerģētikas sektorā, kura izstrādāta 1995. gadā enerģētikas valsts ministra vadībā [1.6.], atspoguļo attīstības virzienus. Svarīga vieta ierādīta ne tikai enerģijas cenu politikai, bet arī enerģijas racionālai izmantošanai. Tālāk izvērsāmās stratēģiskās tēmas Latvijas enerģētikā ir:

- Primāro enerģijas resursu un patēriņa analīze. Piegādājamo resursu daudzveidības paplašināšana.
- Enerģijas ražošanas un piegādes stratēģija.
- Patēriņš un apgāde rūpniecības sektorā.
- Patēriņš un apgāde komerciālajā sektorā.
- Patēriņš un apgāde mājāsaimniecībā.
- Plānošana.
- Atjaunojamie un vietējie energoresursi.
- Vides aizsardzības vietējie un globālie faktori.
- Nodokļi un likumdošana.

Energoefektivitātes paaugstināšanā ir ieinteresēta gan sabiedrība, gan uzņēmumi. Sabiedrību interesē resursu lietderīga izmantošana un

labklājības pieaugums. Uzņēmumam, savukārt, nepieciešams attīstīt biznesu. Viss atkarīgs no tirgus attiecībām, to attīstības.

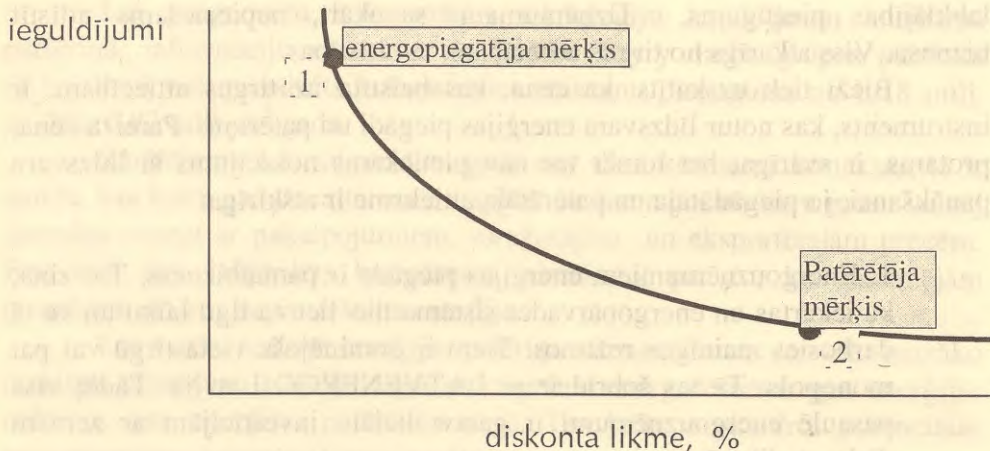
Bieži tiek uzskatīts, ka cena, kas balstīta uz tirgus attiecībām, ir instruments, kas notur līdzsvarā enerģijas piegādi un patēriņu. Pareizā cena, protams, ir svarīga, bet tomēr tas nav pietiekams nosacījums šī līdzsvara panākšanai, jo piegādātāja un patērētāja attieksme ir atšķirīga:

1. Energouzņēmumiem enerģijas piegāde ir pamatbizness. Tie zina, ka iekārtas un energopārvades sistēma tiks lietota ilgu laiku un ka tā darbosies mainīgos režīmos. Tiem ir dominējoša vieta tirgū vai pat monopols. Tā tas šobrīd ir ar LATVENERGO Latvijā. Tādēļ visā pasaulē energouzņēmumi ir gatavi lielām investīcijām ar zemām diskonta likmēm.

2. Enerģētika uzņēmumos tiek uzskatīta par palīgmehānismu, un, veicot aprēķinus jaunu efektīvu iekārtu iegādei, enerģētiķi nezina, vai tās tiks izmantotas pilnībā visu kalpošanas mūžu, vai iekārta tiks samaksāta vai pārdota brīdī, kad tā vairs nebūs vajadzīga. Ja jaunas iekārtas uzstādīšanas mērķis ir tikai samazināt rēķinu par elektroenerģiju, uzņēmumi cenšas ieguldīt mazākus līdzekļus.

Starpība starp šīm divām perspektīvām un darbības modeļiem tiek dēvēta par "atmaksāšanās intervālu". Šis pieņēmums balstās uz "netiešām diskonta likmēm" (šo terminu enerģētiķi lieto, ja enerģijas pircēji izvēli balsta uz aprēķiniem), kuru līmenis ir atkarīgs no produkcijas tipa. Tas var būt diapazonā 20 ... 300% un būtiski pārsniedz "sociālās diskonta likmes". Energopiegādātāja aprēķiniem diskonta likme ir 5 ... 12% robežās. Piegādātāju (augšējais punkts) un patērētāju (apakšējais punkts) atmaksāšanās intervāla grafiskais skaidrojums parādīts 1.2. attēlā [1.4.].

Energopieprasījuma vadības (EPV, saīsinājums angļu valodā - DSM) aktivitātes tiecas uz "atmaksāšanās intervāla" samazināšanu un naudas novirzīšanu energopatērētāja virzienā, lai sasniegtu resursu pilnīgāku izmantošanu un atvairītu energoražotāja papildu investīcijas. Tas grafiskajā attēlā atspoguļosies ar abu punktu tuvināšanos uz liknes.



1.2. att. Atmaksāšanās intervāls starp piegādātāju un patērētāju:
1 - piegādātāja punkts; 2 - patērētāja punkts.

1.2. ENERGOPATĒRĒTĀJA VADĪBAS STRATĒGIJA

Energopieprasījuma vadības jēdziens ir radies no vēlēšanās uzlabot enerģijas lietošanas vērtību un efektivitāti tautsaimniecībā, t.i., dot tīru sociālo labumu, uzlabojot enerģijas lietošanas veidu. EPV ir patērētāja puses resursu noteikšana, lietošana un vērtēšana.

Enerģijas lietotāja resursu racionālu izmantojumu cenšas analizēt, izstrādājot energopieprasījuma vadības programmas. EPV programmas uzsācējs parasti ir enerģijas piegādātājs, kura mērķis ir šaurāks - palielināt peļņu. Enerģijas patērētājs atsaucas uz EPV programmu, ja tā palīdz samazināt viņa izmaksas par enerģiju. Diemžēl piegādātāja peļņas motīvs un patērētāja izmaksu motīvs ne vienmēr saskan ar plašākiem kvalitātes un efektivitātes motīviem no sabiedrības viedokļa.

EPV aptver plašu pasākumu kompleksu. Uzņēmuma energopieprasījuma puses vadības aktivitātes ietver sevī elektroenerģijas

ražotāja centienus ietekmēt patērētāja enerģijas izmantošanu. Tās vērstas dažādos virzienos:

- cenu un tarifu aplēse;
- slodžu konstruēšana;
- patērētāju energoefektivitātes izpēte;
- slodžu vadības programmu sastādīšana.

Energoieprasījuma vadības programmas īstenošana dzīvē ir iespējama tikai ar valsts vadības struktūru aktīvu līdzdalību. Lai spriestu par valdības stratēģijas regulējošo ietekmi uz energoefektivitātes izmaiņām, jārod atbilde uz diviem svarīgiem jautājumiem:

1. Kāda ir dažādu pušu (patērētājs, piegādātājs, valdība u.c.) ietekme uz enerģijas vērtību un tās ražošanas , pārvades un patēriņa efektivitāti?
2. Kā regulēšana sadala šīs ietekmes izmantošanas ieguvumus un tādējādi veicina vai atbaida ieinteresētās puses no jebkuras rīcības uzsākšanas?

Tādēļ par vienu no EPV stūrakmeņiem jāuzskata ieguvumu analīze, kas sarežģītu aprēķinu ceļā ļauj noteikt energoieprasījuma vadības programmas izpildes rezultātā iegūto efektu.

Holandiešu enerģētiķi [1.7.] ir formulējuši nepieciešamās ieguvumu pārbaudes:

- 1) Tīrais energoiegādātāja ieguvums (ERI).
- 2) Tīrais energopatērētāja - dalībnieka ieguvums (EPI).
- 3) Tīrais nedalībnieka (citu nodokļu maksātāju) ieguvums (ENI).
- 4) Tīrais sabiedrības ieguvums (ESI), kas praktiski ir vienāds ar
ERI + EPI + ENI.

Izpildāmo pasākumu novērtēšanu veic ar ieguvumu pārbaudes rezultātu analīzi, pie kam iespējami dažādi varianti, piemēram:

- $ESI > 0$ ir minimālais EPV programmas priekšnoteikums, jo tikai pozitīvs ESI nodrošina ekonomiskās efektivitātes uzlabošanos.
- $ENI < 0$ norāda, ka nedalībnieki ir spiesti subsidēt EPV programmas pasākumus. Šajā gadījumā jāveic papildu izpēte, lai netiktu izniekotas investīcijas pasākumiem, kas nav saistīti ar konkrēto uzdevumu.
- $ENI > 0$ norāda, ka nedalībnieki iegūst daļu no konkrētā pasākuma ieguvuma. Tas var mazināt piegādātāju un patērētāju - dalībnieku stimulu projekta realizācijai, jo viņiem tiek samazināts ieguvums.
- ERI un EPI dažādās zīmes liecina par to, ka šīm abām grupām varētu būt pretējas motivācijas, piemēram, energopiegādātājs mēģinās pārdot dažādas idejas un priekšlikumus, kurus patērētājam nav izdevīgi realizēt, un tādēļ tiek zaudēts laiks un ieguldīts lieks darbs.
- ERI vai EPI zīmes atšķirība no ESI zīmes signalizē par briesmām, ka viena puse veiks tikai sev izdevīgu pasākumu, kas nesīs zaudējumus gan sabiedrībai kopumā, gan otrai pusei.

EPV tiek pilnveidota un realizēta saskaņā ar enerģijas resursu iegūšanas programmām, kuras ir energoražotāja darbības plānošanas rezultāts. EPV atšķiras no citām aktivitātēm ar to, ka ietekmē daudzas jomas: normatīvus, iekārtu energoefektivitātes standartus, perspektīvu jaunu tehnoloģiju ieviešanu, enerģijas cenu izmaiņu politiku u.c.

EPV programmas izveide un tās veiksmīga īstenošana ir atkarīga gan no valdības politikas un iniciatīvas, gan no energouzņēmumu, gan arī no energopatērētāju vēlmes darboties, lai ietekmētu enerģijas racionālu lietošanu un efektivitāti. Energoieprasījuma vadība galvenokārt tiek realizēta divējādi:

- paaugstinot energoefektivitāti, kas dod enerģijas patēriņa (kWh) samazinājumu;
- realizējot slodzes vadību, kas dod slodzes (kW) samazinājumu vai maksimuma slodzes izlīdzināšanu (arī nobīdi).

EPV programmas realizācijas mērķis ir sekmēt nevis tik ļoti ierastā ceļa turpināšanu, kas saistīts ar jaunu spēkstaciju būvniecību, bet gan darīt visu, lai pēc iespējas tālāk atvirzītu to celtniecību. Tas nozīmē pieņemt jaunu domāšanas veidu, kas jāizprot energouzņēmumiem, kuri līdz šim bija pieraduši pie enerģijas ražošanas pieauguma.

Lai EPV pasākumi gūtu panākumus, nepieciešama abu pušu līdzdalība izstrādātajās programmās. Runājot par energosektora tirgus modeli, tam jābūt tādām, lai cenu signāli un citas iniciatīvas noderētu viszemāko izmaksu (no sabiedrības viedokļa) plānu veidošanai. Plāniem jābūt tādiem, lai nodrošinātu vislielāko peļņu ražotājam un, vēlams, arī patērētājam.

Varētu likties nesaprotami, ka ražotājs cenšas pārdot mazāk produkcijas. Šāda uztvere ataino tradicionālo, mums tik ļoti pierasto domāšanas veidu, kā arī energoražotāja sociālo uzdevumu izpratnes trūkumu. Faktiski energopieprasījuma puses vadība samazina slodzi, un tai var būt ļoti svarīga loma viszemāko izmaksu energopakalpojumu veikšanā, jo:

1 MWh ietaupīt ir vieglāk un lētāk nekā ražot.

Ja likumdošana stimulē tirgus izvēli un sociālie ieguldījumi sakrīt, energoražotājs izprot, ka patērētāju energoresursus ekonomēt ir izdevīgāk (no izmaksas viedokļa) nekā celt jaunu spēkstaciju.

Piemēram, ja ražotājs ir energopieprasījuma samazināšanas iniciators, tādā gadījumā iespējams paaugstināt energoapgādes drošību, kā arī rast variantus, kas ļautu atvirzīt jaunas, dārgas spēkstacijas būvi. Bez tam

saražotās enerģijas daudzuma samazinājums dod iespēju izvairīties no dārgu vides aizsardzības iekārtu izbūves.

Svarīga ir energoražotāja attieksme pret padarīto darbu. Enerģijas ražotājs, kas paļaujas tikai uz vispārējiem piegādātāju noteikumiem, piemēram, tajos gadījumos, kad spēkstacijas sevi pielīdzina patēriņa preču ražotājam, domā tikai par saražotās enerģijas kvantitāti. Turpretim, energopiegādātājam, kurš izmanto EPV potenciālu, jāmaina šī standartdomāšana un viņam jāapzinās sevi kā kvalitatīva pakalpojuma sniedzēju, t.i., energoražotājs piedalās patērētāja vajadzību nodrošināšanas biznesā, un tas ir vairāk nekā vienkārši kWh ražotājs.

Energopieprasījuma vadības programmas primārais jautājums ir patērētāju enerģijas patēriņa dati un analīze, kas ietver:

- energopieprasījuma puses vadības izmaksas;
- ieguldījumu noderīguma izpēti un cenas;
- izmaksas alternatīvai, kuru piedāvā energouzņēmums;
- reāli izpildāmas stratēģijas un programmas izstrādi.

Viens no būtiskajiem jautājumiem šinī gadījumā ir: cik līdzekļu drīkst tērēt programmas izstrādāšanai?

Šeit nav precīzas atbildes, jo nepilnīga analīze un uz to balstīta programma var dot negatīvu pieredzi un arī pārāk rūpīgi veikts darbs šinī gadījumā nav garantēti proporcionāli augstvērtīgākam rezultātam. Amerikāņi iesaka tērēt 5 ... 10% no ietaupītās summas.

Enerģijas piegādātāji var investēt EPV dažādos veidos gan kontraktu slēgšanas brīdī, gan EPV programmu attīstībai. Tikpat labi enerģijas ražotājs var aprobežoties tikai ar konsultācijām un informāciju par energoefektivitātes paaugstināšanas iespējām un to izdevīgumu, kā arī aktīvi iesaistīties EPV realizācijā, uzstādot patērētājam efektīvākas iekārtas.

EPV programmu veidošana un ieviešana ir apgrūtināta un sarežģīta ne tikai Latvijā, bet visās Austrumeiropas un Baltijas valstīs. ASV speciālisti uzskata, ka būtiskākās problēmas, kas saistītas ar energopieprasījuma vadības realizāciju, ir kopīgas:

1. Energoieprasījuma krišanās tendence.
2. Sociālo izmaksu pieaugums.
3. Likumdošana un uzņēmumu vienlīdzīgās tiesības.
4. Pašreizējā ekonomikas vide.

Arvalstu speciālisti uzskata, ka EPV programmas īstenošana jāuzsāk valsts energoresursu patēriņa minimuma brīdī (skat. apakšējo punktu 1.1. attēlā), tas dotu iespēju realizēt energosistēmas optimālu apstākļu plānošanu un darbību. Rūpniecībai attīstoties, slodze atkal pamazām pieaugs, bet ražošanas iekārtas novecosies, un agrāk vai vēlāk parādīsies jautājums: kā nodrošināt slodzi? Tāpēc par to ir jādomā priekšlaikus. EPV pieredzei vajadzētu attīstīties jau tagad, lai nepieciešamības gadījumā varētu aktīvi iekļauties energopatēriņa nodrošināšanā.

Sociālās izmaksas šajā gadījumā varētu būt saistītas ar nodarbinātību un vidi. Energoefektivitātes paaugstināšanas rezultātā iegūtie resursi labvēlīgi ietekmēs vidi. It īpaši tas attiecas uz situāciju, ja energoresursus, kuri nav izmantoti pilnībā, samazinot energopatēriņu, salīdzina ar jaunas spēkstacijas būvi un ar to saistītajiem vides aizsardzības objektiem. ASV speciālisti [1.8.] veikuši pētījumus par EPV ietekmi uz nodarbinātību un pierādījuši, ka bezdarbs nepieaug.

Bez jau pieminētajiem aspektiem šobrīd arvien vairāk uzmanības tiek veltīts psiholoģiskajiem energoefektivitātes uzlabošanas jautājumiem. Tos visvairāk pētījuši vācu un dāņu zinātnieki. Parasti psiholoģisko problēmu izpēte sākas ar energopatērētāju anketēšanu. Iegūto datu analīze paver jaunas iespējas EPV programmu īstenošanai.

Parasti gan viss tomēr vēl joprojām noslēdzas ar materiālo ieinteresētību. Amerikāņu pieredze (viņu darbība EPV jomā jāuzskata par vienu no aktīvākajām) rāda, ka patērētāji brīvprātīgi piedalās EPV programmās, ja ir ieinteresēti to darīt. Parasti lēmumu pieņemšanu ietekmē aprēķini, kuru rezultātā patērētājs nolemj piedalīties vai nē. Tomēr pieredze rāda, ka Austrumeiropas valstīs pašreizējās aprēķinu sistēmas nedod pietiekami ātru cenu signālu, kas varētu ietekmēt patērētāja darbības režīmu

(it īpaši tas attiecas uz individuāliem un maziem komerciāliem patērētājiem).

Svarīgs ir arī jautājums par ieguldījumu atmaksāšanos. Parasti EPV programmas izmaksas cenšas iekļaut piegādātāja puses resursu izmaksās. Pieredze rāda, ka risinājumu var meklēt arī atšķirīgās samaksās. Piemēram, EPV programmas dalībniekiem būtu samaksājami rēķini, kuri ir samazināti sakarā ar slodzes samazināšanas pasākuma priekšrocībām, bet nedalībniekiem vajadzētu saņemt augstākus rēķinus.

Pirmie soļi EPV programmu īstenošanā Latvijā sākti ar atšķirīgu tarifu ieviešanu.

1.3. ENERĢĒTISKĀS SISTĒMAS VADĪBAS ANALĪZE UZŅĒMUMĀ

Energoefektivitātes durvis visvienkāršāk atslēgt ar energovadības atslēgu. Ir tikai jāatbild uz jautājumu: kurš un kāpēc vērs šīs durvis?

Iemesli var būt gan ekonomiska un finansiāla, gan enerģētiska, ekoloģiska, gan socioloģiska un psiholoģiska rakstura. Visbiežāk sastopamais mehānisms ir saistīts ar tirgus konkurences virzošo spēku, kas rūpniecības uzņēmuma vadībai liek samazināt produkcijas pašizmaksu, paaugstināt ražību un kvalitāti. Monopoluzņēmumiem šāda dzinējspēka nav. Tādēļ šajos gadījumos energoefektivitātes paaugstināšanai varētu būt atšķirīgi iemesli.

1.3.1. Energovadība rūpniecības uzņēmumā

Lai būtu iespējams analizēt energovadības lomu uzņēmumā, nepieciešams noteikt enerģijas īpatsvaru ražošanas procesā un citu vajadzību nodrošināšanā (apkurei, ventilācijai, gaisa kondicionēšanai, karstā ūdens

apgādei, apgaismošanai). Tādēļ rūpniecības uzņēmumi kā energopatērētāji nosacīti jāiedala trīs grupās:

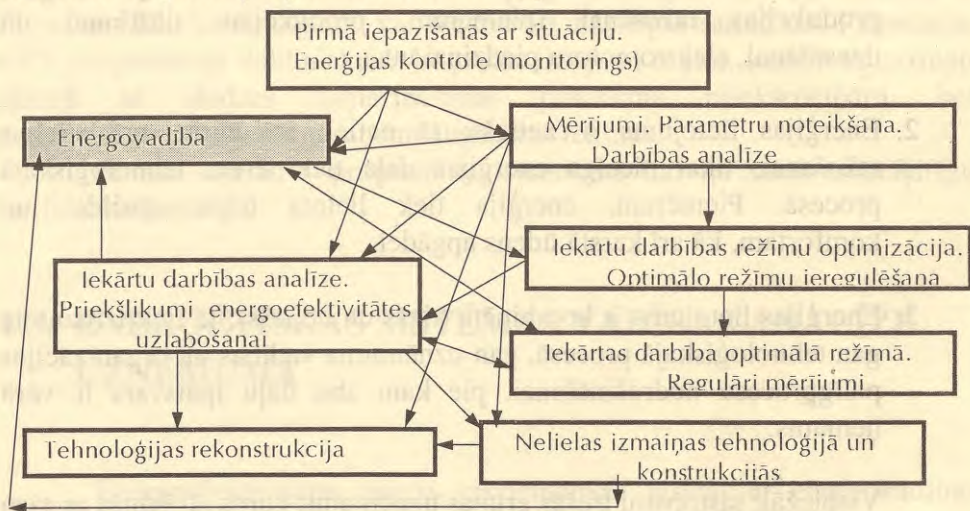
1. Enerģijas lietojums ir tiešs: tā tiek izmantota galvenokārt produkcijas ražošanai (piemēram, produkcijas sildīšanai un dzesēšanai, elektromotoru piedziņai utt.).
2. Enerģijas lietojums ir netiešs: tā netiek izmantota produkcijas ražošanai, tikai neliela enerģijas daļa tiek tērēta tehnoloģiskajā procesā. Piemēram, enerģija tiek lietota telpu apsildei un komfortam, kā arī karstā ūdens apgādei.
3. Enerģijas lietojums ir kombinēts (tiešs un netiešs); tā tiek izmantota gan tehnoloģiskajā procesā, gan uzņēmuma vadības un organizācijas palīgprocesu nodrošināšanai, pie kam abu daļu īpatsvars ir vērtā ņemams.

Visbiežāk sastopami trešās grupas uzņēmumi, kuros jāērķinās ar visu veidu enerģijas patērētājiem.

Vispārējā gadījumā enerģijas efektivitāte rūpniecības uzņēmumā ir atkarīga no dažādiem iekšējiem un ārējiem faktoriem, no kuriem svarīgākie varētu būt:

- uzstādītās iekārtas un tehnoloģijas inženierenerģētiskais līmenis;
- tirgus ekonomikas attīstības līmenis un produkcijas pieprasījums šajā tirgū;
- uzņēmuma un energovadības līmenis, kontroles un regulēšanas iespējas.

To realizācijā vajadzētu iesaistīties ne tikai enerģētikas speciālistiem, bet arī tehnologiem, speciālistiem vadības un informācijas sistēmās, jo energoefektivitātes paaugstināšanas projektus var attiecināt gan uz enerģijas ražošanu un patēriņu, gan arī uz tehnoloģiju.



1.3. att. Enerģovadības blokskāma energoefektivitātes paaugstināšanai rūpniecības uzņēmumā.

Piemēram, uz enerģētiku attiecinātie projekti rūpniecības uzņēmumā varētu būt visi energopatēriņa samazināšanas projekti (zudumu novēršana, izolācijas un apgaismes uzlabošana, slodzes vadība, jaunu modernāku un energomazietilpīgāku iekārtu uzstādīšana utt.), kā arī rekonstrukcijas, kas saistītas ar kurināmā nomaiņu. Tajos ieskaitāmi visi priekšlikumi, kuri samazina MWh pašizmaksu vai samazina ietekmi uz vidi.

Savukārt uz ražošanu attiecinātie projekti vairāk saistīti ar produkcijas pieaugumu, tās kvalitātes uzlabojumu un tirgus paplašināšanos. Šajos projektos energoefektivitātes paaugstināšanu sasniedz netieši.

Enerģoefektivitātes uzlabojumi rūpniecības uzņēmumā jānovērtē kā vairākpakāpju risinājumu kompleksi [1.9.]. Blokskāma, kas parādīta 1.3.

attēlā, rāda enerģijas patēriņa samazinājuma priekšlikumu realizācijas algoritmu.

Tā pasvītro rūpniecības uzņēmuma energovadības lomu energoefektivitātes uzlabošanā. Katra bloka īpatsvars kopējā enerģijas patēriņa samazinājumā tiek vērtēts atsevišķi un ir aplūkots vēlāk.

Lai realizētu energovadību, parasti nepietiek ar speciālistiem, kuri strādā uzņēmumā. Lielāku projektu veikšanai izveidojies plašs enerģētikas konsultāciju un servisa organizāciju tīkls. Tās atkarībā no uzņēmuma enerģijas vadības uzdevuma spēj veikt visus blokus, vai arī iesaistīties tikai atsevišķu pasākumu un projektu realizācijā.

1.3.2. Datu ieguve. Analīze

Enerģijas kontrole (monitorings) tiek lietota regulārai enerģijas izmantošanas datu vākšanai katrā cehā (objektā) atsevišķi. Šāda informācija tiek pierakstīta un analizēta, lai noteiktu būtiskākās enerģijas izmantošanas vietas. Jāmēra ne tikai elektroenerģijas, gāzes, ūdens, mazuta patēriņš, bet arī siltumnesēju parametri (temperatūras un spiedieni).

Iesākumā tiek veidota enerģijas ražošanas un izmantošanas pārbaudes (audita) grupa. Tajā tiek iekļauti gan uzņēmuma speciālisti, gan konsultatīvo firmu pārstāvji. Lai noteiktu, kā uzņēmumā lieto enerģiju, un izvērtētu tās izmaksu īpatsvaru produkcijas cenā, izmantojot enerģijas kontroles grupu pakalpojumus, nosaka enerģijas īpatnējo patēriņu (MJ/t vai Gcal/t) un kurināmā īpatnējo patēriņu (m^3/t vai kg/t). Tajos gadījumos, kad runa ir par ēkām, ieteicams enerģijas patēriņu attiecināt pret kopējo kvadrāturu vai kubatūru (MWh/m^2 vai MWh/m^3). Tas dod iespēju salīdzināt iegūtos datus un precīzāk noteikt potenciālos variantus.

Energokontroles grupai ir jāatbild uz trīs pamatjautājumiem [1.10.]:

1. Cik daudz enerģijas tiek lietots un kur tā tiek izmantota?
2. Cik daudz enerģijas būtu jālieto pašreizējos procesos?

3. Cik maz enerģijas varētu lietot ar uzlabotām metodēm vai procesiem?

Uz enerģijas ražošanas un izmantošanas kontroli vajadzētu raudzīties kā uz esošā stāvokļa konstatēšanu, tā pati par sevi nesamazina enerģijas patēriņu. Jāņem vērā, ka dati, kas vienreiz iegūti, nav vispārināmi uz citām ražotnēm, taču var kalpot dažādu ražotņu salīdzināšanai. Tas ir pirmais solis, bez kura nav iespējams nākamais - iegūto datu analīze un enerģijas bilances sastādīšana.

Taču, lai veiktu datu analīzi, vispirms nepieciešama to statistiskā apstrāde, lai iegūtu grafiskas vai analītiskas sakarības starp mainīgajiem lielumiem, piemēram, atrast sakarību starp saražoto produkciju, kas būtu neatkarīgais mainīgais lielums jeb faktors, un enerģijas patēriņu - atkarīgais mainīgais lielums. Meklēto analītisko izteiksmi parasti dēvē par parādības vai procesa regresijas vienādojumu (matemātisko modeli), kas raksturo sakarību starp neatkarīgiem un atkarīgiem mainīgiem lielumiem. Šādu sakarību iegūšanā plaši lieto tādas matemātiskās statistikas metodes kā korelācijas un regresijas analīzi.

Datu statistiskā apstrāde tiek veikta noteiktā secībā.

- Nosaka aplūkojamās parādības regresijas vienādojumu. Šim nolūkam visbiežāk izmanto mazāko kvadrātu metodi.
- Veic iegūtā regresijas vienādojuma koeficientu statistisko analīzi, lai novērtētu to nozīmību vienādojumā. Šo analīzes daļu veic ar regresijas analīzes palīdzību.
- Nosaka neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu savstarpējās iedarbības (stohastiskās sakarības) ciešumu (korelāciju). Šo analīzes daļu veic ar korelācijas analīzes palīdzību.

Materiāla tālākajā izklāstā dota minimāla matemātiska rakstura informācija. Tiem, kuri vēlas iepazīties plašāk ar aplūkojamām metodēm, varētu ieteikt literatūru [1.11., 1.12.]. Šādas pieejas pamatā ir tas, ka matemātiskās statistikas analīzes metodes ir darbietilpīgas un to lietojums nav iespējams bez attiecīgu datorprogrammu pakešu izmantošanas,

piemēram, SAS, STATGRAPHICS. Taču, izmantojot programmu, paketes lietotājam jāsaprot iegūtā informācija, jāprot to izvērtēt un jāredz datu savstarpējā sakarība. Autores pieredze matemātiskās statistikas analīzes metožu lietojumā enerģētikas problēmu izpētē sniegta tālāk.

1.3.2.1. Regresijas analīze

Regresijas analīze nosaka gadījuma lielumu izmaiņu precīzus kvantitatīvus parametrus - ar funkcionālām sakarībām izsaka stohastiskās saites nozīmību.

Regresijas analīzes uzdevums ir:

- noteikt neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu statistiskās sakarības ciešuma kvantitatīvus parametrus;
- noteikt regresijas vienādojuma (matemātiskā modeļa) koeficientus.

Regresijas analīze sastāv no divām daļām:

- regresijas vienādojuma noteikšana ar mazāko kvadrātu vai kādu citu metodi;
- iegūtā rezultāta statistiskā analīze.

Atkarībā no neatkarīgo mainīgo jeb faktoru skaita, kā arī sakarības rakstura starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem mainīgajiem lielumiem iespējams iegūt dažādus regresijas vienādojumus:

- vienfaktora lineāru (skat. 1.2. un 1.3. piemēru);
- daudzfaktoru lineāru (skat. 1.5. piemēru);
- linearizētu (skat. 1.3.3. nodaļā doto piemēru);
- nelineāru (skat. 1.4. piemēru).

Atbilstoši tam mainās arī gadījuma lielumu izmaiņu novērtēšanas kvantitatīvo parametru noteikšana.

Regresijas analīzes lietojuma nosacījumi nav tik stingri kā korelācijas analīzes gadījumā. Tādēļ regresijas analīzi var lietot arī gadījumos, kad vienīgi atkarīgie mainīgie lielumi pakļaujas normālam sadalījuma likumam, un šī prasība nav spēkā attiecībā uz neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem. Regresijas vienādojums var būt lineārs vai nelineārs. Tas nozīmē, ka, piemēram, neatkarīgais mainīgais lielums var būt šī lieluma kvadrāts vai arī divu un vairāku neatkarīgo mainīgo lielumu reizinājums. Pēdējais atspoguļo šo lielumu savstarpējās iedarbības efektus.

Sacītais nozīmē to, ka analīze sākas ar atkarīgo mainīgo lielumu sadalījuma noteikšanu, un analīzi var turpināt, ja sadalījums atbilst normālam sadalījuma likumam.

Tālāk jānosaka lineārā regresijas vienādojuma koeficienti ar regresijas analīzes palīdzību un jāveic rezultātu statistiskā analīze. Ar sākotnējo datu palīdzību jānosaka regresijas vienādojums

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n, \quad (1.1.)$$

kur y - atkarīgais mainīgais lielums;

b_0 - regresijas brīvais loceklis;

$b_1 \dots b_n$ - regresijas koeficienti;

$x_1 \dots x_n$ - neatkarīgie mainīgie lielumi,

un jānovērtē koeficientu nozīmība. Šis ir daudzfaktoru matemātiskais modelis. Viena faktora matemātisko modeli raksturo vienādojums

$$y = b_0 + b_1x. \quad (1.2.)$$

Regresijas vienādojumu (1.1.) un (1.2.) koeficientu $b_0 \dots b_n$ statistiskās nozīmības novērtēšanai izmanto t kritēriju, kuram, kā pierādījis matemātiķis J. Bartlets, ir Stjudenta sadalījums ar

$$f = m - (n + 1)$$

brīvības pakāpēm.

Lielums m raksturo statistiskajai analīzei pakļauto datu apjomu un n - neatkarīgo mainīgo skaitu regresijas vienādojumā. Lai veiktu novērtēšanu, katra koeficienta datora aprēķināto t kritēriju salīdzina ar vērtību t_{tab} , kuru atrod Stjudenta sadalījuma tabulās atbilstoši izvēlētajai nozīmības līmeņa P un f brīvības pakāpēm. Ar enerģētiku saistīto datu apstrādē bieži izmanto nozīmības līmeni $P = 0,05$, kam atbilst ticamības varbūtība $1 - P = 0,95$. Ja vērtējamajam koeficientam ir spēkā noteikums $|t| > t_{\text{tab}}$, tad tas ir nozīmīgs un atstājams regresijas vienādojumā. Pretējā gadījumā ir jāatmet šis vienādojuma saskaitāmais un analīze jāveic no jauna, līdz visi atstātie koeficienti ir statistiski nozīmīgi. Iegūtais regresijas vienādojums ir analizējamās parādības matemātiskais modelis, kurš tālāk ir jānovērtē.

Novērtējumu veic ar dispersijas analīzes palīdzību, izmantojot Fišera kritēriju F . Šim nolūkam aplūko atkarīgā mainīgā lieluma dispersijas attiecību pret atlikuma dispersiju:

$$F(f_1, f_2) = \frac{S_y^2 \cdot (f_1)}{S_{\text{atl}}^2 \cdot (f_2)}, \quad (1.3.)$$

kur $S_y^2 \cdot (f_1)$ - atkarīgā mainīgā lieluma y dispersija;
 $S_{\text{atl}}^2 \cdot (f_2)$ - atlikuma dispersija.

Atlikumu nosaka kā atkarīgā mainīgā lieluma un ar regresijas vienādojuma palīdzību aprēķinātās vērtības starpību $y_i - y_i^{\text{apr}}$. Brīvības pakāpes f_1 un f_2 aprēķina no vienādojumiem

$$\begin{aligned} f_1 &= m - 1; \\ f_2 &= m - n. \end{aligned} \quad (1.4.)$$

Ja F kritērija vērtība būs lielāka par kritisko, kuru nosaka no F sadalījuma tabulām, ņemot vērā brīvības pakāpes f_1 un f_2 , kā arī nozīmības

līmeni P, tad tas nozīmē, ka vienādojums apraksta analizējamus datus un tas ir darba spējīgs.

Gadījumā, ja lineārie viena faktora vai daudzfaktoru matemātiskie modeļi neapmierinoši apraksta analizējamo parādību, ir jāpāriet uz augstākas kārtas modeļiem. Tas nozīmē, ka jāpāriet uz nelineāriem modeļiem. Šajā gadījumā neatkarīgus nelineārus mainīgos lielumus cenšas linearizēt. Regresijas vienādojuma linearizācijas gadījumā parādās funkcionāla sakarība starp neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem un tie nav vairs savstarpēji neatkarīgi.

Divu neatkarīgo mainīgo gadījumā var uzrakstīt nelineāru regresijas vienādojumu vispārējā veidā

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1^2 + b_4x_2^2 + b_5x_1 \cdot x_2. \quad (1.5.)$$

Šo vienādojumu var linearizēt, aizvietojo nelineāros saskaitāmos:

$$x_3 = x_1^2; \quad x_4 = x_2^2; \quad x_5 = x_1 \cdot x_2.$$

Tādā gadījumā linearizētais regresijas vienādojums pierakstāms:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4 \cdot x_4 + b_5x_5. \quad (1.6.)$$

Tālākie aprēķini ir analogiski iepriekš aplūkotajiem - ar mazāko kvadrātu vai citu metodi tiek noteikti vienādojuma (1.6.) koeficienti $b_0 \dots b_5$ un veikts to statistiskās nozīmības novērtējums. Šim nolūkam izmanto t kritēriju, bet vienādojuma pārbaudei izmanto Fišera kritēriju.

Viens no regresijas analīzes pamatjautājumiem ir atrast labākā regresijas vienādojuma izteiksmi. Protams, termins "labākais" ir subjektīvs un atkarīgs no pieredzes darbā ar datu statistiskās analīzes metodēm. Šobrīd nav vienotu statistikas procedūru, kuras ļautu izvēlēties regresijas vienādojuma veidu, un tāpēc katrā konkrētā gadījumā ir jāpieņem subjektīvs lēmums, kurš tad arī ir datu statistiskās analīzes sākums. No tā,

cik veiksmīgi ir izvēlēts izejas vienādojums, kā arī tā iespējamās alternatīvas būtiski atkarīgs analīzes rezultāts un analīzei patērētais datorlaiks.

1.3.2.2. Korelācijas analīze

Korelācijas analīze pēta vairāku gadījuma lielumu savstarpējo iedarbību un nosaka šo lielumu stohastiskās sakarības ciešumu. Jāatzīmē divas būtiskas atšķirības starp iepriekš aplūkoto regresijas analīzi un korelācijas analīzi.

1. Regresijas analīzes gadījumā tiek meklēta atkarīgā gadījuma lieluma vidējās vērtības atkarība no fiksētām (determinētām) neatkarīgā mainīgā lieluma vērtībām. Savukārt, korelācijas analīze ir lietojama tad, ja gan atkarīgie, gan neatkarīgie mainīgie ir gadījuma lielumi.
2. Korelācijas analīzes gadījumā neatkarīgajiem un atkarīgajiem gadījuma lielumiem tiek vērtēts lineāras sakarības ciešums.

Būtisks korelācijas analīzes lietojuma nosacījums ir prasība, lai neatkarīgie un atkarīgie mainīgie lielumi būtu normāli sadalīti lielumi. Svarīgi arī, lai neatkarīgie mainīgie lielumi būtu savstarpēji neatkarīgi. Šie nosacījumi samazina korelācijas analīzes lietojuma iespējas. Tāpēc korelācijas analīzi galvenokārt izmanto lineāru matemātisko modeļu gadījumos. Tie var būt gan viena faktora, gan arī daudzfaktoru modeļi.

Neatkarīgo un atkarīgo gadījuma mainīgo lielumu savstarpējās saites ciešumu (korelāciju) var novērtēt ar korelācijas koeficienta palīdzību. Viena faktora matemātiskā modeļa gadījumā tā aplēsēm izmanto Pīrsona izteiksmi

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{(m-1) \cdot S_x \cdot S_y}, \quad (1.7.)$$

kur x_i, y_i - neatkarīgie un tiem atbilstoši atkarīgo lielumu pāri;

\bar{x}, \bar{y} - neatkarīgo un atkarīgo lielumu vidējās aritmētiskās vērtības;

S_x, S_y - lielumu izlases dispersijas.

Daudzfaktoru korelācijas gadījumā lieto daudzfaktoru korelācijas koeficientu R , kura aprēķina izteiksme ir sarežģīta un jāmeklē speciālā literatūrā. Daudzfaktoru korelācijas koeficients R nav statistiski interpretējams. Tomēr to nosaka un izmanto kā netiešu regresijas vienādojuma noderības rādītāju.

Nelineāras regresijas gadījumā korelācijas koeficienta vietā izmanto korelācijas attiecību. Tās aprēķinu sakarības meklējamas speciālā literatūrā. Korelācijas attiecībai nelineārajā regresijā ir tāda pati nozīme kā koeficientam lineārajā - tā raksturo rezultātu grupēšanos ap nelineārās regresijas līniju. Arī nelineārās regresijas analīzes gadījumā sakarības ciešuma analīzi, kuru veic ar korelācijas attiecības palīdzību, sauc par korelācijas analīzi.

Korelācijas koeficienta vērtība var mainīties no -1 līdz $+1$. Ja korelācijas koeficients ir vienāds ar 0 vai tuvu tai, tad tas liecina, ka starp mainīgiem lielumiem nav sakarības. Savukārt, koeficienta vērtības, vienādas ar -1 vai $+1$, liecina par funkcionālu sakarību starp neatkarīgajiem un atkarīgajiem lielumiem. Ar korelācijas koeficientu palīdzību vērtē, cik precīzi ir korelācijas ciešumu raksturojošie matemātiskie modeļi. Tiek uzskatīts, ka korelācija ir laba, ja korelācijas koeficienti ir $0,8...0,9$. Jāatzīmē, ka datu statistiskās apstrādes datorprogrammās parasti rēķina korelācijas koeficienta kvadrātu.

Ja R^2 vērtību reizina ar 100 , tad iegūst lielumu (procentos), kurš raksturo ar regresijas vienādojumu aprakstītas analizējamo atkarīgo mainīgo lielumu izmaiņas. Piemēram, $R^2 = 0,9$ norāda, ka aplūkojamais regresijas vienādojums raksturo 90% no atkarīgo gadījuma lielumu izmaiņām.

Lai ilustrētu regresijas un korelācijas analīzes lietojuma iespējas energovadības programmas realizācijā, tālāk aplūkoti dažādi piemēri, kuri, veicot līgumdarbus un pasūtījumus, iegūti un analizēti pašvaldību un rūpniecības uzņēmumu darbības izpētes laikā.

1.2. piemērs

Būvmateriālu uzņēmuma statistisko datu analīze, lai noteiktu enerģijas patēriņa atkarību no saražotās produkcijas, tika veikta ar lineāru viena faktora regresijas vienādojuma (matemātiskā modeļa) palīdzību [1.13.].

Šajā piemērā veikta regresijas un korelācijas analīze par būvmateriālu rūpnīcas diennakts elektroenerģijas patēriņa izmaiņām atkarībā no saražotās produkcijas daudzuma. Analizējamo datu apjoms $m = 92$, un tas reprezentē rūpnīcas trīs mēnešu ražošanas apjomu. Viena faktora lineārajā regresijas vienādojumā ir viens neatkarīgais mainīgais lielums, un tas liecina, ka $n = 1$. Tas nozīmē, ka aplūkojamā piemērā brīvības pakāpju skaits $f = m - (n + 1) = 92 - 2 = 90$ un tām atbilstošā t kritērija tabulas vērtība $t_{\text{tab}} = 2.0$.

Analīzes rezultātā iegūtais regresijas vienādojums ir

$$y = 20,7 \cdot 10^3 + 8,83 \cdot x, \quad \text{kWh}, \quad (1.8.)$$

kur $20,7 \cdot 10^3$ - regresijas brīvais loceklis, ar ražošanu nesaistītais elektroenerģijas patēriņš, kWh;

8,83 - regresijas koeficients, kWh/t;

x - saražotā produkcija, t.

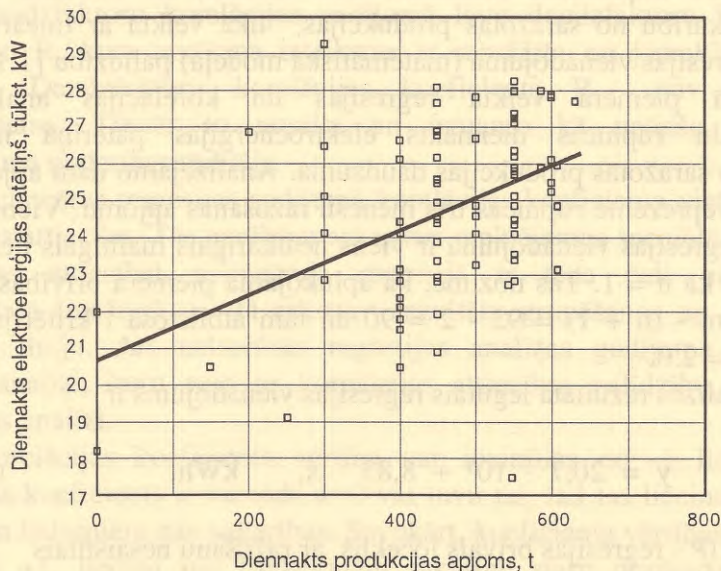
Analizējamo datu kopa un regresijas vienādojuma grafiskais attēls parādīti 1.4.attēlā.

Aprēķinātā korelācijas koeficienta vērtība $R = 0,71$ rāda, ka korelācija (saites ciešumu) starp diennakts elektroenerģijas patēriņu un saražoto produkciju ir apmierinoša. Analīzes rezultātā noteiktā Stjudenta kritērija vērtība $t = 6,32$, un spēkā ir sakarība $|t| > t_{\text{tab}}$ ($6,32 > 2.0$). Tas nozīmē, ka regresijas koeficients vienādojumā (1.8.) ir būtisks un tajā paturams.

Aplūkojot analizējamo datu izvietojumu 1.4.attēlā, redzams, ka

- ir būtiska izkliede ap vidēji statistisko vērtību (regresijas vienādojuma grafiku);

- produkcijas daudzuma izmaiņas nosaka ar precizitāti 50 līdz 100 t.



1.4.att. Diennakts elektroenerģijas patēriņš atkarībā no saražotās produkcijas būvmateriālu rūpnīcā.

Tālākajā uzņēmuma izpētes gaitā noskaidrojās, ka elektroenerģijas uzskaitē ir labā stāvoklī un tā nevar būt par pamatu datu izkliedei. Savukārt, produkcijas uzskaitē ir zemā līmenī. Uzņēmumā nav auto un dzelzceļa transporta svaru un produkcijas daudzumu nosaka pēc transporta kravnesības vai produkcijas līmeņa izmaiņām gatavās produkcijas krātuvē. Analizējot energoefektivitāti, tehnoloģiskajā procesā atklājās būtiski enerģijas zudumi un tās neracionāla izmantošana. Daži no šiem trūkumiem varētu būt nozīmīgi arī citiem uzņēmumiem.

1. Vērojams liels skaits elektrodzinēju, kuri ir nenoslogoti un strādā ar pazeminātu $\cos \varphi$.

2. Nevienmērīgs spriegums starp fāzēm. Ir zināms, ka katri 2% starp fāžu sprieguma izmaiņu pazemina motora lietderības koeficientu par 1%.
3. Rūpnīcā ir liels būvmateriālu sasmalcināšanas iekārtas (ložu dzirnavu) elektroenerģijas patēriņš. Tas ir saistīts ar sasmalcinātā materiāla separācijas iekārtu zemo efektivitāti - dzirnavās tiek ilgstoši apstrādāts viss materiāla daudzums bez smalko daļiņu iepriekšējas separācijas.
4. Sasmalcināšanas iekārtas oderējuma nolietošanās un bojājumu dēļ ložu pildījums netiek pacelts augstumā, kāds ir nepieciešams efektīvai sasmalcināšanai. Tādēļ pagarinās sasmalcināšanai nepieciešamais laiks un palielinās elektroenerģijas patēriņš.

Aplūkotais piemērs ir gadījums, kad iegūtais datu statistiskās apstrādes rezultāts nav izmantojams uzņēmuma turpmākajā energovadībā (menedžmentā), bet gan kalpo par pamatu tūlītējai uzņēmuma darbības analīzei, lai pēc iespējas ātri novērstu neefektīvu enerģijas izmantošanu. Ceļā uz energoefektivitātes paaugstināšanu viens no būtiskiem posmiem ir enerģijas un produkcijas uzskaites nodrošināšana. Par uzskaites jautājumiem tiks vēlreiz runāts 1.3. piemērā.

1.3. piemērs

Pārtikas rūpniecības uzņēmuma datu analīze tika veikta ar regresijas un korelācijas analīzes palīdzību, izmantojot viena faktora lineāru regresijas vienādojumu [1.14.].

Kā regresijas analīzes piemērs ir aplūkota pārtikas rūpniecības uzņēmuma vairāku gadu statistisko enerģijas patēriņa un saražotās produkcijas daudzuma datu apstrāde. Regresijas analīze ir veikta, lai noskaidrotu vidēji statistisko sakarību starp enerģijas patēriņu uz produkcijas vienību atkarībā no ražošanas apjoma un to izmantotu rūpnīcas energoefektivitātes analīzei un energosaimniecības efektīvai vadībai. Rūpnīca ražošanai un siltumapgādei nepieciešamo siltuma enerģiju iegūst katlu mājā, kurā kā kurināmo lieto mazutu. Analīzei izmantoti dati par

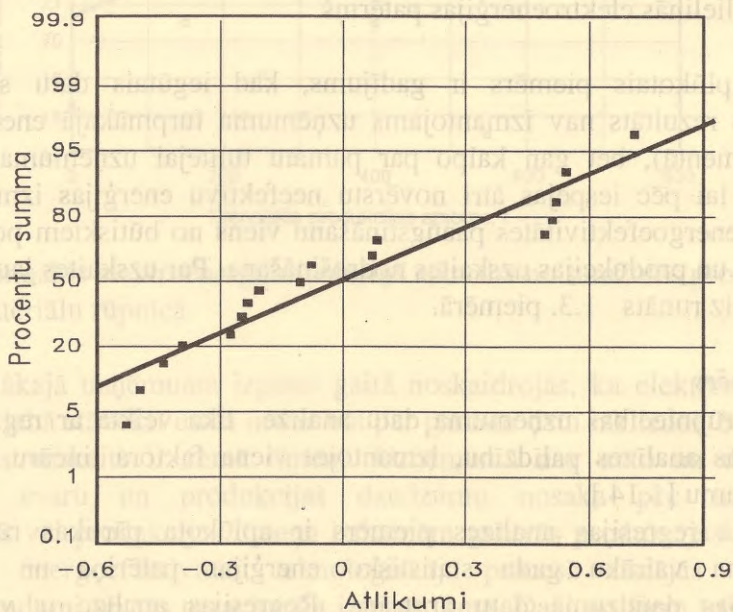
siltumenerģijas patēriņu tikai ražošanai. Īpatnējais enerģijas patēriņš ir vērtēts ar īpatnējā mazuta patēriņa palīdzību (nepieciešamais mazuta daudzums tonnās vienas tonnas produkcijas saražošanai).

Analīzei pakļauto datu kopa ir $m = 17$. Regresijas analīzes rezultātā iegūts lineārs matemātiskais modelis

$$y = b_0 + b_1x, \quad (1.9.)$$

kur y - īpatnējais kurināmā patēriņš, t/t;

x - saražotā produkcija, t.



1.5.att. Pārtikas rūpniecības uzņēmuma datu kopas normālā sadalījuma likuma pārbaude.

Sākot regresijas analīzi, ir jāpārlicinās, vai tās lietojums aplūkojamajai datu kopai ir korekts. To var izdarīt, noskaidrojot, vai

atkarīgais mainīgais lielums (īpatnējais kurināmā patēriņš) pakļaujas normālajam sadalījuma likumam. Pārbaudes rezultāti grafiski parādīti 1.5. attēlā. Izvēlētajās koordinātēs normālā sadalījuma likuma grafiskais attēls ir taisne. Apstrādājamo datu (punktu) izvietojums ap šo taisni rāda, ka atkarīgā mainīgā lieluma sadalījums ir tuvu normālajam sadalījuma likumam un datu apstrādē var lietot regresijas analīzi.

Matemātiskā modeļa (1.9.) aprēķinu rezultāti doti 1.1. tabulā.

Modeļa aprēķina rezultāti.

1.1. tabula

Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t kritērijs	P vērtība
Konstante b_0	2.451855	10.3488	0.0000
Koeficients b_1	-0.004301	-5.6245	0.0000

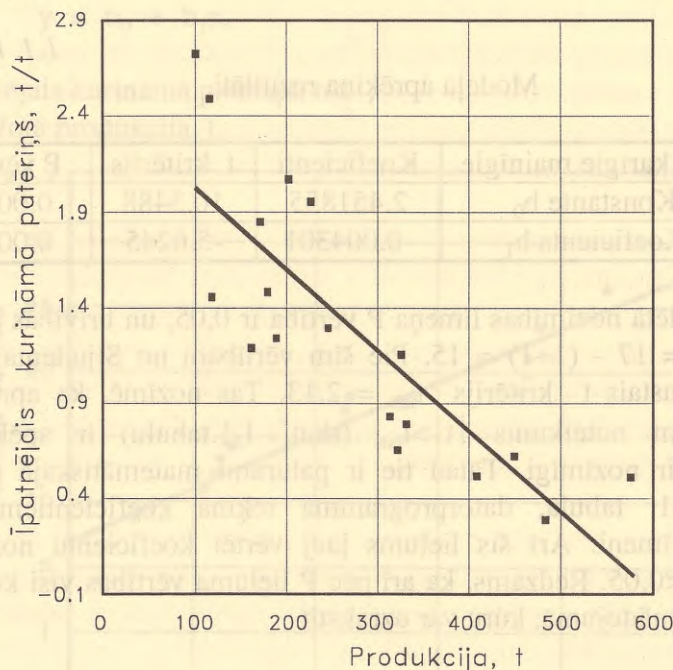
Izvēlēta nozīmības līmeņa P vērtība ir 0,05, un brīvības pakāpes $f = m - (n+1) = 17 - (1+1) = 15$. Pie šīm vērtībām no Stjudenta sadalījuma tabulām atrastais t kritērijs $t_{\text{tab}} = 2,13$. Tas nozīmē, ka aprēķinātajiem koeficientiem noteikums $|t| > t_{\text{tab}}$ (skat. 1.1.tabulu) ir spēkā un visi koeficienti ir nozīmīgi. Tātad tie ir paturami matemātiskajā modelī. Kā redzams 1.1. tabulā, datorprogramma rēķina koeficientiem atbilstošu nozīmības līmeni. Arī šis lielums ļauj vērtēt koeficientu nozīmību pēc sakarības $P < 0,05$. Redzams, ka arī pēc P lieluma vērtības visi koeficienti ir paturami vienādojumā, kuru var uzrakstīt

$$y = 2,452 - 0,0043x. \quad (1.10.)$$

Šis vienādojums atspoguļo rūpnīcas ikmēneša vidēji statistisko īpatnējā kurināmā patēriņa atkarību no mēnesī saražotās produkcijas. Izteiksme (1.10.) grafiski parādīta 1.6. attēlā. Ir redzams, ka šie dati labi korelē. Aprēķinātais korelācijas koeficienta kvadrāts ir 0,657, bet korelācijas koeficients, savukārt, ir 0,81. Regresijas vienādojuma (1.10.) tālākās pilnveidošanas iespējas aplūkotas 1.4. piemērā.

Aprēķinātais Fišera kritērijs ir $F = 31,63$ un tā vērtība, noteikta pēc Fišera sadalījuma tabulām atbilstoši nozīmības līmenim $P = 0,05$ un brīvības pakāpēm $f_1 = 16$ un $f_2 = 15$, ir $F_{\text{tab}} = 2,35$. Tas nozīmē, ka ir spēkā noteikums $F > F_{\text{tab}}$, un regresijas vienādojums adekvāti raksturo analizējamo datu kopu.

Tātad jānoskaidro jautājums: par ko liecina regresijas analīzes rezultāts, kas parādīts 1.6.attēlā?



1.6. att. Pārtikas rūpniecības uzņēmuma datu grafiskā regresijas analīze.

Ir redzams, ka īpatnējais kurināmā patēriņš būtiski mainās atkarībā no produkcijas daudzuma. Pieaugot ražošanas apjomam, samazinās īpatnējais kurināmā patēriņš. Tas liecina, ka būtisks ir pastāvīgais kurināmā patēriņš, kas nav saistīts ar ražošanas apjomu. Lai konstatētu, cik racionāla

ir enerģijas izmantošana, kādi ir tās zudumi uzņēmumā, tika veikta saimniecības izpēte un noskaidroti vairāki būtiski enerģijas zudumu avoti:

- apmēram 50% kondensāta tiek zaudēts ražošanā un netiek nogādāts atpakaļ katlu mājā;
- palielināts katla nopūšanas ūdens daudzums;
- palielināts gaisa patēriņa koeficients un tādēļ pazemināts katlu lietderības koeficients;
- paaugstināts siltuma enerģijas patēriņš mazuta sildīšanai;
- katla kurtuves bojājumu dēļ ir vērojami lieli gaisa piesūkumi katla gāzejās un kurināmā nepilnīga degšana kurtuvē.

Šo zudumu novēršana ļautu būtiski samazināt pastāvīgo kurināmā patēriņu uz produkcijas vienību.

Rūpnīcā pašreiz ir vērojama ražošanas apjoma samazināšanās. Tam ir vairāki iemesli. Viens no tiem ir noieta tirgus samazināšanās sakarā ar daļēju austrumu tirgus zaudēšanu un nespēju ieiet rietumu tirgū. Kā otru varētu minēt izejvielu piegāžu samazināšanos lauksaimniecībā notiekošo procesu dēļ. Samazinoties ražošanai, pieaug īpatnējais enerģijas patēriņš uz produkcijas vienību. Ņemot vērā to, ka kurināmā sastāvdaļa produkcijas pašizmaksā ir būtiska, produkcija sadārdzinās. Tādā veidā pazeminās produkcijas konkurences spēja tirgū, un tas noved pie jaunas tirgus zaudēšanas. Loks noslēdzas. Šeit ir tikai viens ceļš, kā to pārraut: palielināt energoefektivitāti. Tas nozīmē:

- samazināt pastāvīgo kurināmā patēriņu, kurš daļēji saistās ar enerģijas zudumiem;
- samazināt enerģijas patēriņu produkcijas ražošanai, pārejot uz energomazietilpīgāku tehnoloģiju;
- palielināt ražošanas apjomu.

Taču katrā laika posmā pastāv noteiktas iespējas. Tas nozīmē, ka uzņēmumam līdzekļu trūkuma dēļ nav iespējas iegādāties jaunu tehnoloģiju un ražošana paliek tādā līmenī, kādu diktē noieta tirgus un izejvielu piegādes.

Nākošais jautājums varētu būt: kāds ir vēlamais īpatnējais kurināmā patēriņš vai "mērķis", uz kuru vajadzētu tiekties? Vispirms būtu nepieciešams noturēt visu pozitīvo, kas ir sasniegts uzņēmumā, to nepasliktinot. Šo "mērķi" raksturo regresijas vienādojuma grafiks, kas parādīts 1.6.attēlā un atspoguļo pašreizējo uzņēmuma energoefektivitāti, kura novērtēta, analizējot vairāku gadu attiecīgos statistiskos datus. Līkne jāievada datorā, un to vajadzētu izmantot uzņēmuma energovadības speciālistam. Ievadot datorā jaunus datus, jāanalizē to novietojums: vai tie atrodas uz līknes, zem vai virs tās. Pēdējā gadījumā ir jāmeklē, kāds ir īpatnējā enerģijas patēriņa pieauguma iemesls. Vai tas ir operatīvā personāla neveiksmīgas darbības rezultāts, un šajā gadījumā būs vērojams vienreizējs īpatnējā enerģijas patēriņa pieaugums, vai arī iekārtas novecošanās un pirmsavārijas stāvoklis, ko raksturo pastāvīgs enerģijas patēriņa pieaugums. Katrā minētajā gadījumā veicami atšķirīgi pasākumi.

Pieņemsim, ka īpatnējā enerģijas patēriņa analīzes rezultātā noskaidrojās iekārtas remonta vai nomaiņas nepieciešamība. Energovadība deva uzdevumu un tas tika paveikts. Saprotams, ka iekārta strādās efektīvāk un īpatnējais enerģijas patēriņš jaunajos apstākļos samazināsies. Tagad regresijas vienādojuma grafiskais attēls vairs neatspoguļos to īpatnējo enerģijas patēriņu, kurš būtu jāievēro. Tādēļ grafiku nepieciešams koriģēt, un visbiežāk to dara aprēķinu ceļā, izvērtējot, kādu efektu devuši energoefektivitātes jomā veiktie pasākumi. Protams, iekārtas darbināšanas gaitā jāsavāc papildu statistiskie dati. Tie jāanalizē, lai noskaidrotu aprēķinu pareizību.

Neskaidrs ir jautājums, kuri dati labāk izmantojami analīzei: mēneša, nedēļas vai dienas vidējie rādītāji. Viss ir atkarīgs no tā, kādam mērķim domāts izmantot datus. Ja nolūks ir iekārtas tehniskā stāvokļa diagnosticēšana, tad var izmantot mēneša vidējos datus ilgāka laika (gada) periodā. Savukārt operatīvā personāla darbību vērtēt un laikus labot ir labāk

pēc dienas vai, sliktākajā gadījumā, nedēļas vidējiem darbības rādītājiem. Protams, dienas vai nedēļas rādītāju izmantošanas gadījumā pieaug datu vākšanas un analīzes procesa darbietilpība, kā arī nepieciešams iegādāties enerģijas un produkcijas precīzas uzskaites aparāturu.

Lemjot par statistiskajā analizē izmantojamiem datiem, būtu jāņem vērā arī kontrolējamais enerģijas patēriņš un saražotās produkcijas daudzums. Jo lielākas enerģijas un produkcijas izmaksas, jo lielākas ir līdzekļu ekonomijas iespējas, palielinot energoefektivitāti, un pamatotāka ir ikdienas enerģijas patēriņa kontrole un analīze.

Uzņēmuma vadībai bieži šķiet psiholoģiski nepieņemami ieguldīt līdzekļus energoefektivitātes kontroles un analīzes ierīcēs. Tās šķiet neproduktīvas, jo nepiedalās tieši ražošanas procesā. Šis uzskats ir maldīgs, un par to varēja pārliecināties pētītajā rūpnīcā, piedaloties tās energoefektivitātes analizē kopā ar amerikāņu firmas *RCG / Hagler, Bailly, Inc* speciālistiem [1.14.]. Darba gaitā noskaidrojās, ka, lai rūpnīcā izveidotu energovadības sistēmu, ir nepieciešams iegādāties:

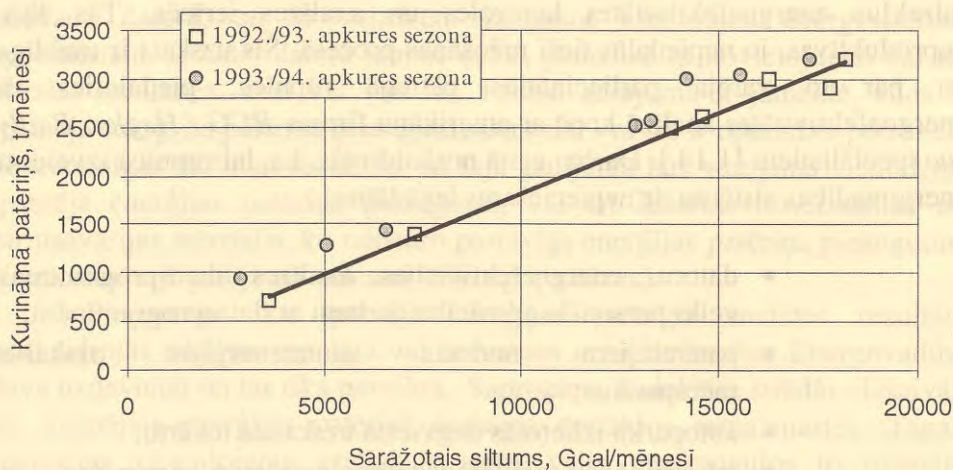
- datoru, energoefektivitātes analīzes datorprogrammas, veikt personāla apmācību darbam ar datorprogrammām;
- patērētājiem nodotās siltumenerģijas uzskaites mēraparātus;
- autoparkā izlietotās degvielas uzskaites iekārtu;
- autodzinēju regulēšanas nepieciešamo aparāturu, lai samazinātu degvielas patēriņu.

Pasaules prakse rāda, ka enerģijas sektora vadības sistēmas ieviešana ļauj samazināt enerģijas patēriņu par 2 ... 10 %. Ņemot par pamatu zemāko ekonomijas vērtību (2%), analīzes rezultātā noskaidrojās, ka ieguldījumu atmaksāšanās laiks ir pusgads.

Pasākumi, kuriem ir īss atmaksāšanās laiks, tiek uzskatīti par prioritāriem uzņēmuma energoefektivitātes paaugstināšanas jomā.

Cits aspekts viena faktora lineāru regresijas vienādojumu izmantošanai pašvaldības siltuma tīklu uzņēmumu datu analizē izklāstīts tālāk.

Datu analīze dod ne tikai iespēju aplūkot pašreizējo situāciju, bet arī izvērtēt energopatēriņa izmaiņu tendences. Daudzos Latvijas uzņēmumos īpatnējais kurināmā patēriņš ar katru gadu pieaug [1.15.]. To var konstatēt, apkopojot ikgadējās regresijas līknes. Lai ilustrētu iepriekšēiko, datu analīze vienā no pašvaldības siltumtīklu uzņēmumu katlu mājām parādīta 1.7. attēlā.



1.7. att. Kurināmā mēneša patēriņa izmaiņas atkarībā no saražotā siltuma siltumtīklu uzņēmuma katlu mājā.

Tas norāda, ka krītas energoefektivitāte šajos uzņēmumos, un parasti iemesls tam ir siltuma zudumu pieaugums un iekārtu lietderības koeficienta samazināšanās to novecošanās un slodzes krišanās dēļ.

Visos gadījumos tiek veidota koncepcija, kura paredz enerģijas patēriņa samazināšanu: parasti iesākumā tiek prognozēta energosaimniecības darbības uzlabošana, kopējo ikgadējo enerģijas patēriņu samazinot par 5%. Pirmie priekšlikumi vienmēr saistīti ar maziem

kapitālieguldījumiem un sistemātisku iekārtu darbināšanu, apkalpošanu un remontu.

Rūpnīcas energosaimniecības vadības sistēmas izmaiņas neprasa lielus kapitālieguldījumus, un to ieviešana ļauj ekonomēt enerģiju. Šis priekšlikums ir vairāk saistīts ar tirgus ekonomikas jautājumiem un informācijas un kontroles sistēmu ikdienā. Nenoliedzami, ka ceļš uz tirgus ekonomiku rūpnīcas energosaimniecībā var būt dažāds, taču skaidrs ir viens, ka bez kardinālām pārmaiņām šīs nozares apsaimniekošanā būs grūti pierādīt jebkura enerģijas patēriņa samazināšanas pasākuma lietderību. Piedāvātā shēma ir aicinājums uz neatkarīga enerģijas ražotāja izveidi un tā ir divpakāpju:

1. ekonomiski neatkarīga energocentra vai firmas izveidošana rūpnīcā;
2. regulārs enerģijas cenu aprēķins nedēļai.

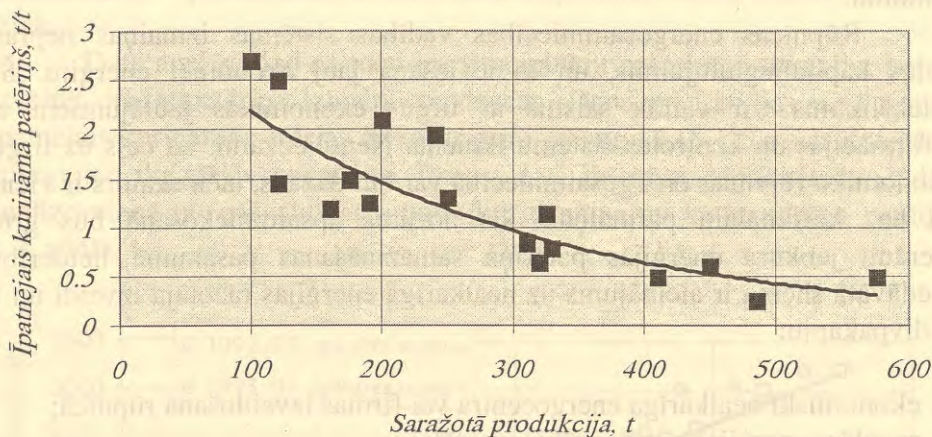
Tās ir cenas, par kurām enerģija tiek pārdota cehiem vai nodaļām, un informācija par tām patērētājam - ekonomikas nodaļai vai rūpnīcas vadībai - jāiesniedz nedēļu iepriekš. Katru mēnesi energocentrs iesniedz ekonomikas nodaļai rēķinus par patērēto enerģiju. Balstoties uz tiem, ekonomisti veic produkcijas izmaksu pārrēķinu.

Vairāk ietaupīt (līdz 5%) iespējams, pārveidojot iekārtu apkalpošanas organizāciju, izveidojot vienu vai vairākas energoefektivitātes brigādes, kas regulāri sekotu katlu, tvaika un karstā ūdens apgādes sistēmu, elektrisko motoru un transporta enerģijas patēriņam.

1.4. piemērs

Pārtikas rūpniecības uzņēmumu datu analīze tika veikta, izmantojot nelineāras regresijas vienādojumu.

Analīzei izmantoti 1.3.piemērā aplūkoti dati. Šis piemērs dots, lai parādītu, kā, izmantojot sarežģītākus nelineārus regresijas vienādojumus (matemātiskos modeļus), iegūt sakarības, kuras pilnīgāk apraksta analizējamo datu kopu. Ir jābūt noteiktam pamatojumam, lai lineāros matemātiskos modeļus nomainītu ar nelineāriem.



1.8. att. Pārtikas rūpniecības uzņēmuma īpatnējā kurināmā patēriņš atkarībā no saražotās produkcijas.

Ja par ražošanas tehnoloģiskā procesa nelineārām likumsakarībām trūkst iepriekšējas pietiekami aptverošas informācijas, tad par pamatojumu var kalpot analizējamo datu sakarību īpatnības. Aplūkojamajā piemērā īpatnējā kurināmā patēriņa atkarība no saražotās produkcijas daudzuma ir dota 1.6.attēlā, kura liecina, ka sakarība nav lineāra. Datu atkārtotas apstrādes rezultātā iegūts regresijas vienādojums

$$y = 3,29 e^{-0,004x}, \quad (1.11.)$$

kur y - īpatnējais kurināmā patēriņš, t/t;

x - produkcijas daudzums, t.

Vienādojums (1.11.) grafiski ilustrēts 1.8.attēlā. Korelācijas analīzes rezultātā iegūts korelācijas rādītājs $R^2 = 0,776$. Šis lielums rāda, ka iegūta statistiska izteiksme, kas labāk apraksta analizējamos datus. Lineāra

regresijas vienādojuma (1.10.) izmantošanas gadījumā korelācijas koeficienta kvadrāts $R^2 = 0,657$.

No sacītā izriet, ka aplūkojamā uzņēmuma energovadībai ieteicams izmantot sakarību (1.11.). Uzņēmuma energoefektivitātes paaugstināšanas iespējas, kas iztirzātas 1.3.piemērā, tikpat labi attiecas arī uz šo piemēru.

1.5. piemērs

Katlu mājā uzstādīts katls, kura kurtuvē dedzina šķeldu. Konstatēts, ka tā energoefektivitāte atkarīga no siltuma zudumiem, kuru būtiskākais komponents ir ar dūmgāzēm aizvadītais siltums. Problēmas inženiertehniskie aspekti izklāstīti nākamajā nodaļā, bet šajā piemērā aplūkotas daudzfaktoru regresijas analīzes lietojuma iespējas.

Ar dūmgāzēm aizvadītais siltums q_2 no katlu iekārtām, kuru kurtuvē sadedzina šķeldu, ir atkarīgs no kurināmā mitruma satura W , skābekļa satura dūmgāzēs O_2 un dūmgāzu temperatūras t_g . Eksperimentālo pētījumu rezultāti katlu mājās ar katlu iekārtām, kurās kurināšanai izmanto šķeldu, izvērtēti, izmantojot regresijas un korelācijas analīzi.

Eksperimentālo datu apstrādes rezultātā iegūts daudzfaktoru lineāras regresijas vienādojums, kurš izmantojams ar šķeldu kurināmo katlu energoefektivitātes analīzei. Šajā piemērā parādīts, kā lineāras regresijas ietvaros, lietojot sarežģītākus matemātiskus modeļus, izdodas pilnīgāk aprakstīt analizējamos datus.

Analizējamo datu kopa $m = 9$, un tā reprezentē deviņas katlu mājās iegūtos rezultātus, katliem strādājot nominālā režīmā.

Sakarība starp atkarīgajiem un neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem meklēta šādu vienādojumu veidā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3, \quad (1.12.)$$

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_1 \cdot x_3, \quad (1.13.)$$

kur y - ar dūmgāzēm aizvadītais siltums, q_2 , %;

x_1 - skābekļa saturs dūmgāzēs, %;

x_2 - mitruma saturs šķeldā, %;

x_3 - dūmgāzu temperatūra, °C;

$x_1 \cdot x_3$ - faktoru savstarpējās iedarbības efekts, %, °C.

Regresijas analīzes rezultātā iegūti vienādojuma koeficienti un vienādojumi pierakstāmi šādi:

$$y = -19,63 + 1,92X_1 - 0,01X_2 + 0,089X_3; \quad (1.14.)$$

$$y = -71,76 + 5,74X_1 + 0,186X_2 + 0,348X_3 - 0,0238X_1X_3. \quad (1.15.)$$

Gan vienādojuma koeficientu, gan šī vienādojuma tālākā statistiskā analīze veikta matemātiskajam modelim (1.15.).

Vienādojuma (1.15.) koeficienta nozīmības novērtējums dots 1.2.tabulā.

1.2.tabula

Vienādojuma (1.15.) koeficienti un to novērtējums.

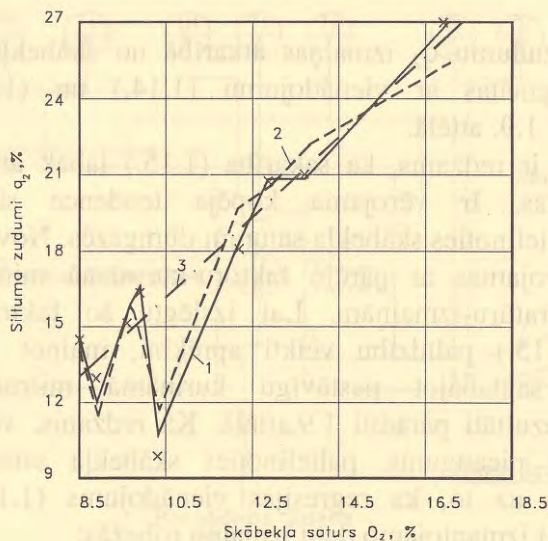
Neatkarīgie mainīgie	Koeficienti	t kritēriji	P vērtība
Konstante b_0	-71,7639	-4,9443	0,0078
Koeficients b_1	5,7450	5,6217	0,0049
Koeficients b_2	0,1857	2,846	0,0466
Koeficients b_3	0,3476	4,9836	0,0076
Koeficients b_4	-0,0238	-3,7603	0,0198

Datu apstrādē izvēlēts nozīmības līmenis $P = 0,05$ un brīvības pakāpes

$$f = m - (n + 1) = 9 - (4 + 1) = 4.$$

Šiem lielumiem atbilstošā t kritērija vērtība no Stjudenta sadalījuma tabulām ir $t_{tab} = 2,78$. Kā redzams no 1.2.tabulas, visiem koeficientiem ir piemērojams noteikums $|t| > t_{tab}$, un tie paturami vienādojumā. Koeficientu novērtējums pēc to nozīmības līmeņiem rāda, ka nozīmības līmeņu vērtības 1.2.tabulā visiem vienādojuma (1.15.) koeficientiem ir mazākas par izvēlēto

$P = 0,05$ nozīmības līmeņa vērtību. Arī šis rādītājs liecina par to, ka koeficienti paturami vienādojumā.



1.9. att. Siltuma zudumu q_2 izmaiņas atkarībā no skābekļa satura dūmgāzēs:

x - eksperimentālie dati;

1 - aprēķins ar vienādojumu (1.15.);

2 - aprēķins ar vienādojumu (1.14.);

3 - aprēķins ar vienādojumu (1.15.), ja nemainīgas ir W un t_g vērtības.

Vienādojuma (1.15.) adekvātuma pārbaude veikta, izmantojot Fišera kritēriju. Tā aprēķinātā vērtība ir $F = 51,8$. No Fišera sadalījuma tabulām noteiktā kritērija vērtība, ja nozīmības līmenis $P = 0,05$, brīvības pakāpes

$$f_1 = 9 - 1 = 8 \text{ un } f_2 = 9 - 4 = 5,$$

ir $F = 36,9$. Tātad izvēlētais matemātiskais modelis ir adekvāts un lietojams analizējamo datu aprakstam. Korelācijas analīzes rezultātā noteiktā

daudzfaktoru korelācijas koeficienta kvadrāta vērtība $R^2 = 0,98$. Jāatzīmē, ka modelim (1.14.) šī vērtība ir zemāka $R^2 = 0,928$. Tas nozīmē, ka vienādojums (1.15.) labāk apraksta analizējamo datu kopu - atbilstoši 98% un 92,8%.

Siltuma zudumu q_2 izmaiņas atkarībā no skābekļa satura O_2 , % dūmgāzēs, aprēķinātas ar vienādojumu (1.14.) un (1.15.) palīdzību, parādītas grafiski 1.9. attēlā.

1.9.attēlā ir redzams, ka sakarība (1.15.) labāk atspoguļo siltuma zudumu izmaiņas. Ir vērojama kopēja tendence siltuma zudumu pieaugumam, palielinoties skābekļa saturam dūmgāzēs. Novirzes no kopējās tendences skaidrojamas ar pārējo faktoru-kurināmā mitruma satura un dūmgāzu temperatūru-izmaiņām. Lai izslēgtu šo faktoru ietekmi, ar vienādojuma (1.15.) palīdzību veikti aprēķini, mainot skābekļa saturu dūmgāzēs un saglabājot pastāvīgu kurināmā mitruma saturu un temperatūras. Rezultāti parādīti 1.9.attēlā. Kā redzams, vērojams linerārs siltuma zudumu pieaugums, palielinoties skābekļa saturam dūmgāzēs. Jāvērš uzmanība uz to, ka regresijas vienādojums (1.15.) ir adekvāts regresijas analīzei izmantojamo datu izmaiņu robežās:

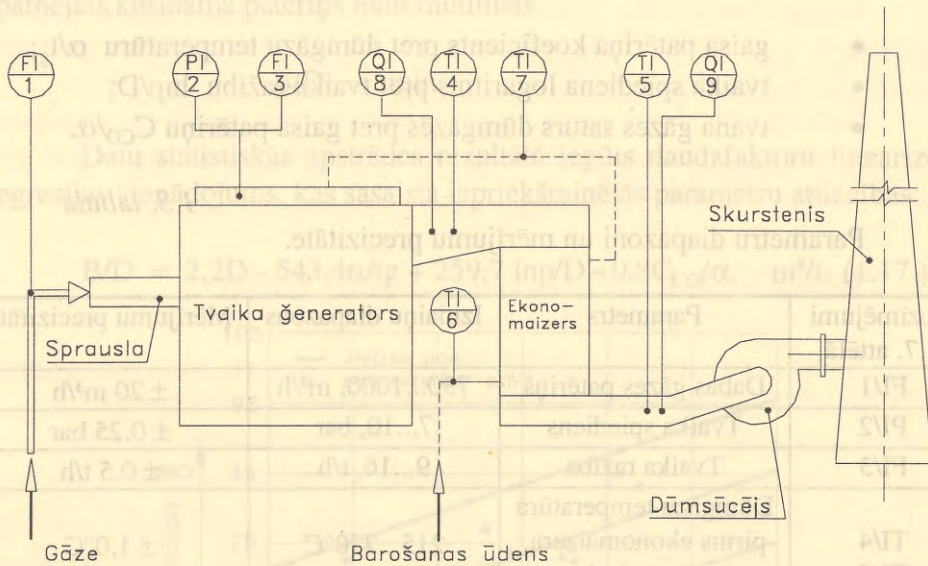
- skābekļa saturs O_2 no 8,5% līdz 17%;
- kurināmā mitruma saturs W no 45% līdz 60%;
- dūmgāzu temperatūra t_g no 145°C līdz 200°C.

1.3.3. Optimālo darbības režīmu noteikšana

Datu novirzes no īpatnējā kurināmā un enerģijas patēriņa regresijas liknes visos gadījumos rāda potenciālās iespējas iekārtu enerģijas efektivitātes paaugstināšanā, optimizējot darbības režīmus. Tas ir trešais datu korelācijas analīzes lietojuma virziens enerģijas vadības sistēmas attīstībā.

Lai ilustrētu šo apgalvojumu, tiek aplūkots tvaika katla DE 16/14 darbības izpēte vienā no Rīgas uzņēmuma katlu mājām [1.9.]. Šeit piedāvātais piemērs dots, lai ilustrētu optimizācijas metodes lietojuma

iespējas un iegūtos datus nevajadzētu vispārināt. Tas ieskicē taku, kā nokļūt pie mērķa.



1.10. att. Mērījumu shēma optimālo darbības režīmu noteikšanai.

Katla kurtuvē tika dedzināta dabas gāze. Katla izmēģinājumu laikā tika veikti mērījumi, kuri ļāva analizēt katla energoefektivitāti atkarībā no katla slodzes, tvaika spiediena, kurināmā patēriņa un gaisa patēriņa koeficienta. Mērījumu shēma parādīta 1.10. attēlā.

Parametru diapazoni un mērījumu precizitāte dota 1.3.tabulā.

Mērījumu dati apstrādāti, izmantojot daudzfaktoru regresijas analīzes metodi. Šinī gadījumā atkarīgais mainīgais ir īpatnējais kurināmā patēriņš tvaika ražošanai

$$b = B/D, \quad \text{m}^3/\text{t}, \quad (1.16.)$$

bet neatkarīgie mainīgie ir tvaika ražība un katla darbības dažādu parametru attiecības:

- gaisa patēriņa koeficients pret dūmgāzu temperatūru α/t_g ;
- tvaika spiediena logaritms pret tvaika ražību $\ln p/D$;
- tvana gāzes saturs dūmgāzēs pret gaisa patēriņu C_{CO}/α .

1.3. tabula

Parametru diapazoni un mērījumu precizitāte.

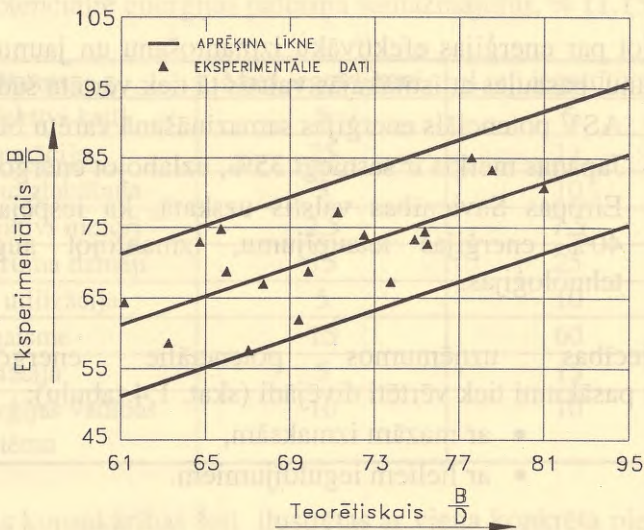
Apzīmējumi 1.7. attēlā	Parametrs	Izmaiņu diapazons	Mērījumu precizitāte
FI/1	Dabas gāzes patēriņš	730...1000, m ³ /h	± 20 m ³ /h
PI/2	Tvaika spiediens	7...10, bar	± 0,25 bar
FI/3	Tvaika ražība	9...16, t/h	± 0,5 t/h
TI/4	Dūmgāzu temperatūra pirms ekonomaizera,	215...270°C	± 1,0°C
TI/5	pēc ekonomaizera	103...142°C	± 0,5°C
TI/6	Barošanas ūdens temperatūra pirms ekonomaizera,	40...80°C	± 1,0°C
TI/7	pēc ekonomaizera	98...140°C	± 1,0°C
Q1/8 Q1/9	Dūmgāzu sastāvs, degšanas efektivitātes rādītāji pirms ekonomaizera, pēc ekonomaizera		
	O ₂	7...13%	± 0.1%
	CO	2...20ppm	± 1ppm
	CO ₂	6...11%	± 0.1%
	η	90...96%	± 0.1%
	α	1.3...2.06	± 0.05

Optimizējot tvaika katla darbību, nepieciešams sasniegt maksimālu katla darbības efektivitāti, un tas šinī gadījumā nozīmē, ka jāpanāk, lai īpatnējais kurināmā patēriņš būtu minimāls

$B/D \rightarrow \min.$

Datu statistiskās apstrādes rezultātā iegūts daudzfaktoru linearizēts regresijas vienādojums, kas sasaista iepriekšminētās parametru attiecības:

$$B/D = 2,2D - 543,4\alpha/tg + 259,7 \ln p/D + 0,8C_{CO}/\alpha, \quad \text{m}^3/\text{t}. \quad (1.17.)$$



1.11. att. Novērotās un prognozētās īpatnējā kurināmā patēriņa vērtības.

Tālāko pētījumu rezultātā iegūta laba sakritība starp novērotajām un noteiktajām vērtībām, jo korelācijas koeficienta kvadrāts ir $R^2 = 0,99$. Tātad šo regresijas vienādojumu iespējams izmantot īpatnējā kurināmā patēriņa prognozēšanai šajos katlos un dotajā parametru diapazonā. Jāatzīmē, ka tika

veikti arī faktoru reizinājumu ietekmes pētījumi. Taču tie nedeva būtisku ietekmi.

Izmēģinājumu datu salīdzinājums ar aprēķina vienādojumu grafiski atspoguļots 1.11.attēlā. Tajā redzams, ka iegūtie dati atrodas intervāla robežās, kura ticamības varbūtība ir 95%.

Sarežģītāku tehnoloģisko procesu optimizācijas modeļiem iespējams izmantot citas funkcijas, piemēram, eksponentes, neatkarīgo mainīgo apgriezti proporcionālus lielumus.

1.4. PROJEKTI. REALIZĀCIJAS IESPĒJAS

Runājot par enerģijas efektīvāku izmantošanu un jaunu tehnoloģiju tirgus veidošanu, pasaules attīstītākajās valstīs tā tiek vērtēta šādi [1.16.]:

- ASV potenciāls enerģijas samazināšanā varētu būt 20%;
- Japānas mērķis ir sasniegt 35%, uzlabojot energoefektivitāti;
- Eiropas Savienības valstīs uzskata, ka iespējams sasniegt 40% enerģijas ietaupījumu, izmantojot augstvērtīgākas tehnoloģijas.

Rūpniecības uzņēmumos potenciālie energoefektivitātes tehnoloģiskie pasākumi tiek vērtēti divējādi (skat. 1.4.tabulu):

- ar mazām izmaksām,
- ar lieliem ieguldījumiem.

Atkarībā no inženiertehniskajām un ekonomiskajām iespējām, kā arī neaizmirstot vides aizsardzības problēmas, enerģijas patēriņa samazināšanas projekti var tikt realizēti vairākās stadijās [1.17.]:

- vispirms tiek veikta energosaimniecības izpēte, tās vadības darbība, analizēti dati par iepriekšējo gadu darbu un ieskicēti virzieni energoefektivitātes uzlabošanai;
- pēc tam tiek sastādīts biznesa plāns, kurā aprēķinātas aptuvenas projekta kapitālizmaksas;

- nākošais solis ir konkursa dokumentācijas sastādīšana, kurā definēti ekonomiskie un tehniskie noteikumi projekta realizācijai;
- pieteikumu izskatīšana un tehniski ekonomiskā izvērtēšana tenderu konkursa noslēgumā ļauj izvēlēties optimālo risinājumu un precizēt projekta izmaksas;
- par pēdējo posmu jāuzskata pabeigta projekta izvērtēšana iekārtas ekspluatācijas laikā gadu gaitā.

1.4. tabula

Potenciālie enerģijas patēriņa samazinājumi, % [1.15.].

Pasākums	Mazi ieguldījumi	Lieli ieguldījumi	Kopējie
Augsti efektīvi katli	5	5	10
Koģenerācija	25	11	36
Enerģijas uzglabāšana	5	10	15
Augsti efektīvi motori	2,5	7,5	10
Mainīga ātruma dzinēji	15	25	40
Siltuma utilizācija	5	10	15
Apgaisme	15	60	75
Izolācija	5	15	20
Pilnīga enerģijas vadības sistēma	10	10	20

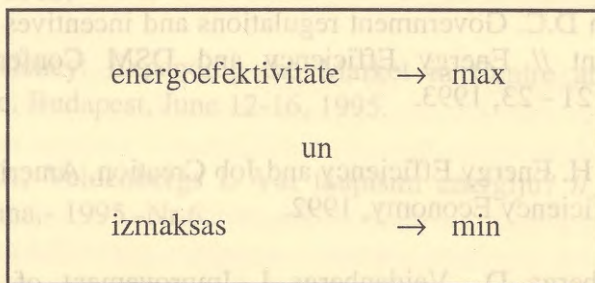
Dažas kopsakarības šeit ilustrētas ar viena konkrēta piemēra analīzi. 1992. gadā kopā ar amerikāņu firmas *RCG / Hagler, Bailly* inženieriem tika uzsākta energosaimniecības izpētīšana pārtikas rūpniecības uzņēmumā. Tās rezultātā iekārtu energoefektivitātes uzlabošanai tika izstrādāti priekšlikumi, kuri bija saistīti vairāk ar ieteikumiem rūpniecības un energosaimniecības vadības sistēmas ieviešanā un nelielu kapitālieguldījumu izmantošanā. Gadu vēlāk tie tika papildināti ar priekšlikumiem par lielākiem kapitālieguldījumiem, izmantojot ERAB kredītu. Tie apkopoti 1.5. tabulā.

1.5. tabula

Priekšlikumi energoefektivitātes uzlabošanai pārtikas rūpniecības uzņēmumā.

Rūpnīcas energosaimniecības vadības sistēma		Nelieli ieguldījumi		Lieli kapitālieguldījumi	
Pasākums	Ekonomija	Pasākums	Ekonomija	Pasākums	Ekonomija
Izmaiņas vadībā	2%	Mazuta saimniecības apsildes shēmas izmaiņas	25% no siltuma mazutam	Saldētavas sienu un griestu termiskā izolācija	20...30%
Izmaiņas iekārtu apkalpošanā	5%	Gaisa piesūkuma likvidācija kurtuvē	8% no katla siltuma	Mazākas jaudas tvaika katla uzstādīšana	10...15%
		Katlu nopūšanas samazināšana	0,5% no katlu siltuma	Tehnoloģisko iekārtu nomaiņa ar modernākām un mazāku īpatnējo enerģijas patēriņu	līdz 50%
		Katlu darbības regulāra kontrole	2% no katlu siltuma		
		Hidraulisko sūkņu nomaiņa siera ražotnē	320 kWh un 5% siera		

Jebkura projekta izstrādes laikā vienmēr jāmeklē optimums starp diviem vienlīdz svarīgiem faktoriem, kuri jāaplūko sistēmā:



Optimālie nosacījumi izpildāmi tikai tad, ja tos pamato tehniski, ekonomiski un ekoloģiski. Balstoties uz Latvijā realizēto projektu bāzes, tas ilustrēts tālākajās nodaļās.

Literatūra

- 1.1. Valsts enerģētikas programma, 1992.
- 1.2. Enerģētikas attīstības programma, 1994.
- 1.3. Enerģētikas pārstrukturēšanas programma, 1994.
- 1.4. Nilsson H. The many faces of demand - side management // Power. October 1994.- Vol.8- No5.
- 1.5. Koksnes izmantošana Latvijas enerģētikā. Kopsavilkums. JAAKKO POYRY pārskats ERAB C4100/EC - 92- 12 -68. 1995.

- 1.6. Ozoliņš J. Latvijas Republikas valdības politika enerģētikas sektorā // Racionāla enerģijas izmantošana.-1995.-Nr.4.
- 1.7. Nelson D.C. Government regulations and incentives for Demand Side Management // Energy Efficiency and DSM Conference, Stockholm. September 21 - 23, 1993.
- 1.8. Geller H. Energy Efficiency and Job Creation, American Council for an Energy-Efficiency Economy, 1992.
- 1.9. Blumberga D., Veidenbergs I. Improvement of Industrial Energy Efficiency in Latvia. // Proceedings of IAEE East-European Conference. Improved Energy Efficiency in Former Centrally Planned Economies. Kaunas, Lithuania, October 19 - 21, 1992.
- 1.10. Barr J. Progress in Energy Auditing, Monitoring and Targeting // Energy World. -1984.- No12.
- 1.11. Milton J.S., Arnold J.C. Introduction to Probability and Statics. Principles and Applications for Engineering and the Computing Systems. Mc Grow-Hill, Ltd, 1990.
- 1.12. Afiti A., Eisens S. Statistic Analysis. Approach using Computers.- Moscow, 1982.
- 1.13. Energy Efficiency Audit Report Saulkalne Building Material Plant. USAID Contract EUR-0015-C-00-1007-00. RCG/Hagler, Bailly, Inc; B.V.Ekodoma,Ltd; Riga Technical University. February,1992.
- 1.14. Energy Efficiency Audit Report Preili Cheese Plant. USAID Contract EUR-0015-C-00-1007-00. RCG/Hagler, Bailly, Inc, Energy,Ltd, Riga Technical University. March,1992.

1.15. Blumberga D., Veidenbergs I. Improving Energy Efficiency: The Supply Side Approach Lessons // ECEEE Summer Study . Mandeleu, France, June 5 - 7, 1995.

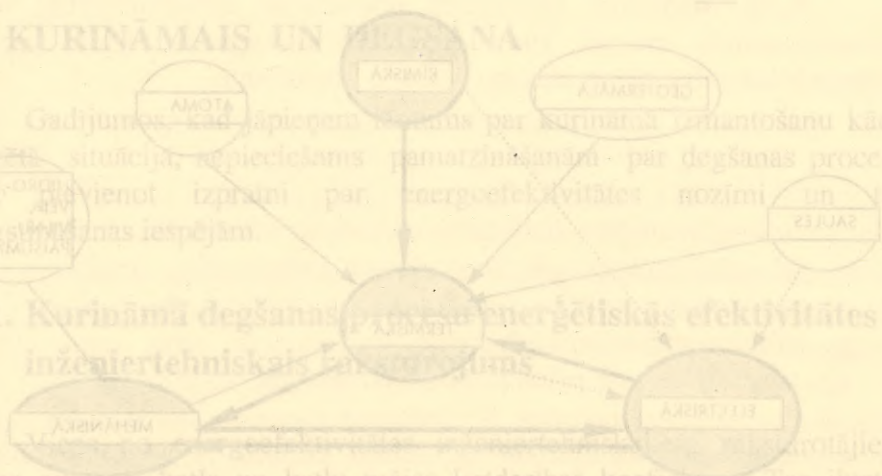
1.16. Energy Efficiency: Expanding the Market in Centre and Eastern Europe. Conference. Budapest, June 12-16, 1995.

1.17. Blumberga D., Veidenbergs I. Vai taupīsim enerģiju? // Racionāla enerģijas izmantošana. - 1995.-Nr.6.

2.2. KURINĀMAIS UN DEĢŠANĀS

Gadījumā, kad jāpieņem lēmums par kurinātāja izmantošanu kādā konkrētā situācijā, nepieciešams pamatzināšanu par degšanas procesa norisi, lai vienoti izprastu par enerģētiskās izvēles iespējam.

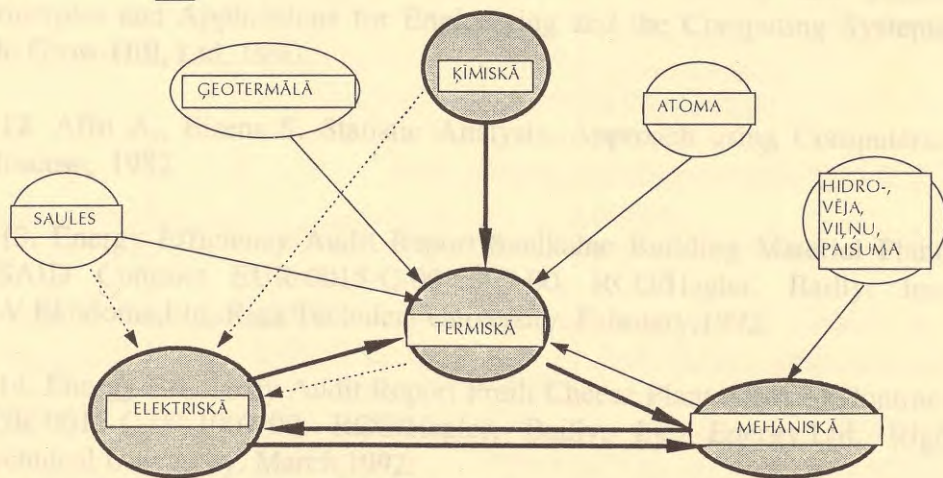
2.2.1. Kurināma degšanas procesa enerģētiskās efektivitātes inženiertehniskais pamatstāsts



2. ENERGOEFEKTIVITĀTES INŽENIERTEHNISKIE ASPEKTI

2.1. ENERĢIJAS PĀRVEIDE

Enerģētiski un ekonomiski pamatoti enerģijas veidu lietošanas meklējumiem vajadzētu sākties ar enerģijas pārveides metožu izvērtējumu. Enerģijas pārveides iespējas shematiski parādītas 2.1. attēlā un, kā redzams vispārējā gadījumā, var tikt realizētas dažādos veidos [2.1.]. Visbiežāk praksē tiek izmantota organiskā kurināmā ķīmiskās enerģijas pārveide dūmgāzu termiskajā enerģijā, kuru var izmantot dažādi: tiešā veidā - dīzeļģeneratoros vai to siltumu nododot tvaikam, ūdenim, kā arī citam siltumnesējam katlos. Siltuma enerģiju var pārveidot mehāniskajā gan turbīnās, gan dažādos dzinējos. Ģeneratoros mehānisko enerģiju savukārt iespējams pārveidot elektriskajā enerģijā.



2.1. att. Enerģijas pārveidošanas iespējas.

Līdzīgi var skaidrot kodolenerģijas, ģeotermālo ūdeņu, saules un zemes siltuma enerģijas pārveidi. Visvienkāršāk ir realizēt hidro-, vēja, viļņu un paisuma bēguma (plūdmaiņu) enerģijas pārveidi mehāniskajā enerģijā un tālāk - elektriskajā enerģijā.

Elektrisko enerģiju ir ērti pārvadīt lielos attālumos, izmantojot elektriskos tīklus. Patērētājs elektrisko enerģiju pārveido sev nepieciešamā formā: elektriskajos motoros - mehāniskajā enerģijā, elektriskajos sildītājos - termiskajā utt.

Ar pārtrauktām līnijām 2.1. attēlā parādīti tehniski iespējami, bet šobrīd ekonomiski neefektīvi enerģijas pārveides varianti.

Visas pasaules enerģētiķi ar sakāpinātu interesi pievēršas atjaunojamiem energoresursiem: saules, vēja, biomasas, paisuma bēguma enerģijas izmantošanas iespējām. Latvijas enerģētiķu skats nākotnē šajā jautājumā atspoguļots Enerģētikas attīstības programmā.

Šis nodaļas uzdevums ir palūkoties uz dažiem enerģijas izmantošanas inženiertehniskajiem aspektiem, liekot lietā ilggadējo pieredzi, kas gūta analītisku un eksperimentālu pētījumu rezultātā, kā arī projektus praktiski realizējot dzīvē.

2.2. KURINĀMAIS UN DEGŠANA

Gadījumos, kad jāpieņem lēmums par kurināmā izmantošanu kādā konkrētā situācijā, nepieciešams pamatzināšanām par degšanas procesa norisi pievienot izpratni par energoefektivitātes nozīmi un tās paaugstināšanas iespējām.

2.2.1. Kurināmā degšanas procesu enerģētiskās efektivitātes inženiertehniskais raksturojums

Viens no energoefektivitātes inženiertehniskajiem raksturotājiem siltuma avotā ir katla un katlu mājas lietderības koeficients. Tas ilustrē iegūtās enerģijas attiecību pret patērēto enerģiju.

Lai ņertos pie energoefektivitātes paaugstināšanas jautājumu risināšanas, vispirms jāaplūko katla lietderības koeficienta komponenti, no kā tie atkarīgi un kā tos ietekmēt.

2.2.1.1. Katla lietderības koeficients

Katla lietderības koeficientu var noteikt gan no tiešās, gan no apgrieztās katla bilances vienādojuma.

Tiešās bilances vienādojums ir:

$$\eta_{ka} = Q_{ka} \times 100 / (B \times Q_z^d), \quad (2.1.)$$

kur η_{ka} - katla agregāta lietderības koeficients, %;

Q_{ka} - katlā saražotais lietderīgais siltuma daudzums, kW (kcal/h);

B - kurināmā patēriņš, kg/s (kg/h);

Q_z^d - kurināmā zemākais sadegšanas siltums, kJ/kg (kcal/kg).

Katla lietderības koeficienta noteikšanai siltumenerģētiķi biežāk izmanto netiešo metodi, kuras precizitāte ir augstāka. Katla apgrieztā siltuma bilance balstās uz siltuma zudumu noteikšanu:

$$\eta_{ka} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2.2.)$$

kur q_2 - ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadītais siltums, %;

q_3 - ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi, %;

q_4 - mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi, %;

q_5 - siltuma zudumi apkārtējā vidē, %;

q_6 - ar izdedžiem un pelniem zaudētais siltums, %.

Ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadītais siltums ir degšanas produktu fiziskais siltums, kuru aizvada no katla. To nosaka, izmantojot gāzes analizatora mērījumu datus un temperatūras mērījumus. Šos siltuma

zudumus aprēķina, izmantojot dūmgāzu un apkārtējā gaisa entalpiju starpību:

$$q_2 = (H_{dg} - \alpha H_g) \times (100 - q_4) / Q_z^d, \% \quad (2.3.)$$

kur H_{dg} - aizplūstošo dūmgāzu entalpija, kJ/kg (kcal/kg), kuru nosaka atkarībā no kurināmā sastāva, gaisa patēriņa koeficienta un dūmgāzu temperatūras;

α - gaisa patēriņa koeficients aiz katla, kuru izskaitļo, izmantojot gāzes analizatora mērījumu datus: skābekļa vai ogļskābās gāzes koncentrāciju dūmgāzēs;

H_g - gaisa entalpija, kJ/kg (kcal/kg), kuru aprēķina atkarībā no gaisa temperatūras.

Gaisa patēriņa koeficientu aprēķina formula ir atkarīga no degšanas apstākļiem:

- pilnīgas degšanas gadījumā

$$\alpha = 21 / 21 - O_2; \quad (2.4.)$$

- ķīmiski nepilnīgas degšanas gadījumā

$$\alpha = 21 / [21 - 79 \times (O_2 - 0,5CO) / N_2], \quad (2.5.)$$

kur O_2 - skābekļa koncentrācija dūmgāzēs, %, kura atbilst gāzes analizatora mērījumam;

CO - tvana gāzes koncentrācija dūmgāzēs, %, kura atbilst gāzes analizatora mērījumam;

N_2 - slāpekļa koncentrācija dūmgāzēs, %, kuru nosaka ar vienādojumu:

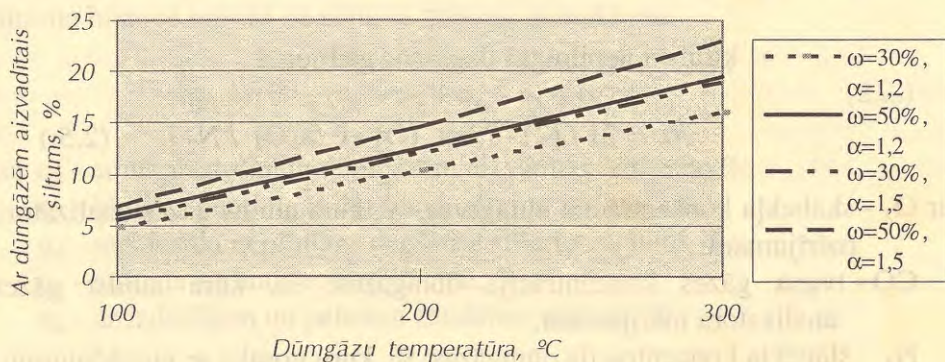
$$N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO); \quad (2.6.)$$

CO₂ - ogļskābās gāzes koncentrācija dūmgāzēs, %, kuru mēra ar gāzes analizatoru vai nosaka ar speciālu degšanas procesu diagrammu palīdzību.

Sakarā ar to, ka normālos degšanas apstākļos tvana gāzes koncentrācija ir niecīga, tad ar gāzes analizatoru parasti mēra tās koncentrāciju, nevis %, bet tilpuma miljonaļās daļās. Tad pārrēķinam izmanto sakarību:

$$1\% = 10\,000\text{ ppm.}$$

Ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadītie siltuma zudumi ir atkarīgi gan no dūmgāzu temperatūras, gan dūmgāzu sastāva un tilpuma. Savukārt, pēdējie ir atkarīgi no gaisa piejaukuma dūmgāzēm, kā arī no kurināmā sastāva, it īpaši kurināmā mitruma. Šo siltuma zudumu izmaiņu analīzi iespējams veikt ar datoru palīdzību. Daži no iegūtajiem rezultātiem enerģētiskajai koksnei apkopoti grafiski [2.2.] (skat. 2.2.att.), un tie ilustrē katra komponenta īpatsvaru ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu vērtībā. Kā redzams attēlā, siltuma zudumi ar aizplūstošajām dūmgāzēm var pārsniegt 20% robežu. Praksē nācies sastapties ar enerģijas izmantošanas izšķērdību arī lielākos apmēros, kad to vērtība sasniedz 30% un vairāk.



2.2.att. Siltuma zudumu q_2 vērtības atkarībā no dūmgāzu temperatūras, gaisa patēriņa koeficienta un koksnes mitruma satura.

Tātad visi trīs parametri būtiski ietekmē katla darbības energoefektivitāti un tādēļ nepieciešams to vērtības samazināt līdz optimālām (nevis līdz minimālām). Degšanas procesa optimizācija saistīta arī ar citu siltuma zudumu lielumu ievērošanu, jo, samazinot vienus, var veidoties situācija, ka pieaug citi. Par to nedaudz vēlāk.

Ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi rodas, ja kurināmā sastāva degošie elementi: ogleklis un ūdeņradis, piedaloties oksidēšanās reakcijā, veido arī degšanas procesa starpproduktus: CO, H₂, CH₄. Tas nozīmē, ka degšanas reakcija nenorit līdz galam un dūmgāzu sastāvā ir ne tikai gala produkti CO₂ un H₂O, bet arī iepriekšminētās gāzes.

Pie kam tvana gāze veidojas visvieglāk, tādēļ tikai tās klātbūtnē dūmgāzēs ir iespējamās ūdeņraža un metāna gāzes.

Ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumus nosaka, izmantojot gāzes analizatora tvana gāzes koncentrācijas mērījumu datus. Šos siltuma zudumus cietā kurināmā degšanas gadījumā aprēķina ar vienādojumu:

$$q_3 = 126,3 \cdot \text{CO} \cdot [0,0187 \cdot C^d + (\alpha - 0,21) \cdot V^o] \cdot (100 - q_4) / Q_z^d, \% \quad (2.7.)$$

kur C^d - oglekļa saturs kurināmā darba masā, %, kura vērtību iegūst no kurināmā analīzes datiem;

V^o - teorētiski nepieciešamais gaisa daudzums, m³/kg, kuru aprēķina, izmantojot kurināmā analīzes datus.

Ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumu lielumi ir atkarīgi no kurtuves un ārdu konstrukcijas, no kurināmā, degšanas produktu un gaisa sajaukšanās veida, vietas un laika. To vērtība, dedzinot šķidro kurināmo un gāzi, nedrīkst pārsniegt 0,5%, bet cietā kurināmā izmantošanas gadījumā ieregulētu katlu kurtuvēs - 2%. Prakse liecina, ka ne vienmēr izdodas panākt iepriekšminēto degšanas efektivitāti. Piemēram, kurinot malku un kokapstrādes atlikumus uz nekustīgiem ārdiem, ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi var sasniegt pat 25%. Zemajai energoefektivitātei iemesli meklējami degšanas tehnoloģiskajā procesā. Šajā gadījumā tie visbiežāk ir

atrodami kurtuves tilpuma neatbilstībā un aerodinamisko procesu nepareizā organizācijā.

Šeit lietderīgi būtu atcerēties gaisa patēriņa koeficienta optimālo vērtību noteikšanas nepieciešamību, jo, tam pieaugot, palielinās ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadītais siltums, bet samazinās ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi.

Mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi ir degšanas procesā zaudētais siltums, kas tiek aizvadīts no kurtuves ar nesadegušu kurināmo. Vispārējā gadījumā to rašanās iemesli var būt trejādi:

- kurināmā smalkumi izbirst caur ārdiem;
- kurināmo izvāc no kurtuves kopā ar izdedžiem;
- sīkākās kurināmā daļiņas aiznes dūmgāzes.

Kurināmā daļiņu caurbiršana liecina par nepareizu ārdu izvēli vai neatbilstoša kurināmā dedzināšanu. No šāda veida siltuma zudumiem nav iespējams praktiski izvairīties nemehanizētās nekustīgu ārdu kurtuvēs.

Otra veida mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi irniecīgi modernās ārdu kurtuvēs, it īpaši koksnes degšanas gadījumā. Taču par tiem nedrīkst aizmirst ar rokām apkalpojamās nekustīgu ārdu kurtuvēs.

Sīko kurināmā daļiņu aiznešana kopā ar dūmgāzu plūsmu ir atkarīga no kurināmā frakcionālā sastāva, kurtuves tilpuma un aerodinamisko procesu organizācijas tajā. Šī veida mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi pieaug, ja kurināmais satur daudz smalkumu vai velkme un gaisa padeve netiek atbilstoši regulēta.

Vispārējā gadījumā mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumus nosaka, summējot trīs iepriekš aplūkotos komponentus:

$$q_4 = q_{4C} + q_{4iz} + q_{4aiz}, \quad \% \quad (2.8.)$$

kur q_{4C} - caurbiruša kurināmā mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi, %;

q_{4iz} - ar izdedžiem aizvākta kurināmā mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi, %;

q_{4aiz} - ar dūmgāzēm aiznesta kurināmā mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi, %.

Normatīvie dokumenti, pēc kuru noteikumiem mēs dzīvojam iepriekšējos 50 gadus, pieļāva lielas mehāniski nepilnīgas degšanas siltumu zudumu vērtības, piemēram, nemehanizētu nekustīgu ārdū kurtuvēs tie drīkstēja būt līdz 14%. Praktiskie katlu darbības pētījumi liecina, ka šāda tipa neregulējamās kurtuvēs tie var sasniegt 30% (dažreiz pat 40...50%). Turpretī modernās ārdū kurtuvēs tie ir niecīgi un, dedzinot koksni, to vērtība retos gadījumos ir lielāka par 1%.

Mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumus nosaka, analizējot izdedžus un pelnus (arī tos, kas tiek aiznesti ar dūmgāzēm). To veic, dedzinot iegūtos pārpalikumu paraugus laboratorijas mufelī.

Siltuma zudumi apkārtējā vidē ir siltums, kas tiek aizvadīts no kurtuvju, katlu, ekonomaizeru un rovjū ārējām virsmām.

Šo zudumu vērtības tiek normētas katlu nominālajai slodzei. Standartvērtības atšķiras agregātiem, kuri izgatavoti Rietumeiropā un bijušajā PSRS (skat. 2.3. attēlu).

2.1. piemērs

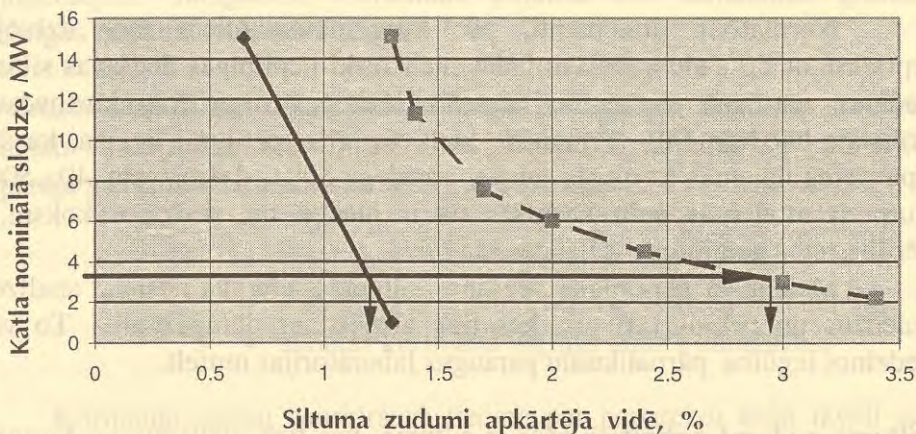
Katla nominālā siltuma ražība ir 3,2 MW.

Noteikt siltuma zudumus apkārtējā vidē, izmantojot vācu un bijušās PSRS standartus.

Siltuma zudumu q_5 noteikšana parādīta 2.3. attēlā:

- lietojot vācu standartu DIN 1942, siltuma zudumi $q_5 = 1,2\%$,
- izmantojot "Katlu siltumtehniskā aprēķina normatīvās metodes" standartnomogrammu, $q_5 = 2,9\%$.

Siltuma zudumi apkārtējā vidē, kas noteikti ar vācu standartu, ir 2,4 reizes mazāki.



2.3.att. Siltuma zudumi apkārtējā vidē:

- - vācu standarts DIN 1942;
- - - - - bijušās PSRS normatīvi.

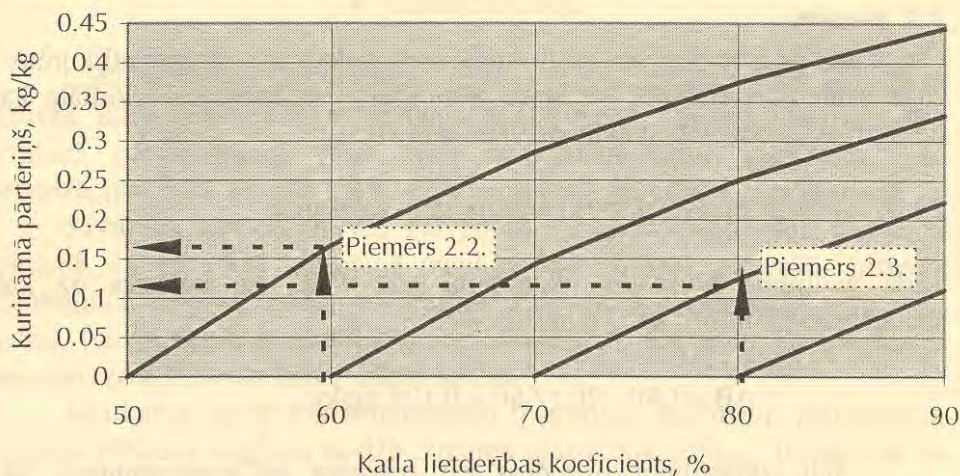
Kā redzams no 2.3. attēla un 2.1. piemēra, bijušajā PSRS katli, kuri līdz šim tiek lietoti Latvijā, tika būvēti pēc normatīviem, kas pieļauj daudz lielākus siltuma zudumus apkārtējā vidē. Tāpēc, pārejot uz rietumu standartiem, jābūt uzmanīgiem, izvērtējot veco katlu darbību.

Patiesās vērtības siltuma zudumiem apkārtējā vidē var iegūt, katrā konkrētā gadījumā mērot katla ārējās virsmas temperatūras un pēc tam veicot siltumapmaiņas aprēķinus. Mērījumi jāuzskata par vienu no energo vadības pasākumiem katlu mājā, jo tie dod arī iespēju atrast vietas uz katlu iekārtu ārējās virsmas, kur dažādu iemeslu dēļ pieaug siltuma zudumi apkārtējā vidē, un likvidēt bojājumus..

Ar izdedžiem un pelniem zaudētais siltums ir fiziskais siltums, kas tiek aizvadīts no katla kopā ar izdedžiem un pelniem. Cietā kurināmā degšanas gadījumā kurtuvēm ar sauso izdedžu savākšanu šie zudumi ir niecīgi un nav vērā ņemami. Tie nedaudz pieaug, ja koksnes smalkumi ir sajaukti ar smiltīm. Parasti šos zudumus ņem vērā, lietojot šķidrās izdedžu aizvākšanas sistēmas kamerkurtuvēs.

2.2.1.2. Kurināmā pārtēriņš

Katla lietderības koeficienta noteikšana ir viens no pirmajiem soļiem energosaimniecības vadībā. Ar tā palīdzību iespējams noteikt kurināmā pārtēriņu zemas katla energoefektivitātes gadījumā. Lai spriestu par iespējamo kurināmā ekonomiju, svarīgi ir zināt katla lietderības koeficienta absolūto vērtību. Gadījumos, kad sākotnējā katla lietderības koeficienta vērtība būs zemāka, kurināmā ekonomija būs lielāka, kaut arī siltuma zudumu samazināšana abos gadījumos būtu vienāda. To iespējams ilustrēt ar vienkāršu piemēru.



2.4.att. Kurināmā pārtēriņš katla lietderības koeficienta samazināšanās dēļ.

Kurināmā pārtēriņš ir gadījumā, ja lietderības koeficients samazinās. Pretējā gadījumā, ja lietderības koeficients pieaug, kurināmā patēriņš samazinās, tas nozīmē, ka šajā situācijā jārunā par kurināmā ekonomiju. Grafiku 2.4. attēlā var izmantot abos gadījumos.

2.2. piemērs

Katla kurtuvē uz nekustīgiem ārdiem sadedzina malkas pagales. Katla lietderības koeficients ir mainīgs laika periodā starp malkas iesviešanas brīžiem. Vidējais $\eta = 50\%$. Uzlabojot degšanas procesu, lietderības koeficientu izdevās paaugstināt līdz 60%.

Noteikt enerģētiskās koksnes patēriņa samazināšanos.

Tādā gadījumā kurināmā ekonomija būs 0,167 kg koksnes uz katru sadedzinātās koksnes kg. To iespējams noteikt ar formulu:

$$\Delta B = (60 - 50) / 60 = 0,167 \text{ kg / kg.}$$

2.3. piemērs

Cita situācija izveidojusies katlu mājā, kurā sadedzina koksnes atlikumus un zāģu skaidas. Uzlabojot degšanas tehnoloģiju, uzlabošanas rezultātā katla lietderības koeficients pieaug no 70% līdz 80%.

Noteikt enerģētiskās koksnes patēriņa samazināšanos.

Tādā gadījumā kurināmā ekonomija būs 0,125 kg koksnes uz katru sadedzinātās koksnes kg. To nosaka šādi:

$$\Delta B = (80 - 70) / 80 = 0,125 \text{ kg/kg.}$$

Šeit izklāstītajos piemēros var izmantot arī nomogrammu (skat. 2.4.attēlu). Par tās veidošanu sīkāk paskaidrots rakstā [2.3.]. Grafiskais attēls ļauj ērti un ātri novērtēt lietderības koeficienta izmaiņas un kurināmā

pārtēriņu. Lai to veiktu, uz horizontālās ass jāatrod lietderības koeficienta sākuma vērtība un jāizmanto likne, kura sākas šajā punktā. Izmantojot jaunās - paaugstinātās lietderības koeficienta vērtības, atrod punktu uz līknes un vertikālās ass, nolasa atbilstošo kurināmā ekonomijas vērtību kg attiecinātu pret sadedzinātā kurināmā kg. Ja lietderības koeficienta sākotnējai vērtībai nav atbilstošas līknes, tad tā jāatrod interpolācijas ceļā.

2.2.2. Katlu kurtuves. To darbības īpatnības

2.2.2.1. Kurtuvju konstrukcijas

Neraugoties uz to, ka kurtuvju konstrukcijas ir ļoti atšķirīgas, tās iedalās divās lielās grupās:

- ārdū kurtuves,
- kamerkurtuves.

Cietā kurināmā dedzināšanai nelielas jaudas katlos parasti lieto ārdū kurtuves, kuru konstrukcijas var būt ļoti atšķirīgas. Tās var klasificēt pēc kurināmā pārvietošanas veida, pēc aerodinamiskajām pazīmēm, pēc mehanizācijas pakāpes, pēc kurtuves novietojuma un citiem parametriem.

Savukārt, kamerkurtuves galvenokārt izmanto šķidrā un gāzveida kurināmā, kā arī cietā kurināmā putekļu dedzināšanai, jo pašā kurtuves nosaukumā ir ietverta definīcija - kurināmā dedzināšana kamerā - telpā, t.i., tīlpumā (nevis slānī) kontaktējoties ar oksidētāju. Cietajam kurināmajam kamerkurtuves izmanto lielas jaudas katlos.

Neatkarīgi no to konstruktīvajām īpatnībām, kurtuvēm jānodrošina kurināmā efektīva degšana slodžu izmaiņu diapazonā 20% ... 100%. Lai to nodrošinātu, nepieciešams atcerēties degšanas tehnoloģijas pamatprincipus, bez kuru ievērošanas viss iepriekšminētais nav realizējams.

2.2.2.2. Degšanas tehnoloģijas pamatprasības

Kurināmajam jāiziet visas degšanas stadijas, kuru ilgums ir atkarīgs no kurināmā sastāva un kurtuves konstruktīvajiem parametriem. Cietā un šķidrā kurināmā degšanas process notiek šādā secībā:

- sasilšana;
- mitruma iztvaikošana;
- termiskā sadalīšanās;
- uzliesmošana;
- degšana.

Kurināmā daļiņai nepieciešams pievadīt oksidētāju - skābekli, un tas ir otrs svarīgs jautājums kurtuvju veidošanā. Gaiss jāpievada degošajam kurināmajam noteiktās proporcijās, pie kam tas jānodrošina dažādās kurtuves zonās atkarībā no degšanas stadiju norises vietām. Modernākās degšanas tehnoloģijas tiek veidotas ar vairākkārtīgu gaisa ievadu kurtuvē. Bieži gaiss tiek ievadīts kurtuvē ar specifiskas konstrukcijas uzgaļu palīdzību.

2.2.2.3. Ogļu dedzināšana nekustīgā slānī

Katlu kurtuvēs, kurās kurināmais tiek dedzināts slānī uz nekustīgiem ārdiem, degšanas process ir izteikti periodisks un mainās laika periodā no viena kurināmā padeves brīža līdz nākamajam. Inženieraprēķinos visu periodu aplūko kā četru degšanas stadiju summu:

- no kurināmā padeves brīža līdz gaistošo vielu uzliesmošanai;
- no gaistošo vielu uzliesmošanas brīža līdz to degšanas beigām;

- no gaistošo vielu degšanas beigām līdz koksa daļiņu degšanas sākumam;
- koksa daļiņu degšana.

Katras stadijas garumu var aptuveni noteikt eksperimentālā ceļā. Praktiski svarīgs ir kurināmā padeves starplaiks, kuru pieredzējis kurinātājs parasti nosaka vizuāli.

Iegūto rezultātu analīzei un procesu skaidrošanai būtiski ir atcerēties, ka katrai degšanas stadijai ir raksturīga sava temperatūra, skābekļa (gaisa patēriņa koeficienta vērtība), tvana gāzes, slāpekļa un sēra oksīdu koncentrāciju vērtības un to izmaiņas [2.4. ... 2.6.].

Kurtuvē padotais aukstais kurināmais pārklāj degošo slāni un būtiski mazina tā starojumu. Kurināmā uzkaršana un gaistošo vielu izdalīšanās notiek, pateicoties degošā slāņa siltumam un karsto gāzu plūsmai caur svaigā kurināmā slāni. Salīdzinoši necīgu siltuma daudzumu svaigais kurināmais saņem starošanas ceļā no kurtuves virsmām. Šis degšanas stadijas laikā kurtuvē iegūtais siltuma daudzums samazinās un līdz ar to krītas katla ražība. Kurināmā slānis ir visbiezākais un tam ir vislielākā aerodinamiskā pretestība. Nepieciešamā gaisa daudzums ir mazāks nekā citās degšanas stadijās, tādēļ nepieciešams šajā periodā tā padevi samazināt. Neregulējamā kurtuvē parasti tiek padots nemainīgs gaisa daudzums, un šajā stadijā gaisa kurtuvē ir vairāk, nekā to iespējams patērēt.

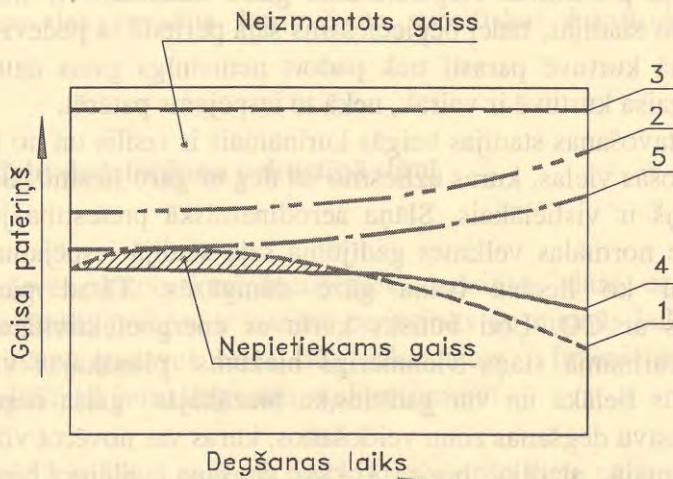
Sagatavošanas stadijas beigās kurināmais ir izsilis un no tā intensīvi izdalās gaistošās vielas, kuras uzliesmo un deg ar garu liesmu. Šajā periodā gaisa patēriņš ir vislielākais. Slāņa aerodinamiskā pretestība joprojām ir liela. Tāpēc normālas velkmes gadījumā šajā stadijā iespējama nepilnīga degšana, par ko liecina tvana gāze dūmgāzēs. Tātad pieaug vides piesārņojums ar CO. Ļoti būtisks kurtuves energoefektivitātes darbības rādītājs ir kurināmā slāņa vienmērīgs biežums: plānākajās vietās gaisa caurplūde būs lielāka un var gadīties, ka biežākajās gaisa nepietiek. Tas skaidro intensīvu degšanas zonu veidošanos, kuras var novērot vizuāli.

Nākamajā stadijā noris koksa degšana. Slāņa biežums (arī aerodinamiskā pretestība) samazinās, tādēļ kurtuvē nokļūst vairāk gaisa,

kaut arī degšanai nepieciešamais gaisa daudzums ir mazāks nekā iepriekšējās stadijās. Tas atkal ir katla enerģētiskās efektivitātes pasliktināšanās iemesls, jo pieaug nelietderīgā gaisa apjoms un siltuma zudumi, kā arī samazinās katla slodze. Tā vienlaicīgi ir arī vides piesārņojuma pieauguma problēma, kas sīkāk skaidrota 4. nodaļā.

Gaisa daudzuma izmaiņas degšanas laikā (periodā starp divām kurināmā padevēm), ja velkme netiek regulēta, kvalitatīvi var ilustrēt ar profesora A.Kirša diagrammu (skat. 2.5. attēlu).

Gaisa patēriņu, kas nepieciešams, lai visu kurināmo sadedzinātu pilnībā, parāda 1. līkne. Gaisa daudzuma izmaiņas kurtuvē, ja velkme netiek regulēta, bet α ir nelieli, attēlo 2. līkne. To pašu procesu ar lielas jaudas dūmsūcēju un ventilatoru (lielas α vērtības) ilustrē 3. līkne. Savukārt 4. līkne rāda kurtuvē izmantojamā gaisa daudzumu. No diagrammas redzams, ka vienmēr būs zona gan ar nepietiekamu gaisa padevi, gan ar gaisa pārpalikumu. To lielumu nosaka procesi kurināmā slānī. Nepilnīgu degšanu var samazināt, veidojot plānāku kurināmā slāni (1. līkne novietosies zemāk). Tas izraisīs neizmantotā gaisa pieaugumu, un palielināsies siltuma zudumi. Palielinot slāņa biezumu (1. līkne novietosies augstāk), var



2.5. att. Profesora A.Kirša diagramma.

samazināt neizmantotā gaisa daudzumu, tomēr palielināsies nepilnīgas degšanas zona un tā rezultātā - ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi. Tādējādi pareizi izvēlēts slāņa biezums ļauj strādāt ar minimālām α vērtībām un maziem ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumiem. Tikai 1. un 4. līknes krustpunktā ir iespējams ķīmiski pilnīgas degšanas režīms un degšanas procesā gaiss tiek pilnvērtīgi izmantots. Gaisa padevi atbilstoši 4. līknei var organizēt, regulējot velkmi. Ja tas netiek darīts, tad gaisa padevi raksturo 2. un 3. līkne. Tātad iespējams sasniegt kurtuves darbību ar minimāliem siltuma zudumiem, ja pareizi izvēlēts kurināmā slāņa biezums un gaisa patēriņa koeficients ir minimāls. Abi šie rādītāji ir atkarīgi no kurināmā padeves biežuma, kas tiek rekomendēts, atkarībā no ogļu markas un kvalitātes, 5 ... 15 minūšu intervālā. Optimālo gaisa padevi, velkmi neregulējot, raksturo 5. līkne. Šajā gadījumā starp 1. un 5. līkni būs mazākais laukums un tātad mazāk varētu būt neizmantota gaisa.

Enerģētiski efektīvākas ir nekustīgo ārdū kurtuves ar regulējamu velkmi, kuru konstrukcijas ļauj novērst visus iepriekšminētos trūkumus.

Lai spriestu par nekustīga ogļu slāņa kurtuves darbību katla ekspluatācijas apstākļos, tika veikti čuguna sekciju katla "Minsk" eksperimentālie pētījumi. Čuguna sekciju katli Latvijā tiek plaši izmantoti nelielas jaudas katlu mājās. Uz nekustīgajiem spraugu ārdūkiem, caur kuriem gaisa padeve organizēta ar ventilatora palīdzību, tika dedzinātas Doņeckas baseina ogles. Neregulējama velkme katlam tika nodrošināta ar dūmsūcēju un 35 m augstu skursteni [2.4.].

* Analizējot iegūtos datus par gāzveida komponentu koncentrācijas izmaiņām, jāatzīmē, ka vērojams krasi izteikts degšanas procesa periodiskums no vienas kurināmā padeves kurtuvē līdz nākamajai. Šī perioda laikā izpaužas agrāk aplūkotās degšanas procesa īpatnības. Gāzes sastāva izmaiņās tas izpaužas kā komponenta koncentrācijas pieaugums līdz maksimumam un tālākā samazināšanās līdz procesa beigām. Mērījumu laikā perioda ilgums bija ~16 min.

Degšanas produktu aprēķini, kā arī mērītās gaisa patēriņa koeficienta vērtības ļauj novērtēt, kā tiek izmantots gaiss kurtuvē. No degšanas produktu aprēķiniem izriet, ka, sadedzinot vienu kg ogļu, veidojas dūmgāzu daudzums, kuru nosaka kā

$$V_g = V_g^{\alpha=1} + (\alpha - 1)V^0, \text{ m}^3/\text{kg}, \quad (2.9.)$$

kur $V_g^{\alpha=1}$ - dūmgāzu daudzums stehiometriskajos apstākļos, m^3/kg ;

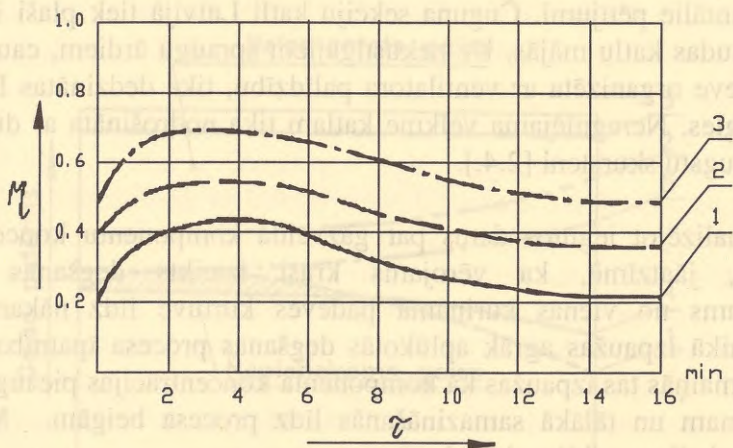
V^0 - gaisa daudzums stehiometriskajos apstākļos, m^3/kg .

Izdalot abas vienādojuma puses ar V_g , iegūstam sakarību

$$V_g^{\alpha=1}/V_g + (\alpha - 1)V^0/V_g = 1,$$

kur $V_g^{\alpha=1}/V_g$ - dūmgāzu tilpuma vienība gāzēs;

$(\alpha - 1)V^0/V_g$ - neizmantotā gaisa tilpuma vienība gāzēs.



2.6. att. Dūmgāzu un neizmantotā gaisa daudzums gāzēs.

Šo lielumu aprēķinu rezultāti kurtuvei ar neregulējamu gaisa padevi un velkmi grafiski parādīti 2.6. attēlā (skat. 1. līkni). Laukums zem 1. līknes attēlo dūmgāzu daudzumu un virs tās neizmantoto gaisu. Degšanas process praktiski nevar notikt stehiometriskos apstākļos, tam ir nepieciešama noteikta gaisa pārpilnība. To novērtē ar gaisa patēriņa koeficientu α , kura vērtībai kurtuvē vajadzētu būt diapazonā: 1,5...1.6. Gaisa un dūmgāzu sadalījumu viena perioda laikā, ja no 2. līdz 4. minūtei tiek ievērots nosacījums, ka $\alpha = 1,5$ (tad degšanai nepieciešams visvairāk gaisa), ilustrē 2. līkne. Šis aptuveni ir stāvoklis, kuru varētu sasniegt, ja kurtuvē ievērotu nepieciešamo gaisa patēriņa koeficientu un novērstu gaisa piesūkumus gāzejās. Ja piesūkumi ir pieļaujamo lielumu robežās, tad sadalījumu attēlo 3. līkne. Tātad šī līkne attēlo darba režīmu, kuru jācenšas realizēt. Salīdzinot stāvokli, kuru attēlo 1. un 3.līkne, iespējams noteikt lieki padotā gaisa daudzumu. Tā padevei pārtērē elektroenerģiju gaisa padeves ventilatora un dūmsūcēja piedziņai. Šī gaisa uzsildīšanai līdz aizvadāmo gāzu temperatūrai (eksperimentu laikā tā bija $\sim 230^{\circ}\text{C}$) patērē siltumu, tātad sadedzina vairāk kurināmā.

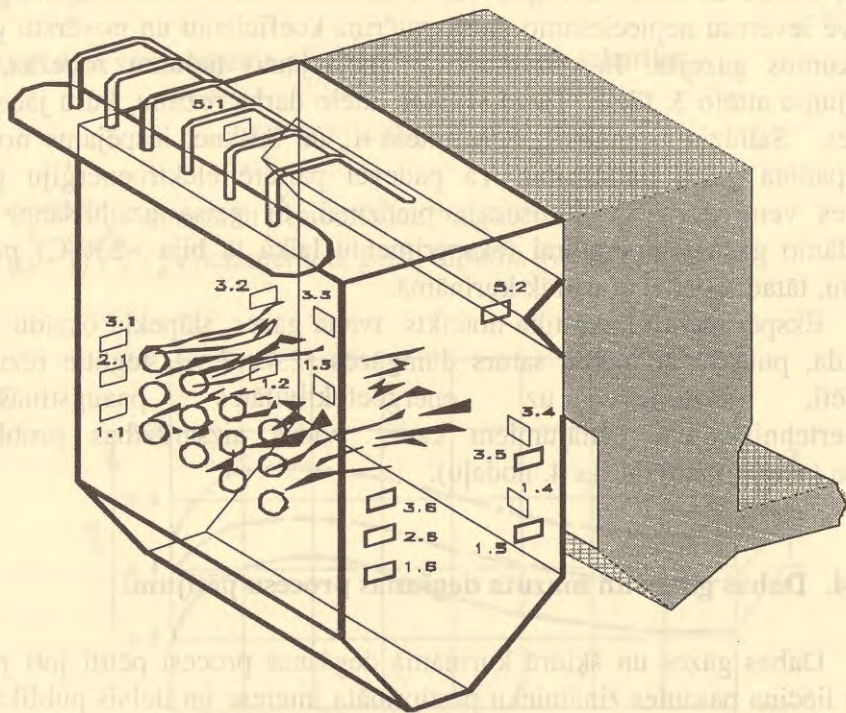
Eksperimentu laikā tika noteikts tvana gāzes, slāpekļa oksīdu, sēra dioksīda, putekļu un pelnu saturs dūmgāzēs [2.4., 2.5.]. Iegūtie rezultāti analizēti, skatoties uz energoefektivitātes paaugstināšanas inženiertehniskajiem jautājumiem caur vides aizsardzības problēmu prizmu (skat. monogrāfijas 4. nodaļu).

2.2.2.4. Dabas gāzes un mazuta degšanas procesu pētījumi

Dabas gāzes un šķidrā kurināmā degšanas procesi pētīti ļoti plaši. Par to liecina pasaules zinātnieku pastiprināta interese un lielais publikāciju skaits šajā jomā. Moderna laboratorijas tehnika ļauj ielūkoties ķīmisko reakciju norises un molekulu fizikas noslēpumos. Diemžēl mūsu valstī veikt degšanas procesu filigrānos laboratorijas pētījumus nav iespējams. Tos nākas aizvietot ar pusrūpnieciskiem un rūpnieciskiem izmēģinājumiem, kuru mērķi var būt dažādi:

- paaugstināt degšanas procesa enerģētisko efektivitāti;
- samazināt nepilnīgas degšanas produktus dūmgāzēs;
- samazināt slāpekļa oksīda izmešus.

Pēdējā problēma plašāk izklāstīta monogrāfijas 4. nodaļā, lai pasvītrotu degšanas procesa tehnoloģijas saistību ar kaitīgo izmešu veidošanās būtību.



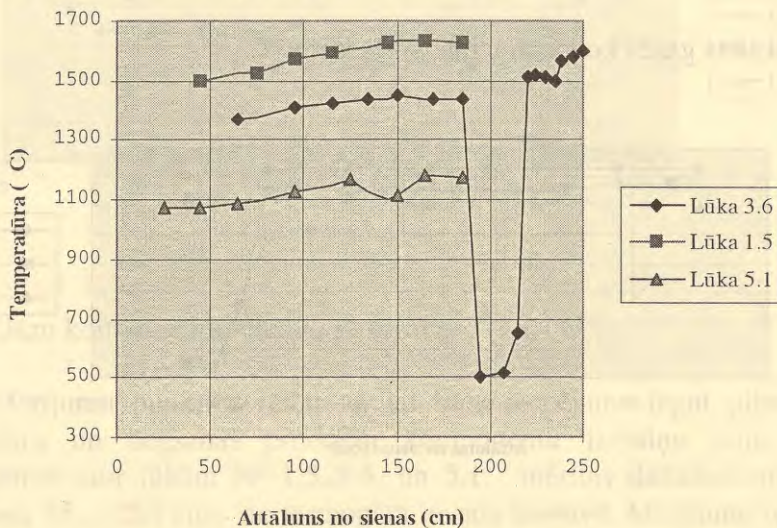
2.7.att. Principiāla mērījumu shēma tvaika katla kurtuvē Setubalas termoelektrostacijā.

Sadarbībā ar Portugāles zinātniekiem 1994. gada vasarā tapa kopīgs pētījuma darbs par mazuta degšanas procesu Setubalas termoelektrostacijas katla kurtuvē [2.7.,2.8.]. Autores un kolēģu inženiertehnisko problēmu pētījumu pieredze tika izmantota portugāļu zinātnieku eksperimentālo rezultātu skaidrošanā. Sākotnējā situācija katlu mājā rosināja analizēt kurtuves darbību, lai rastu atbildes uz degšanas procesa norises jautājumiem un meklētu iemeslus nepatīkamām katlu darbības parādībām:

- dūmgāzēs tika novērots palielināts kvēpu daļiņu daudzums, par ko liecināja elektrofiltros uztverto cieto daļiņu analīze: 90% tajās ir oglekļa;
- kurtuvē uz ekrāna caurulēm un kolektoriem veidojās nosēdumi.

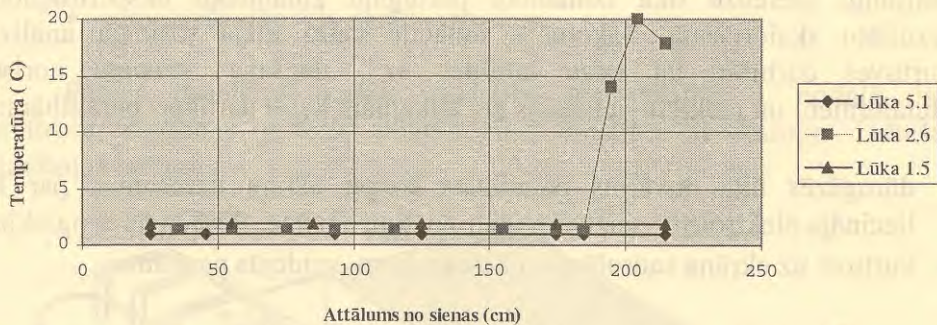
Principiāla mērījumu shēma parādīta 2.7.attēlā.

Kurtuvē, kuras augstums ir 19,9m, platums - 11m un dziļums - 8,5m, uzstādītas 12 sprauslas. Tās izvietotas trīs dažādos līmeņos pa četrām - katrā. Primārais gaiss tiek padots sprauslu tuvumā, bet sekundārais nonāk kurtuvē caur speciāliem logiem (ambrazūrām).

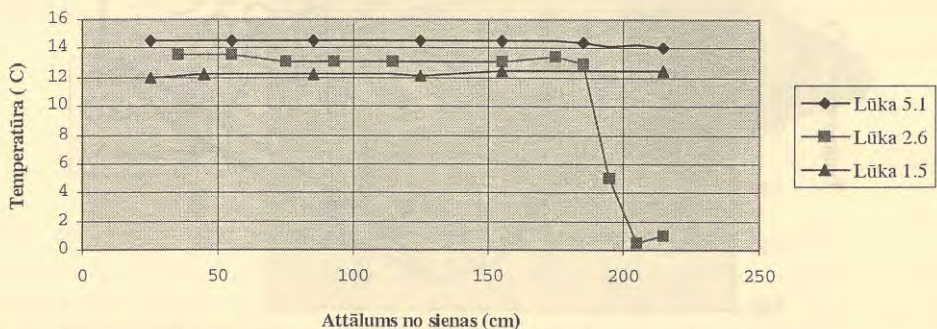


2.8.att. Gāzu temperatūru vērtības kurtuvē.

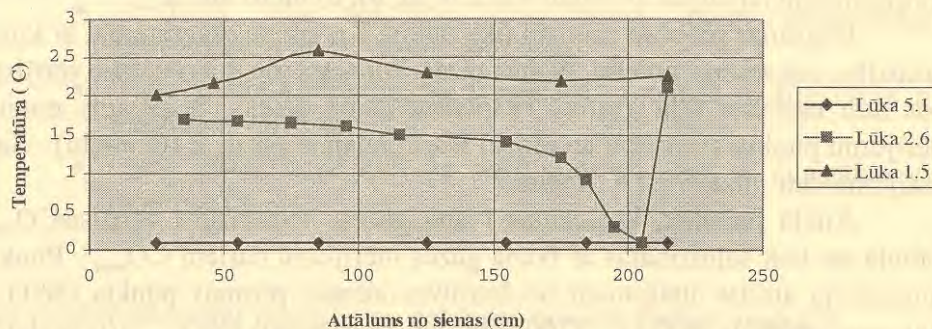
a) Skābekļa koncentrācija gāzēs kurtuvē:



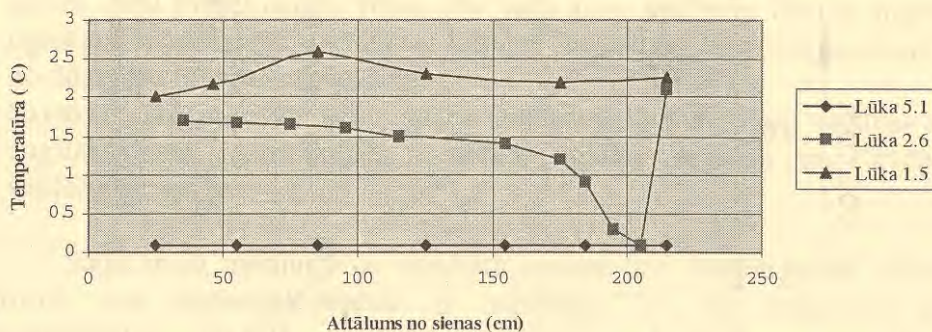
b) ogļskābās gāzes koncentrācija gāzēs kurtuvē:



c) tvana gāzes koncentrācija gāzēs kurtuvē:



d) slāpekļa oksīdu koncentrācija gāzēs kurtuvē:



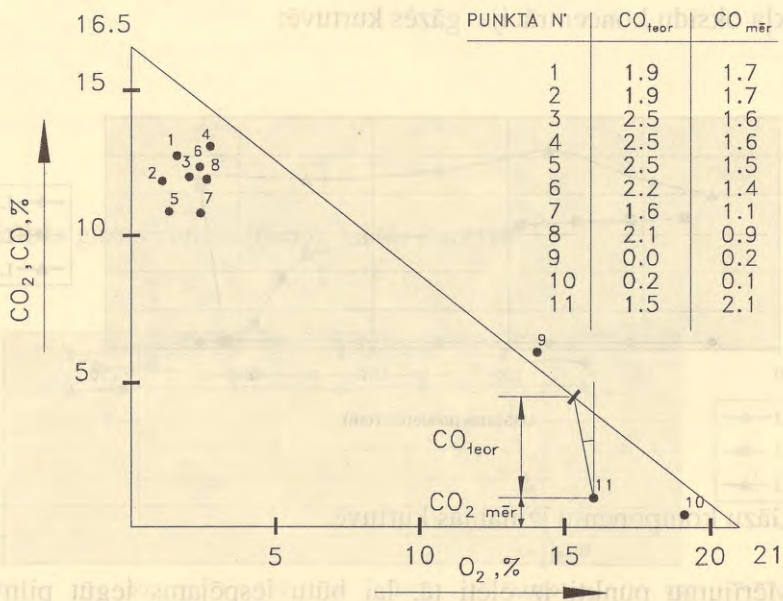
2.9.att. Gāzu komponentu izmaiņas kurtuvē.

Mērījumu punkti izvēlēti tā, lai būtu iespējams iegūt pilnvērtīgu temperatūru un degšanas produktu komponentu izmaiņu ainu. Gāzu temperatūras caur lūkām № 1.5., 3.6. un 5.1. mērītas dažādos attālos (diapazonā 25 ... 250 cm) no termopāra ievada kurtuvē. Mērījumu rezultāti parādīti 2.8. attēlā.

Savukārt, skābekļa, ogļskābās gāzes, tvana gāzes un slāpekļa oksīdu koncentrāciju izmaiņas atspoguļotas 2.9. a), b), c) un d) attēlā.

Degšanas procesu analīzei tika lietota Karjakina diagramma, ar kuras palīdzību iespējams noteikt tvana gāzes koncentrāciju teorētiskās vērtības. Bez tam uzliekot šajā grafikā eksperimentālos datus, iespējams noteikt mērījumu punktu atbilstību teorētiski iespējamajam (skat. 2.10. attēlu). Šajā gadījumā dati lūkas №2.6. līmenī.

Attēlā parādīts, kā iegūtas tvana gāzes teorētiskās vērtības CO_{teor} . Tabulā tās tiek salīdzinātas ar tvana gāzes mērījumu datiem $CO_{mēr}$. Punktu numerācija atbilst attālumam no kurtuves sienas: pirmais punkts (№1) ir 300 mm, pēdējais (№11) - 2200 mm, bet starppunkti (№2 ... 10) izvietoti simetriski un starp tiem ir vienāds attālums.



2.10.att. Teorētiskie un mērījumu dati Karjakina diagrammā:

- - eksperimentālie dati.

Analīzes rezultātus varētu iedalīt trīs grupās:

- vērojama laba sakritība starp tvana gāzes koncentrāciju teorētiskajām un mērījumu vērtībām;
- tvana gāzes koncentrāciju teorētiskās vērtības ir augstākas par mērījumu vērtībām;
- tvana gāzes koncentrāciju mērījumu vērtības ir augstākas par teorētiskajām.

Abi pēdējie gadījumi jāaplūko no degšanas procesa fizikas viedokļa.

1. Punktos, kuros tvana gāzes koncentrāciju teorētiskās vērtības ir augstākas par mērījumu vērtībām, vērojams iztrūkums oglekļa bilancē. Tos sauksim par "kvēpu veidošanās zonām", kurās oglekļa pārpalikums paliek cietu kvēpu daļiņu veidā. Par šādu zonu klātbūtni liecina augstā oglekļa koncentrācija nosēdumos kurtuvē un pelnos, kuri tiek izgulsnēti no dūmgāzu plūsmas elektrofiltros.
2. Savukārt, zonas, kurās tvana gāzes koncentrāciju mērījumu vērtības ir augstākas par teorētiskajām, notiek oglekļa degšana no "kvēpu veidošanās zonas".

Šāda veida mērījumi un rezultātu analīze dod iespēju atrast vietas kurtuvē, kur degšanas process ir nepilnīgs. To var izskaidrot ar aerodinamisko procesu norises neatbilstību kurtuvē, un tālākā inženiertehniskā darbība jāvirza uz plūsmu pētījumiem un trūkumu novēršanu. Protams, ka jāanalizē arī citi varianti, piemēram, sprauslu nomaiņa. Priekšlikumi jāizvērtē gan no inženiertehniskā, gan ekonomiskā, gan ekoloģiskā viedokļa. Plašāki skaidrojumi par degšanas procesu pētījumiem un par izmantoto laboratorijas tehniku Setubalas termoelektrostacijā sniegti autores un līdzautoru publikācijās [2.7.,2.8.].

Iepriekš aplūkotais degšanas procesu pētījums ir autores un kolēģu izstrādātās degšanas procesa enerģētiskās efektivitātes paaugstināšanas

metodikas piemērs. Tā vispārīgā gadījumā ietver vairākpakāpju aktivitātes, kas līdzīgas energovadības shēmai (skat. 1. nodaļu):

- uzdevuma nostādne (iepazīšanās ar problēmu, datiem par kurināmo un konstruktīvajiem parametriem, darbības režīmiem);
- teorētiskās koncepcijas izstrādāšana;
- mērījumu shēmas izstrāde un eksperimenta plānošana;
- eksperimenta veikšana - degšanas procesa enerģētiskās efektivitātes noteikšana;
- datu un rezultātu analīze ar Karjakina diagrammas vai cita veida degšanas nomogrammu palīdzību;
- degšanas procesa enerģētiskās efektivitātes uzlabošanas projekta priekšlikumu izstrādāšana;
- lēmuma pieņemšana;
- projekta ieviešana.

Dažreiz iespējams atteikties no kādas šīs stadijas. Tomēr tas jā dara ļoti uzmanīgi, lai neizraisītu kļūdainus secinājumus. Nedrīkst aizmirst, ka degšanas enerģētiskās efektivitātes noteikšana un tās paaugstināšana visos gadījumos ir laikietilpīgs un darbietilpīgs process un prasa nopietnu attieksmi pret tās problēmām un to risinājumiem.

2.2.2.5. Kurināmā maiņas enerģētiskais pamatojums

Gadījumos, kad jāpieņem lēmums par kurināmā izmantošanu kādā konkrētā situācijā, nepieciešams tehniskajām pamatzināšanām pievienot ekonomiskos un ekoloģiskos momentus, kas saistīti ne tikai ar kapitālieguldījumiem, bet arī ar enerģijas cenām un nodokļu politiku pašlaik un nākotnē. Svarīgi ir arī sociālie jautājumi, kas saistīti ar vietējā darbaspēka izmantošanu.

2.2.2.5.1. Enerģētiskās koksnes izmantošana

Katlu māju, kurās izlieto organisko kurināmo, pārveide biokurināmā izmantošanai ļauj ievērojami uzlabot vidi un klimatiskos apstākļus kā vietējā, tā arī reģionālajā līmenī.

Organiskā kurināmā dedzināšana ir viens no galvenajiem siltumnīcas efekta izraisītāja - oglekļa dioksīda avotiem. Biokurināmā -

- salmu,
- niedru,
- koksnes,
- makulatūras,
- celulozes un papīra ražošanas atkritumu

dedzināšana norit oglekļa dabiskā aprites cikla ietvaros.

Enerģētisko koksni dažreiz sauc arī par saules enerģijas krātuvi. Koki un citi augi ir efektīvas "kurināmā krātuves", kas oglekļa dioksīda (CO₂) un ūdens fotosintēzes rezultātā, izmantojot saules enerģiju, rada bioenerģētiskos savienojumus. Šai enerģijai sadegot, rodas jauni oglekļa dioksīda un ūdens krājumi. Dabiskajā oglekļa veidošanās procesā CO₂ koncentrējas ap jaunajiem kokiem vai augiem.

Lai realizētu biokurināmā plašu izmantošanu, nepieciešams izpildīt vismaz divus priekšnosacījumus:

- mežu resursiem valstī jābūt pietiekamā daudzumā, lai organizētu biokurināmā - enerģētiskās koksnes dedzināšanas tehnoloģiju ieviešanu;
- biomasas degšanas tehnoloģijai jābūt pārbaudītai, enerģētiski efektīvai un ekonomiski pamatotai.

Termins "enerģētiskā koksne" ietver sevī visus bioenerģijas kurināmā veidus, kas iegūti no meža: kokapstrādes pārpalikumi, koku

mizas, skuju un lapas, - citiem vārdiem sakot, viss kurināmais, kas iegūts no kokiem. Tas ir ekoloģiski tīrs energoresurss.

Enerģētiskā koksne ir iegūstama arī no nekvalitatīvām izejvielām, piemēram, no celtniecībā izmantotiem materiāliem. Bioresursus, kas iegūti no bojātu koku daļām, nevar uzskatīt par galveno enerģijas avotu, tomēr bioloģiskajā kurināmajā šāda veida izejvielām ir ierādīta noteikta vieta.

No degšanas tehnoloģijas izvēles viedokļa enerģētiskā koksne jāaplūko pēc trīs svarīgu kurināmā sastāvdaļu satura:

- kurināmā elementu sastāvs:
 - ogleklis (50 ... 52%),
 - ūdeņradis (6 ... 6,5%),
 - skābeklis (40 ... 41%),
 - slāpeklis (apmēram 0,2%),
 - sērs (apmēram 0,1%);
- pelni (kalcijs, magnijs un kālijs), to saturs parasti ir apmēram 0,5%;
- mitrums, kura saturs svārstās starp 20 un 65% un kas būtiski ietekmē enerģētiskās koksnes sadegšanas siltuma vērtību.

Atkarībā no izcelsmes veida enerģētisko koksni iedala divās kategorijās:

- mežā iegūta;
- kokapstrādes tehnoloģijas pārpalikums.

Enerģētiskās koksnes degšanas procesa enerģētiskā efektivitāte ir atkarīga no kurināmā kvalitātes, arī daļiņu izmēriem. Izvēloties kurtuvi, precīzi jāprognozē ne tikai enerģētiskās koksnes ieguves avots, bet arī kurināmā veids:

1. *Meža atkritumi* ir miza, skujuas, lapas, koks. Tie tiek sasmalcināti dažāda izmēra daļiņās. Mizas dažreiz neieskaita koksnes atkritumu kurināmā kategorijā. Mizas ir grūti sasmalcināt ar parastajām metodēm un tās varētu uzskatīt par plēstu kurināmo.
2. *Šķelda* tiek iegūta no malkas un kokapstrādes pārpalikumiem. Šķeldas daļiņām ir nosacīti gluda virsma un izmērs - diapazonā 5 ... 50 mm.
3. *Skaidas* dažreiz sauc par bioloģisko masu. Tas ir tādēļ, ka zāģu skaidu daļiņu izmēri ir niecīgi - diapazonā 1... 5 mm.
4. *Briketes* tiek ražotas, presējot sikdispersu kokmateriālu. To saspiež taisnstūra vai cilindriskas formas briketēs, kuru garums vai diametrs ir lielāks par 25 mm.
5. *Granulas* tiek veidotas līdzīgi briketēm, presējot sasmalcināto materiālu. Izmantojot presi, visbiežāk tiek ražotas cilindriskas formas granulas, kuru diametrs ir mazāks par 25 mm. Granulu ražošana ir energoietilpīgs process, jo to žāvēšanai nepieciešama papildu enerģija.
6. *Pulverveida* kurināmo iegūst slīpēšanas procesā. Daļiņu izmēri nepārsniedz 1 mm.

Otreizējā enerģētiskā koksne (kokapstrādes atlikumi no fasēšanas, koka tara, koks no demontētām celtniecības konstrukcijām) netiek plaši izmantota.

Koksnes izmantošanas iespējas Latvijas enerģētikā tiek pētītas jau ilgāku laika periodu. Enerģētikas attīstības programmā [2.11.] norādīts, ka gada laikā Latvijā nelielas jaudas katlos un dzīvojamo māju apsildei tiek sadedzināts 2,5 ... 3,0 miljoni m³ koksnes. Citā dokumentā [2.12.], kas izstrādāts ERAB uzdevumā, konstatēts, ka ikgadējais enerģētiskās koksnes patēriņš nākotnē Latvijā varētu sasniegt 6 miljonus m³.

Latvijā realizēti dažādi enerģētiskās koksnes izmantošanas projekti. Tie parāda virzienus un tendences, kādas vērojamas mūsu valsts enerģētikā. Vietējie katlu ražotāji cenšas konkurēt ar ārzemju firmām. Šobrīd Latvijā var atrast ļoti atšķirīgus praktiskos risinājumus. Tie atšķiras ne tikai ar inženiertehnisko problēmu realizāciju, bet arī ar ekonomiskajiem rādītājiem (ar kapitālieguldījumu lielumu un ar ekspluatācijas izdevumiem) un ietekmi uz apkārtējo vidi.

Būtisks ieguldījums kurināmā koksnē energoefektīvu tehnoloģiju ieviešanā Latvijā ir saistīts ar zviedru speciālistu darbību šajā jomā. Izmantojot Zviedrijas valdības kredīt līdzekļus, Latvijā uzstādīta priekškurtuve Balvos, kā arī pabeigtas katlu mājas rekonstrukcijas Alūksnē, Cēsu rajonā Jāņmuižā, Tukuma rajonā Slampē un Ventspils rajonā Ugālē. Vislielākās priekškurtuves koksnē dedzināšanai šobrīd Latvijā būs Dubultu un Daugavgrīvas katlu mājas.

Līdzīgi projekti realizēti Igaunijā un Lietuvā. Šajā nodaļā analizēti enerģētiskās koksnē degšanas procesu eksperimentālo pētījumu rezultāti, atklāti plusi un mīnusi šādu inženiertehnoloģisku risinājumu lietojumam.

2.2.2.5.2. Katlu darbības enerģētiskās efektivitātes eksperimentālā izpēte

Šķeldas dedzināšanas enerģētiskā efektivitāte dažādas konstrukcijas kurtuvēm tika noteikta ar mērījumu palīdzību. Sadarbībā ar zviedru konsultatīvo firmu "AF ENERGIKONSULT" tika izstrādāta mērījumu shēma. Mērījumi tika veikti, izmantojot pārvietojamo laboratoriju, izvērtējot katla un priekškurtuves darbību: analizējot kurināmo, pelnus un degšanas produktus, kā arī nosakot siltumnesēju un dūmgāzu parametrus.

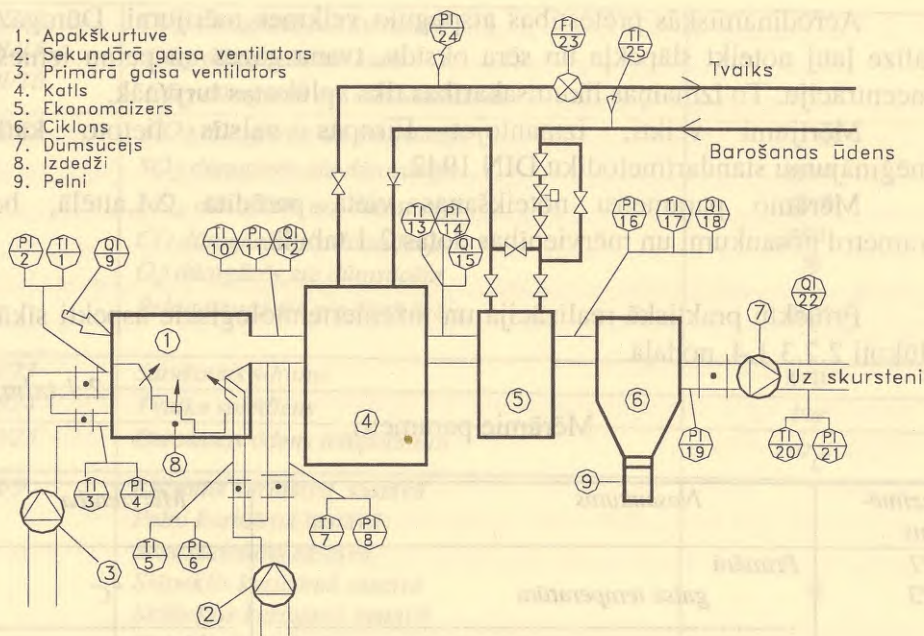
Eksperimentālie pētījumi realizēti katlu mājas:

- Latvijā - Balvos, Alūksnē, Cēsis, Slampē;
- Lietuvā - Biržos;
- Igaunijā - Valgā, Viru, Tamultā.

Paveikto katlu rekonstrukcijas projektu rezultātu salīdzināšana dod iespēju izvērtēt dažāda tipa katlu un kurtuvju (ar atšķirīgu sākotnējo kurināmo) pārveidošanu koksnē šķeldas dedzināšanai.

Katlu mājas iekārtas shēma, mērāmie parametri, kā arī vieta, kur šie parametri noteikti, parādīta 2.11. attēlā.

1. Apakškurtuve
2. Sekundārā gaisa ventilators
3. Primārā gaisa ventilators
4. Katls
5. Ekonoaizers
6. Ciklons
7. Dūmsūcējs
8. Izdedži
9. Pelni



2.11. att. Katlu izmēģinājumu mērījumu shēma.

Visus mērāmos lielumus varētu nosacīti sadalīt vairākās grupās.

Pirmās grupas parametri raksturo tvaika ģeneratora darba režīmu. Pie tiem pieder katla jauda, tvaika spiediens, barošanas ūdens temperatūra, kā arī dūmgāzu temperatūras aiz kurtuves, katla, ekonoaizera.

Otrās grupas parametri raksturo apakškurtuves darbību - degšanas procesu tajā. Šie parametri ir gan kurināmā sastāvā esošo elementu analīze un sadegšanas siltums, gan tā degšanai nepieciešamā gaisa temperatūra un spiediens.

Pēdējā parametru grupa raksturo dūmgāzes un tajās notiekošās izmaiņas degšanas produktu plūsmas ceļā aiz katras iekārtas. Degšanas procesa efektivitāti raksturo gan ogļskābās gāzes saturs degšanas produktos dažādos katlu iekārtas punktos, gan skābekļa koncentrācija aiz dūmsūcēja.

Aerodinamiskās pretestības atspoguļo velkmes mērījumi. Dūmgāzu analīze ļauj noteikt slāpekļa un sēra oksīdu, tvana gāzes un pelnu izmešu koncentrāciju. To izmaiņas likumsakarības tiks aplūkotas turpmāk.

Mērījumi veikti, izmantojot Eiropas valstīs lietoto katlu izmēģinājumu standartmetodiku DIN 1942.

Mērāmo parametru noteikšanas vieta parādīta 2.1.attēlā, bet parametru nosaukumi un mērvienības dotas 2.1.tabulā.

Projektu praktiskā realizācija un inženiertehnoloģiskie aspekti sīkāk aplūkoti 2.2.3.1.4. nodaļā.

2.1.tabula

Mērāmie parametri.

Apzīmējums	Nosaukums	Mērvienība
TI/1 TI/3	Primārā gaisa temperatūra	°C
TI/5 TI/7	Sekundārā gaisa temperatūra	°C
PI/2 PI/4	Primārā gaisa spiediens	mm ūdens staba
PI/6 PI/8	Sekundārā gaisa spiediens	mm ūdens staba
TI/10 TI/13 TI/17 TI/20	Dūmgāzu temperatūra aiz kurtuves Dūmgāzu temperatūra aiz katla Dūmgāzu temperatūra aiz ekonomāizera Dūmgāzu temperatūra aiz dūmsūcēja	°C
PI/11 PI/14 PI/18 PI/19 PI/21	Dūmgāzu spiediens aiz kurtuves Dūmgāzu spiediens aiz katla Dūmgāzu spiediens aiz ekonomāizera Dūmgāzu spiediens aiz ciklona Dūmgāzu spiediens aiz dūmsūcēja	mm ūdens staba

QI/12	CO ₂ dūmgāzēs aiz kurtuves	
QI/15	CO ₂ dūmgāzēs aiz katla	%
QI/16	CO ₂ dūmgāzēs aiz ekonomaižera	
QI/22	CO ₂ dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	%
	SO ₂ dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	ppm
	NO _x dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	ppm
	CO dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	ppm
	O ₂ dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	%
	Pelni dūmgāzēs aiz dūmsūcēja	mg/m ³
PI/23	Saražotais siltums	MW
PI/24	Tvaika spiediens	bar
TI/25	Barošanas ūdens temperatūra	°C
QI/9	Mitrums kurināmā sastāvā	
	Pelni kurināmā sastāvā	
	Sērs kurināmā sastāvā	
	Slāpeklis kurināmā sastāvā	%
	Skābeklis kurināmā sastāvā	
	Ogleklis kurināmā sastāvā	
	Ūdeņradis kurināmā sastāvā	
	-----	-----
	Zemākais sadegšanas siltums	MJ/kg

2.2.2.5.3. Eksperimentālo pētījumu rezultāti

Realizēto kurināmā nomainas projektu enerģētiskās efektivitātes vērtējumu visprecīzāk atspoguļo katlu lietderības koeficientu lielumu izmaiņas pirms un pēc rekonstrukcijas. Pirmie NUTEK organizētie pārbūves projekti trijās Baltijas valstu katlu mājās-

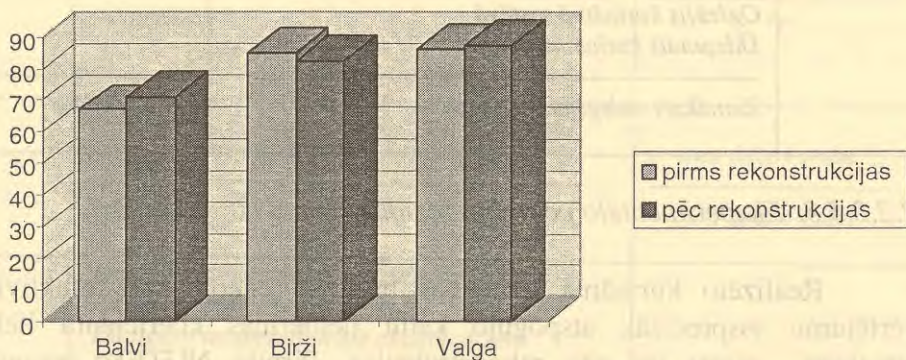
- Balvu katlu mājā - uzstādīta apakškurtuve ar kustīgiem slīpiem ārdiem tvaika katlam DKVR 4/13, iepriekšējais kurināmais: akmeņogles;

- Valgas katlu mājā (Igaunijā) - uzstādīta priekškurtuve ar koniskiem ārdiem tvaika katlam DKVR 10/13, iepriekšējais kurināmais: mazuts;
- Biržu siltumtīklu uzņēmumā (Lietuvā) - uzstādīta kurtuve ar slīpiem kustīgiem ārdiem blakus tvaika katlam DE 14/16, iepriekšējais kurināmais: mazuts -

parādīja energoefektivitātes rādītāju izmaiņu tendences. Tās atspoguļotas 2.12. attēlā.

Rezultāti rāda, ka:

- nomainot ogļu degšanas kameru ar šķeldas kurtuvi, katla lietderības koeficients pieaug;
- savukārt, šķidrā kurināmā nomainīšana ar enerģētisko koksni var gan palielināt, gan samazināt katla energoefektivitāti;
- katlu lietderības koeficientu absolūtās vērtības ir diapazonā: 71 ... 87%.



2.12. att. Katlu lietderības koeficienti pirms un pēc rekonstrukcijas.

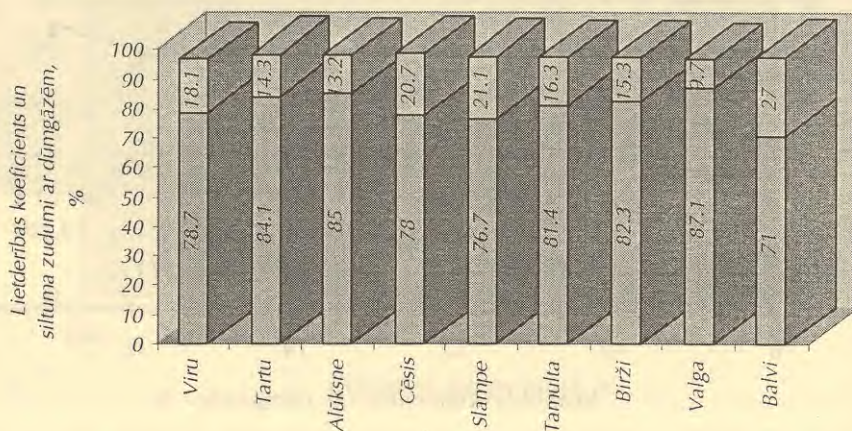
Lietderības koeficients rekonstruētajiem katliem siltuma avotos Valgā un Biržos ir 10...15% augstāks nekā Balvu katlu mājā. Tam par iemeslu nav nekvalitatīva kurtuve koksnes dedzināšanai, bet tas skaidrojams

ar neblīvumiem apmūrējumā un lielajiem gaisa piesūkumiem DKVR 4/13 katlā, ekonomaizerā un gāzejās. Tas tiks aplūkots tālāk.

Vairāk informācijas var iegūt, aplūkojot ne tikai realizēto projektu katlu lietderības koeficientu vērtības, bet arī attiecīgo katlu lielāko siltuma zudumu komponentu: ar dūmgāzēm aizvadīto siltumu. Šie energoefektivitātes rādītāji visiem līdz šim NUTEK programmas ietvaros realizētajiem projektiem atspoguļoti 2.13. attēlā.

Siltuma zudumi, kas tiek aizvadīti ar dūmgāzēm, rekonstrukciju projektos ir lielākais energozudumu komponents. Ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi ir nelieli - 0 ... 1%, mehāniski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi nevienā gadījumā nepārsniedz 0,5%, nelieli ir arī zudumi apkārtējā vidē. Vispārējā gadījumā parametri -

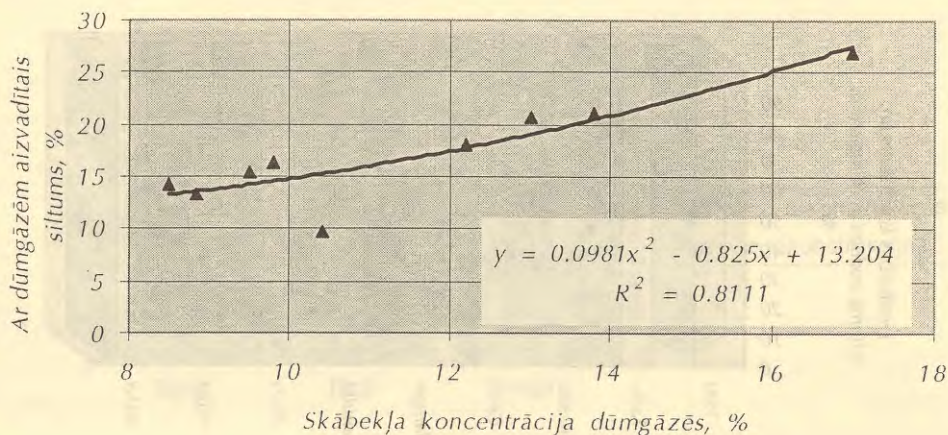
- skābekļa koncentrācija dūmgāzēs,
- dūmgāzu temperatūra,
- koksnes mitruma saturs - ,



2.13. att. Katlu lietderības koeficienti un ar dūmgāzēm aizvadītais siltums NUTEK realizētajos pārbūves projektos.

kuri ietekmē ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu lielumu, jau aplūkoti 2.2.1.1. nodaļā. Šeit tiks izvērtēts katra mainīgā īpatsvars un nozīmīgums q_2 vērtības noteikšanā.

Teorētiski degšanas procesu optimizācija tiek realizēta, meklējot optimālo skābekļa koncentrācijas vērtību dūmgāzēs, lai minimizētu summāros siltuma zudumus ar aizplūstošām dūmgāzēm un no ķīmiski nepilnīgas degšanas. Pieaugot skābekļa koncentrācijai dūmgāzēs, samazinās siltuma zudumi no ķīmiski nepilnīgas degšanas, bet pieaug siltuma zudumi ar aizplūstošām dūmgāzēm, pie kam pēdējie pieaug daudz straujāk. Savukārt, nav iespējams organizēt mehānisku sajaukšanos ar gaisu, lai tā daudzums būtu vienāds ar stehiometrisko. Sakarā ar to, ka q_3 ir niecīgi, jāaplūko tikai sakarība starp skābekļa koncentrāciju dūmgāzēs un ar dūmgāzēm aizvadīto siltumu. Punkti, kas atspoguļo eksperimentu datus, liecina par skābekļa koncentrācijas būtisko ietekmi uz q_2 lielumu (skat. 2.14. attēlu).

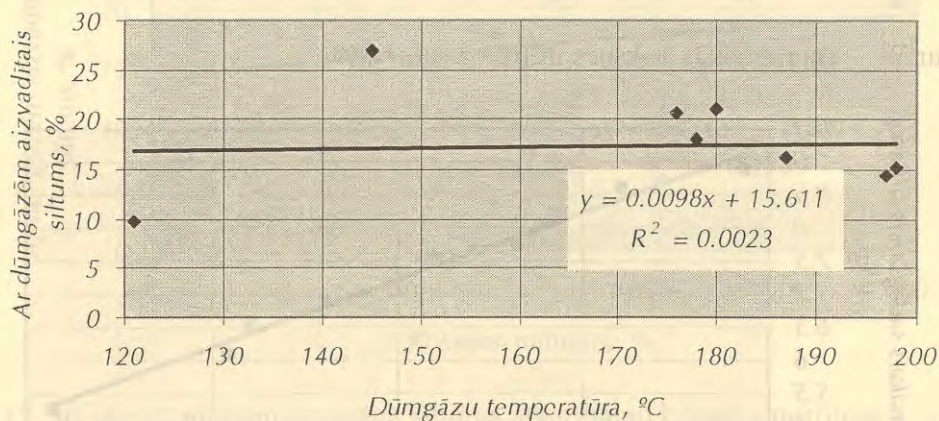


2.14. att. Ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu atkarība no skābekļa koncentrācijas dūmgāzēs.

Kā redzams 2.14. attēlā, dati labi korelē ar regresijas vienādojumu. Analizējot dūmgāzu saturu, pirmajā tuvinājumā iespējams izmantot šo formulu dūmgāzu siltuma zudumu noteikšanai.

Otrs parametrs, kas ietekmē ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu lielumu, ir dūmgāzu temperatūra. Tās vērtība ir atkarīga gan no siltumapmaiņas procesu norises kurtuvē un katlā, gan gaisa daudzuma dūmgāzēs. Pieaugot dūmgāzu temperatūrai, jāpalielinās q_2 . Tas ir gadījumā, ja skābekļa koncentrācija dūmgāzēs ir nemainīga.

Piemēram, katla DE 16/14 rekonstrukcijas gadījumā Biržu katlu mājā novērota palielināta siltuma zudumu vērtība pie mazas skābekļa koncentrācijas (9,5%). Tas skaidrojams ar paaugstinātu temperatūras līmeni (197°C). Viens no iemesliem ar aizplūstošām dūmgāzēm aizvadītā siltuma zudumu pieaugumam būtu meklējams konvektīvo sildvirsmu piesārņošanā ar lidojošām pelnu daļiņām, kuras cenšas izgulsnēties no dūmgāzu plūsmas un pārklāt virsmas.



2.15. att. Ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu atkarība no dūmgāzu temperatūras.

Lai iegūtu pilnīgāku informāciju par dūmgāzu temperatūras ietekmi uz katlu energoefektivitātes rādītājiem, apkopotī katlu māju rekonstrukciju

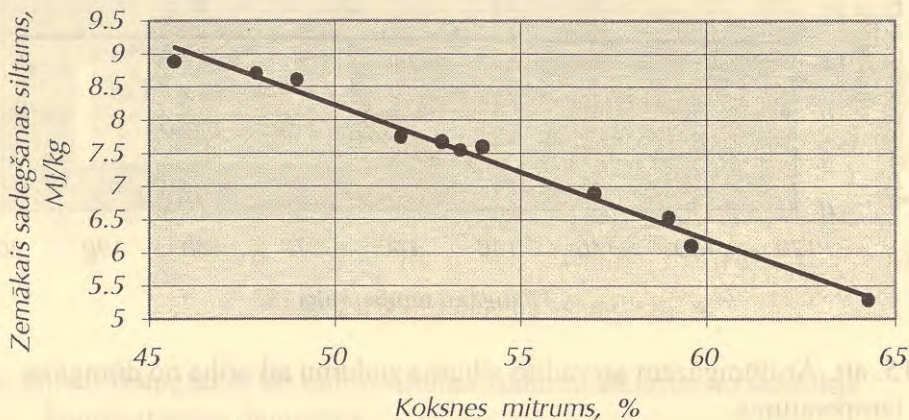
dati un veikta to regresijas analīze. Kā liecina taisne 2.15. attēlā, nav iespējams atrast regresijas vienādojumu, kas pilnvērtīgi aprakstītu iepriekšminētā parametra ietekmi.

Katla darbības efektivitāte ir atkarīga arī no kurināmā mitruma satura. Zaļa koka šķeldai parasti mitruma saturs ir 45 ... 65%. To apstiprināja arī eksperimentālie analīžu dati katlu mājās. Izmantojot kalorimetrisko bumbu, noteikti sadegšanas siltumi katrā konkrētā gadījumā, kas ļauj atrast sakarību starp koksnes zemāko sadegšanas siltumu un mitruma saturu. Sakarības grafiskais attēls dots 2.16. attēlā.

Katlu māju rekonstrukciju laikā tika analizēti enerģētiskās koksnes paraugi, noteikts to elementu sastāvs, mitrums, sadegšanas siltums. Koku sugas neatšķiras Baltijas valstīs, tāpēc apkopoti analīžu dati. Veikta to regresijas analīze un atrasta likumsakarība, ar kuras palīdzību var aprēķināt zemāko sadegšanas siltumu:

$$Q_z^d = 18,317 - 0,2018 W^d, \quad \text{MJ/kg}, \quad (2.10.)$$

kur W^d - enerģētiskās koksnes mitruma saturs, %.

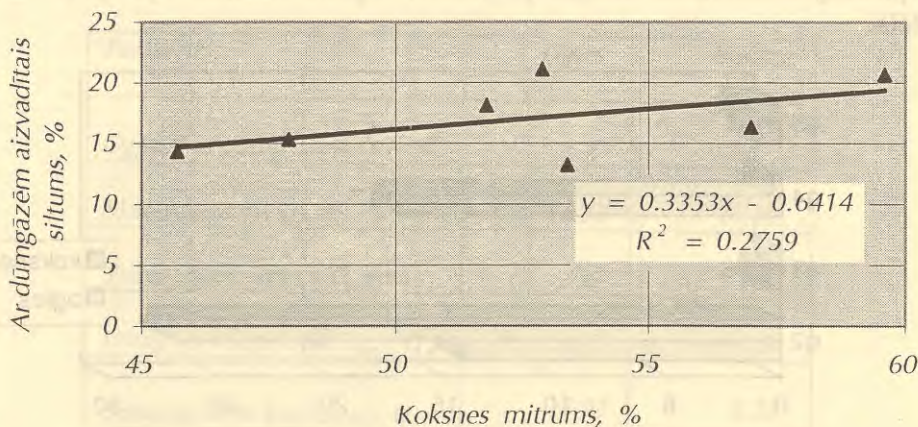


2.16. att. Koksnes sadegšanas siltuma izmaiņas atkarībā no mitruma satura.

Kā redzams no grafika 2.16. attēlā, taisne labi korelē ar eksperimentu datiem ($R^2 = 0,9855$).

Jo augstāks koksnes mitruma saturs, jo vairāk kurināmā jāpadod kurtuvē, lai saražotu noteiktu siltuma daudzumu. Pārveidojot katlus no šķidrā kurināmā uz biomasas dedzināšanu, ir jāņem vērā, ka to siltuma ražība samazināsies, pieaugs dūmgāzu caurplūde, jo katra katla konstruktīvie parametri noteikti optimālajiem dūmgāzu ātrumiem. Plūsmas ātruma pieaugums var izraisīt ne tikai virsmu mehānisku izdilumu, bet arī siltuma zudumu palielinājumu.

Tātad trešais parametrs, kurš ietekmē ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu lielumu, ir enerģētiskās koksnes mitruma saturs. Turpinot rekonstrukciju rezultātu izvērtējumu, grafikā 2.17. attēlā atlikti punkti, kuri atspoguļo koksnes mitruma satura ietekmi uz q_2 lielumu.



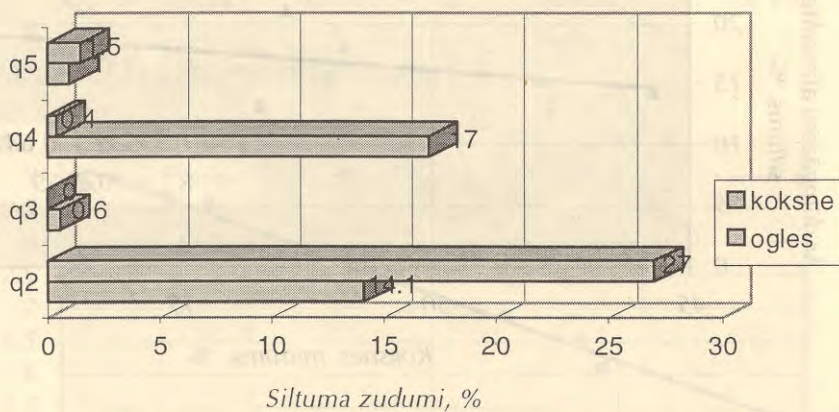
2.17. att. Ar dūmgāzēm aizvadītā siltuma atkarība no koksnes mitruma.

Kā redzams 2.17. attēlā, palielinoties mitruma saturam, pieaug ar dūmgāzēm aizvadīto siltuma zudumu lielums. Tomēr nav iespējams atrast regresijas vienādojumu, kas pilnvērtīgi aprakstītu iepriekšminētos lielumus. Datu izkliede ir liela un korelācijas koeficienta vērtība zema ($R^2 = 0,2759$). Iegūto regresijas vienādojumu nevar izmantot.

Ar dūmgāzēm aizvadītā siltuma atkarība no augstākminētajiem trīs faktoriem matemātiski analizēta 1.5. piemērā, kurā iegūts precīzāks aprēķina vienādojums. Šajā nodaļā veiktā datu analīze parādīja, ka zudumi ir atkarīgi no trīs lielumiem, tādēļ vienkāršota pieeja nedod iespēju kvantitatīvi atainot procesu fiziku.

NUTEK programmas ietvaros Baltijas valstīs realizētajos projektos zemākā katla lietderības koeficienta vērtība tika novērota Balvu katlu mājā. Tādēļ rūpīgāk tiks izvērtēti slikto energoefektivitātes rādītāju iemesli tajā.

Lai būtu iespējams analizēt katlu darbības rādītāju izmaiņas, tiek salīdzināta katlu darbība ar abiem kurināmajiem: iepriekšējo un jauno. Balvu piemērs lieliski demonstrē siltuma zudumu komponentu vērtības neiergulētos katlos un ļauj parādīt energoefektivitātes uzlabošanas iespējas. Mācoties no citu kļūdām un neveiksmēm, iespējams no tām izvairīties turpmākajos kurināmā maiņas projektos. Iegūtie rezultāti apkopoti 2.18. attēlā.



2.18. att. Siltuma zudumu komponenti Balvu katlu mājā.

Katla lietderības koeficients ir zems abos gadījumos, kaut arī koksnes šķeldas izmantošanas gadījumā tas ir augstāks (palielinājies par 4%).

Degšanas procesa analīzes dati papildināti ar aprēķiniem un apkopoti 2.2.tabulā.

Izmantojot eksperimentālos datus, aprēķinātie gaisa un dūmgāzu tilpumi, kuri parādīti 2.2.tabulā, ļauj analizēt katla darbības efektivitāti. Abos gadījumos katliem ar dūmgāzēm aizvadītais siltums pārsniedz normatīvus - tie ir 3 reizes lielāki nekā ieregulētā katlā. Salīdzinājuma dēļ par atskaites punktu ņemti degšanas apstākļi Valgas katlu mājā. Tas parādīts 2.19. attēlā, vērtējot gaisa patēriņa koeficienta vērtības dūmgāzu plūsmas ceļā caur katlu, ekonomaizeru, cikloniem un dūmsūcēju rekonstruētajam DKVR 4/13 katlam Balvos un DKVR 10/13 katlam Valgā.

2.2.tabula

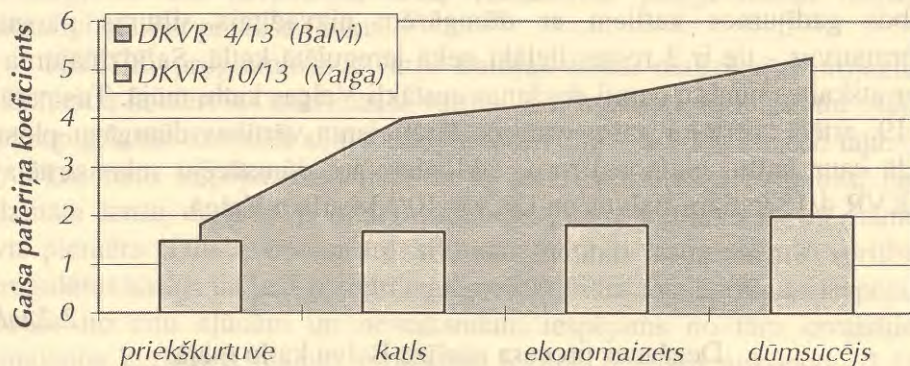
Degšanas procesa analīze Balvu katlu mājā.

<i>Parametrs</i>	<i>Ogles</i>	<i>Koksne</i>
<i>Ogļskābās gāzes saturs CO₂, %</i>	<i>3,7</i>	<i>3,8</i>
<i>Skābekļa saturs O₂, %</i>	<i>16,37</i>	<i>17,00</i>
<i>Tvana gāzes saturs CO, ppm</i>	<i>330</i>	<i>10</i>
<i>Dūmgāzu temperatūra t_{dg}, °C</i>	<i>117</i>	<i>145</i>
<i>Gaisa patēriņa koeficients, α</i>	<i>4,92</i>	<i>5,25</i>

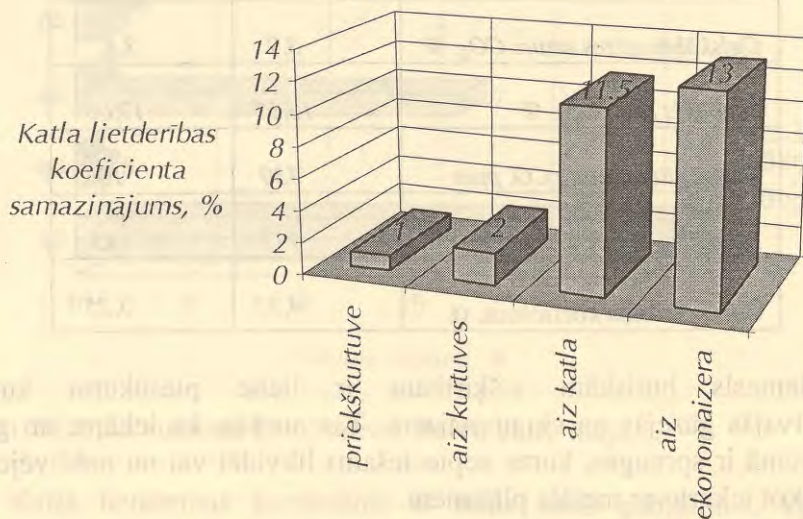
Iemesls būtiskām atšķirībām ir lieli piesūkumi kurtuvē, konvektīvajās gāzejās un ekonomaizerā. Tas norāda, ka iekārtu un gāzeju apmūrējumā ir spraugas, kuras nepieciešams likvidēt vai nu noblīvējot, vai arī apliekot iekārtu ar metāla plāksnēm.

Šāda problēma ir aktuāla gandrīz visās katlu mājās, kurās katli darbojas daudzus gadus bez regulārām kontrolēm. Katlu iekārtas siltumtehnikas aprēķini liecina, ka gaisa patēriņa koeficienta pieaugums par

$\Delta\alpha = 0,1$ palielina ar aizplūstošajām dūmgāzēm aizvadīto siltumu q_2 par 0,3 ... 0,7%. Tātad šī iemesla (nevis priekškurtuves uzstādīšanas) dēļ rekonstruētajam katlam lietderības koeficients ir par 16,5 % zemāks.



2.19. att. Gaisa patēriņa koeficienta izmaiņas katla iekārtas gāzejās.



2.20. att. Lietderības koeficienta samazināšanās gaisa piesūkumu dēļ.

Katla darbības efektivitātes samazināšanās tikai gaisa piesūkumu dēļ parādīta 2.20. attēlā. Šinī gadījumā par atskaites punktu ņemti normatīvie gaisa patēriņa koeficienta lielumi, kuri sakrīt ar α vērtību DKVR 10/13 katlam Valgā.

Kā redzams no datiem 2.3.tabulā, patiesais dūmgāzu tilpums ir 2,5 ... 3 reizes lielāks nekā normatīvais, un tas nozīmē, ka dūmsūcējs nelietderīgi patērē enerģiju lieko dūmgāzu aizvadišanai skurstenī.

2.3.tabula

Gaisa un dūmgāzu tilpumi.

Gāzu tilpumi	Ogles	Koksne
1. Teorētiski nepieciešamais gaisa tilpums V^o , m^3/kg	5,8	3,1
2. Sauso trīsatomu gāzu tilpums dūmgāzēs $V_{RO_2}^o$, m^3/kg	1,1	0,5
3. Teorētiskais slāpekļa tilpums dūmgāzēs $V_{N_2}^o$, m^3/kg	4,6	2,5
4. Teorētiskais ūdens tvaiku tilpums dūmgāzēs $V_{H_2O}^o$, m^3/kg	0,6	1,0
5. Teorētiskais dūmgāzu tilpums V_{dg}^o , m^3/kg	6,3	4,0
6. Dūmgāzu tilpums, ja $\alpha = 5,25$, V_{dg} , m^3/kg	31,3	17,4
7. Dūmgāzu tilpums, ja $\alpha = 1,8$, V_{dg} , m^3/kg	11,0	6,5

Ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi Balvu apakškurtuvē netika novēroti. Dati 2.19. attēlā liecina, ka lietderības koeficients pieaug, jo ogļu kurtuvē $q_3 = 0,6\%$.

Balvos ar oglēm kurinātajā katla kurtuvē tika novērots tikai viens siltuma zudumu komponents no mehāniski nepilnīgas degšanas - nesadedzis kurināmais tiek aizvākts kopā ar izdedžiem, pie kam tas pārsniedz normatīvo lielumu. Tā vērtība ir $q_4 = 17\%$. Rekonstruējot katlu koksnes

dedzināšanai, šos zudumus iespējams likvidēt, taču nedaudz palielinās siltuma zudumi ar kurināmā putekļiem dūmgāzēs - 0,4%.

Siltuma zudumi ar izdedžiem ir niecīgi gan pirms, gan pēc rekonstrukcijas, tādēļ tos šinī gadījumā var neņemt vērā.

Balvu siltuma avotā gaisa piesūkumi šobrīd ir novērsti un katlu lietderības koeficients ir pieaudzis par ~10%.

2.2.2.5.4. Enerģētiski efektīvas tehnoloģijas lietojums

Katlu rekonstrukcijas inženiertehniskās pieredzes apgūšanai tika izmantotas katlu konstrukcijas, kuras tiek ļoti plaši izmantotas Baltijā un visā bijušās Padomju Savienības teritorijā: tvaika katli DKVR un DE.

DKVR katli ir vecāki, un 1986.gadā Bijskas katlu rūpnīca atteicās no šo katlu ražošanas. Tāpēc šī tipa jaunākie katli ir 10 (vecākie - sasnieguši pat 40) gadus veci. Katlus iespējams ekspluatēt ar augstu lietderības koeficientu. To konstrukcijā ir specifiska īpatnība - pilnīgas sadegšanas kamera, kas novietota aiz kurtuves dūmgāzu ceļā.

DE katli ir kompaktāki, to lietderības koeficients, pēc pases datiem, ir augstāks - līdz 93%.

Lai pareizi veiktu enerģētiski efektīvu katlu pārveidi uz enerģētiskās koksnes dedzināšanu, ir nepieciešams ievērot dažādus nosacījumus. Dedzināšanas sistēmas izvēle atkarīga gan no kurināmā sastāva, gan no tā izmēriem un formas, uzņēmuma lieluma, kurtuves veida un citiem raksturlielumiem.

Degšanas procesa tehnoloģija tiek veidota atbilstoši tam, ka:

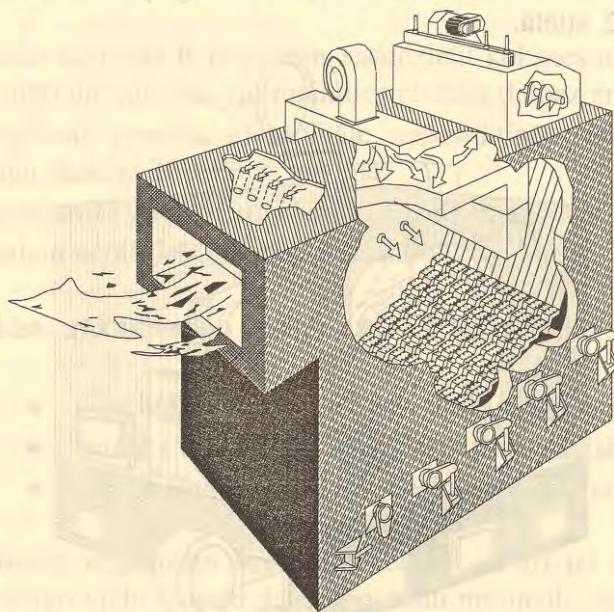
- kurināmajā cietā veidā - ogleklis ir tikai 20% no kopējā koksnes apjoma, pie kam tas veido liesmu kurināmā pamatslānī;
- gaistošās vielas sadeg virsslāņa zonā (apmēram 80% sausās koksnes).

Tātad koksnes degšanai kurtuves jāveido tā, lai kurtuves tilpums virs ārdiem būtu pietiekams. Rekonstrukcijas gadījumos, kad kurtuve tiek novietota ārpus katla, to var samazināt, jo tad kā pilnīgas degšanas kameru

iespējams izmantot katla kurtuvi. Daļēji tas realizēts Valgas un Biržu katlu mājās.

Tas nav tikai gaisa un gaistošo vielu sajaukšanās tilpuma izmēru jautājums, bet gan vienlaicīgi arī šī maisījuma veidošanas organizācijas problēma. Enerģētiski efektīva degšanas procesa veidošana šobrīd tiek realizēta ar vairākstadiju gaisa pievadišanu dažādās kurtuves vietās.

Ļoti svarīgi ir pareizi izvēlēties, kur notiks degšanas process - apakškurtuvē, priekškurtuvē vai kurtuvē. Cietā kurināmā degšanas procesi ir ļoti atšķirīgi no gāzes un šķidrā kurināmā degšanas. Piemēram, cietā kurināmā pilnīgas sadegšanas laiks ir daudz ilgāks un tas veido t.s. ierobežojošo faktoru izvēlētajai katla ražībai. Šo trūkumu var novērst, ar priekškurtuves palīdzību palielinot degšanas zonu.



2.21. att. Slīpo kustīgo ārdū kurtuve.

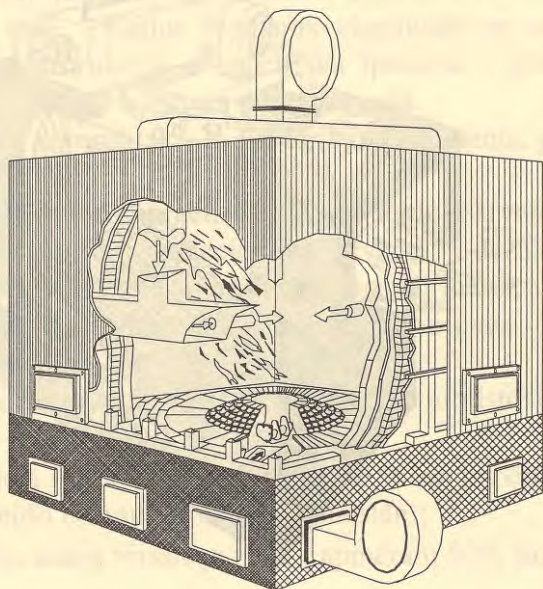
Mazajām katlu mājām ar siltuma ražību - līdz 3 MW visvairāk izplatītās ir nekustīgo ārdū kurtuves:

- ar plakaniem ārdiem un augšējo padevi;
- ar koniskiem ārdiem un kurināmā padevi priekškurtuves centrā.

Lielākiem katliem ar siltuma ražību līdz 6 ... 7 MW parasti lieto plakanos, slīpos kustīgos ārdus. Savukārt, lielākiem katliem enerģētiski efektīvāka ir verdošā slāņa degšanas tehnoloģija.

Balvos un Slampē katlam DKVR 4/13 priekškurtuvē uzstādīti slīpi novietoti kustīgi ārdi, pa kuriem kurināmais lēnām, slīdot lejā, pakāpeniski iziet visas degšanas stadijas. Kurtuves konstrukcija parādīta 2.21. attēlā.

Cita tipa ārdu kurtuve izmantota Valgas rekonstrukcijas projektā. Šai priekškurtuvei izmantoti koniskie ārdi ar augšējo kurināmā padevi, tā uzskicēta 2.22. attēlā.



2.22. att. Konisko ārdu kurtuve.

Visām priekškurtuvēm un apakškurtuvēm salīdzinājumā ar katla esošās kurtuves izmantošanu ir kopīgas priekšrocības katlu rekonstrukcijas gadījumā. Piemēram, nav nepieciešams pārveidot katlu, nenotiek kurtuves dzesēšana ar ekrānu palīdzību, līdz ar to iespējams sadedzināt kurināmo ar augstu mitruma saturu, bez tam katla nomaiņas gadījumā nav nepieciešams mainīt priekškurtuvi.

Tomēr ir vērojami arī trūkumi: pieaug siltuma zudumi apkārtējā vidē, veidojas liels neracionāli izmantots tilpums bijušajā kurtuvē, kā arī priekškurtuves un apakškurtuves ir dārgākas par kurtuvē iebūvētiem ārdiem, jo nepieciešams veidot izolētas sienas un griestus.

Katlu ekspluatācijas laikā konstatētas Balvu slīpo kustīgo ārdurī priekškurtuves priekšrocības salīdzinājumā ar konisko ārdurī priekškurtuvi:

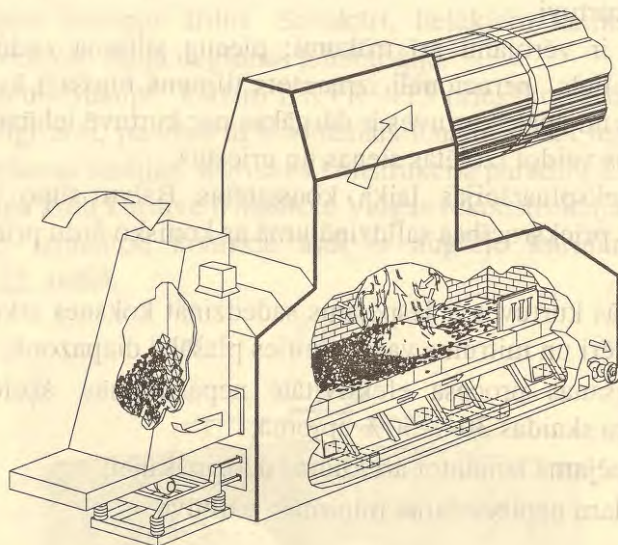
- šādās kurtuvēs ir iespējams sadedzināt koksnes atkritumus, kuru izmēri un mitrums var mainīties plašākā diapazonā;
- degšanas procesa efektivitāte nepasliktinās, šķeldai piejaucot zāģu skaidas 30 ... 50% apjomā;
- iespējams izmantot arī kūdras dedzināšanai;
- katlam nepieciešama minimāla pārbūve.

Savukārt, trūkumi slīpo kustīgo ārdurī kurtuvei Balvos ir:

- dilst bīdāmo ārdurī kustīgais mehānisms kurtuvē;
- zemāka (par ~1 ... 2%) kurtuves enerģētiskā efektivitāte;
- apgrūtināta katla un kurtuves savienojuma hermetizācija.

Lai pareizi organizētu degšanas procesu, kā arī lai siltuma zudumi kurtuvē un caurīgu vielu izmešu daudzumi būtu minimāli, dažādās kurtuves zonās ar ventilatoriem tiek padots primārais un sekundārais gaiss. Vispārējos vilcienos kurtuvju konstrukcijas atšķiras maz. Taču katrai kurtuvei raksturīgas dažas specifiskas īpatnības, kuras noskaidrotas ilggadēju pētījumu rezultātā, un katra katlu ražotāja firma tās rūpīgi tur noslēpumā. Ļoti bieži tas ir saistīts tieši ar gaisa padevi.

Kokapstrādes atlikumu degšanas tehnoloģijas pilnveidošanas meklējumi tiek veikti arī kurināmā padeves un ārdū konstrukciju specifiskā. Viens no interesantākajiem risinājumiem ir saistīts ar vibrējošu keramisku termiski izturīgu ārdū kurtuvju izveidi. Vibrējošu ārdū kurtuves principiāla shēma dota 2.23. attēlā.



2.23. att. Vibrējošu ārdū kurtuves principiāla shēma.

Salīdzinājumā ar plaši pazīstamajiem mehāniskajiem ārdū vibrējošu ārdū kurtuvēm ir vēra ņemamas priekšrocības:

- tajās var dedzināt atšķirīgas kvalitātes koksni (arī mizas), kuras mitruma saturs un gabalu izmēri var būt plašā diapazonā;
- vibrējošie ārdū uzlabo kurināmā gazifikācijas procesu kurtuvē, jo nepārtrauktas vibrācijas rada iespēju kurināmā un gaisa pilnvērtīgākam sajaukšanās procesam;

- ārdū slodzi var palielināt, jo efektīvāk un intensīvāk noris termiskās sadalīšanās process;
- specifisks kurināmā ievads, kas ļauj minimizēt gaisa piesūkumus kurtuvē;
- primārā gaisa temperatūra var būt augstāka, pateicoties ārdū rāmja dzesēšanas (izmantojot ūdeni) sistēmai un vibroelementu veiksmīgam novietojumam.

Pagaidām var atzīmēt tikai dažus keramisko vibrējošo ārdū kurtuvju trūkumus salīdzinājumā ar parastajām mehānisko ārdū kurtuvēm:

- tās prasa lielākus kapitālieguldījumus;
- trūkst ilggadējas darbības pieredzes, kas ļautu pārliecināties par to uzstādīšanas lietderīgumu.

Speciāla ir ciklonu kurtuvju konstrukcija (skat. 2.24. attēlu), kurā iespējams sadedzināt mitru kurināmo (virs 50 %).

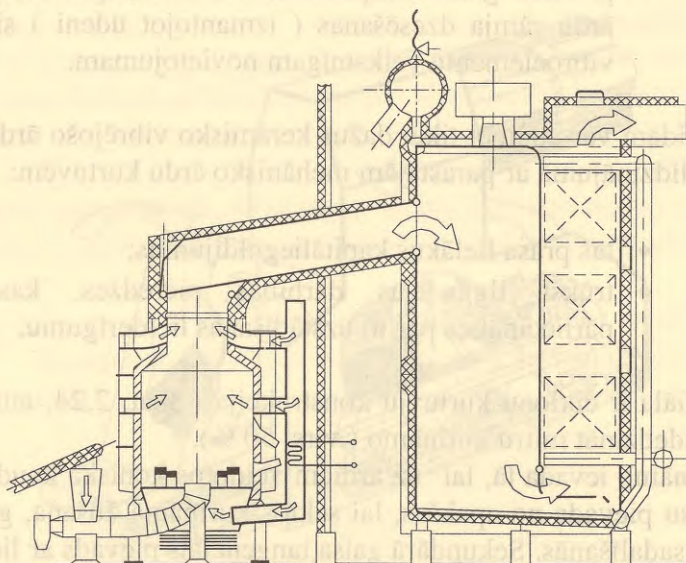
Kurināmo ievada tā, lai uz ārdiem veidotos koniska kaudze. Karstu primāro gaisu pievada no apakšas, lai sāktos kurināmā žūšana, gāzifikācija un termiskā sadalīšanās. Sekundārā gaisa tangenciāls pievads ar lielu ātrumu ļauj panākt labu kurināmā, degšanas produktu un gaisa sajaukšanos. Trīskāršā gaisa padeve kurtuves izejā nepieciešama pilnīgas degšanas nodrošināšanai.

Bez jau pieminētajām kurtuvēm šobrīd pasaules enerģētikā koksnes atkritumu dedzināšanai izmanto tehnoloģijas, kuras izstrādātas un pilnveidotas daudzu desmitu gadu garumā, un to izvēle ir atkarīga gan no kurināmā kvalitātes, gan katlu jaudām.

Smalkam kurināmam nelielas jaudas katlos (sākot no 6 ... 7 MW) uzstāda kurtuves ar verdošo slāni. Šāda tipa kurtuves principiāla shēma parādīta 2.25. attēlā. Īpaša uzmanība tām tiek veltīta Somijā, kur aktuālas ir arī kūdras dedzināšanas problēmas.

Kokapstrādes tehnoloģijā veidojas ne tikai liels zāģu skaidu pārpalikums, bet arī koksnes putekļi. Verdošā slānī, kas tiek veidots virs

ārdiem, intensificējas siltumatdeve. Verdošā slāņa kurtuvei ir daudz priekšrocību. Piemēram, viegli sadedzināt zemas kvalitātes mitru kurināmo ar smilšu piejaukumu. Zemais temperatūru līmenis pozitīvi ietekmē gan konstruktīvos (kompaktāka kurtuve), gan ekoloģiskos (samazinās slāpekļa oksīdu izmeši) rādītājus.

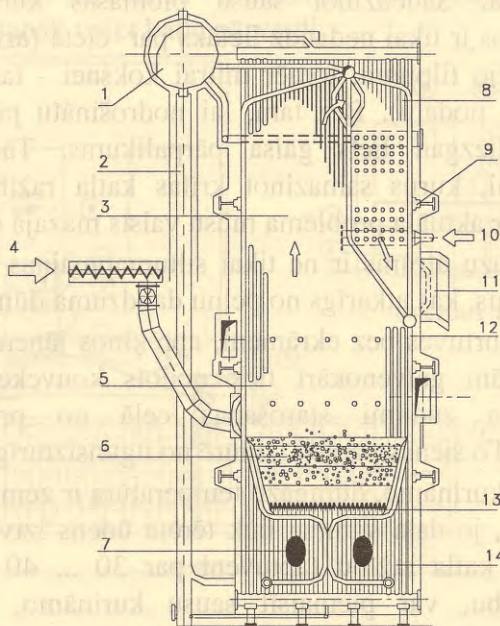


2.24.att. Ciklonu kurtuves principiāla shēma.

Verdošā slāņa kurtuvju izmantošana Latvijā ir nākotnes jautājums. To ieviešanu kavē galvenokārt ekonomiska rakstura problēmas:

- ekonomiski neizdevīgi lietot mazas jaudas katlu (līdz 6 MW);
- salīdzinoši lieli kapitālieguldījumi nelielas jaudas katlos (6 ... 20 MW);
- liels īpatnējais enerģijas pašpatēriņš: jo mazāka katla jauda, jo tas lielāks;

- nepieciešami kapitālieguldījumi palīgiekārtu iegādei, jo pirms koksnes daļiņu padeves kurtuvē tās iepriekš jāsamalcina.



2.25.att. Verdošā slāņa kurtuves principiāla shēma:

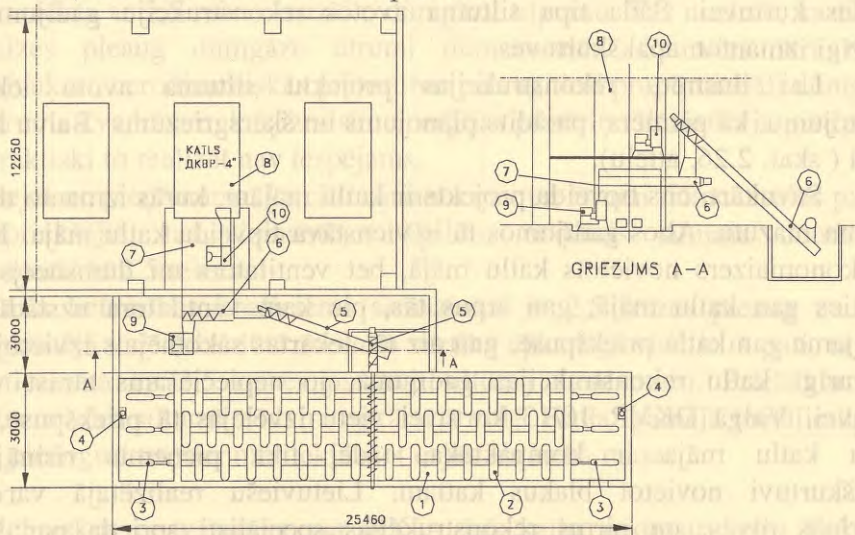
- 1 - tvaika boilers;
- 2 - cirkulācijas caurule;
- 3 - kurtuves tilpums;
- 4 - kurināmā padeve;
- 5 - virsslāņa degšanas zona;
- 6 - verdošais slānis;
- 7 - gaisa pievads;
- 8 - tvaika pārkarsētājs;
- 9 - virsmu appūšana;
- 10 - gaisa padeve;
- 11 - gāzu izvads;
- 12 - ekrāna caurules;
- 13 - pelnu aizvākšana;
- 14 - dzesēšanas caurules.

Kurināmā maiņas projekta priekšlikuma izstrādāšanas laikā svarīgi ir ne tikai orientēties kurtuvju konstrukcijās un to darbības īpatnībās, bet īpaša uzmanība jāpievērš dažiem svarīgiem aspektiem, kuri kurtuvju un katlu

ekspluatācijas laikā var būtiski ietekmēt darbības režīmus un enerģētisko efektivitāti:

- Dūmgāzu īpatnējais tilpums (attiecināts pret MWh) ir atkarīgs no kurināmā veida. Sadedzinot sausu biomasas kurināmo, dūmgāzu īpatnējais tilpums ir tikai nedaudz lielāks par cietā (arī šķidrā) kurināmā dūmgāzu īpatnējo tilpumu, tomēr mitrai koksnei - tas ir daudz lielāks (skat. 2.2.2.5.3. nodaļu). Bez tam, lai nodrošinātu pilnīgu degšanu, ir nepieciešams diezgan liels gaisa pārpalikums. Tādā veidā pieaug dūmgāzu ātrumi, kurus samazinot krītas katla ražība. Katlu slodzes samazināšanās ir aktuāla problēma mūsu valsts mazajā enerģētikā.
- Atļautais dūmgāzu ātrums ir ne tikai siltumapmaiņas problēma, bet arī erozijas jautājums, kas atkarīgs no pelnu daudzuma dūmgāzēs.
- Lietojot priekškurtuves bez ekrāniem, aprēķinos jāņem vērā, ka siltums katlu sildvirsmām galvenokārt tiek nodots konvekcijas ceļā, kā arī papildu siltuma zudumi starošanas ceļā no priekškurtuves vai apakškurtuves. To sienas parasti izmūrē no ugunsizturīgiem ķieģeļiem.
- Dedzinot mitru kurināmo, dūmgāzu temperatūra ir zemāka nekā dedzinot sausu kurināmo, jo daļa siltuma tiek tērēta ūdens iztvaikošanai. Arī šis faktors mazina katla ražību (aptuveni par 30 ... 40 %). Dažreiz, lai palielinātu ražību, var piemaisīt sausu kurināmo, taču arī šeit ir ierobežojumi, jo, palielinoties temperatūrai, kurtuvē palielinās ārdūmējumi, ja tie nav speciāli apstrādāti. Pieļaujama kurināmā mitruma saturs ir 35 % (minimums) līdz 55 ... 60% (maksimums).
- Pelni, kas atrodas dūmgāzēs, nosēžas uz siltuma starošanas virsmām, tādā veidā samazinot izstarotā siltuma daudzumu un paaugstinot dūmgāzu temperatūru. Lai atrisinātu šo problēmu, ir nepieciešama laba nopūšanas sistēma.
- Sadedzinot biomasas kurināmo, iespējams paaugstināt katla darbības efektivitāti dūmgāzes stiprāk atdzesējot, jo sēra saturu var neņemt vērā, tāpēc vienīgi rasas punkta temperatūra limitē gāzu temperatūru katla izvadā un pat 100...120°C temperatūrā nerodas problēmas par koroziju.

- Katla pārveide ir atkarīga arī no tā sildvirsmu, siltuma izolācijas, rovjū un iekārtu praktiskā stāvokļa un nolietojuma pakāpes. Ir dažādi katlu iekārtu testēšanas paņēmieni: vizuālā pārbaude, cauruļu sienīņu biezuma mērīšana vai cauruļu paraugu analīze, dūmeju blīvuma kontrole utt.
- Balstoties uz šiem testēšanas rezultātiem un aprēķiniem, ir iespējams noteikt, kā vislabāk veikt katla pārveidi.



2.26. att. Balvu rekonstruētās katlu mājas plānojums un šķēsgriezums:

- 1 - kurināmā noliktavas; 2 - skrēpers; 3 - hidrauliskais cilindrs; 4 - hidrauliskā iekārta; 5 - gliemežpārveds; 6 - barošanas gliemežpārveds; 7 - priekškurtuve; 8 - katls; 9 - primārā gaisa ventilators; 10 - sekundārā gaisa ventilators.

Kurināmā pārveides projekts vienmēr saistīts ne tikai ar kurtuves uzstādīšanu, bet arī ar katlu mājas rekonstrukciju. Labs piemērs varētu būt uzņēmuma "Balvu enerģija" katlu māja. Šādas katlu mājas ar dažādu katlu skaitu Latvijā tika būvētas pēc tipveida projektiem, tāpēc sastopamas visur, kur dedzina ogles DKVR katlu kurtuvēs.

Pirmajā stāvā atrodas dūmsūcēji, ventilatori, sūkņi, izdedžu aizvadišanas iekārta. Otrajā stāvā novietoti divi katli, ekonomazeri un kurināmā iesviedēji, ja kurtuve ir mehanizēta, arī siltummaiņi un deaerators. Katlu mājas ārpusē atrodas dūmgāzu attīrīšanas multicikloni un skurstenis.

Balvos ogļu padeve tika veikta ar rokām, jo mehāniskā kurināmā padeve nedarbojās. Katlu mājas telpas ir plašas un tajās viegli atrast vietu šķeldas kurtuvei. Šāda tipa siltuma avotos rekonstrukciju gadījumā ir izdevīgi izmantot apakškurtuves.

Lai ilustrētu rekonstrukcijas projektu siltuma avotu iekārtu izvietošanu, kā piemērs parādīts plānojums un šķērsriezums Balvu katlu mājai (skat. 2.26. attēlu).

Savukārt, cits tipveida projekts ir katlu mājām, kurās izmanto dabas gāzi un mazutu. Abos gadījumos tā ir vienstāva tipveida katlu māja. Katls un ekonomazeris novietots katlu mājā, bet ventilators un dūmsūcējs var atrasties gan katlu mājā, gan ārpus tās, pie kam ventilatora uzstādīšana iespējama gan katla priekšpusē, gan aiz tā. Iekārtas sākotnējais izvietoējums ir svarīgs katlu rekonstrukcijas gadījumā, jo nepieciešams atrast vietu kurtuvei. Valgā DKVR 10/13 kurtuvei vietu izvēlējās tā priekšpusē, bet Biržu katlu māja ir kompaktāka, tādēļ tika pieņemts risinājums priekškurtuvi novietot blakus katlam. Lietuviešu realizētajā variantā pagarinās roves, un pirms rekonstrukcijas speciālisti sprieda par katla lietderības koeficienta samazināšanos, kuru izraisītu siltuma zudumu pieaugums no karstajām virsmām. Praksē šis šaubas neapstiprinājās.

Latvijā ir specifiski ne tikai DKVR un DE tipa tvaika katli, bet daudz būtiskāks siltumapgādes sistēmu vajadzību nodrošināšanai ir RK - 1,6 katlu īpatsvars. Šos ūdenssildāmos katlus agrāk Rīgā ražoja rūpnīca "Komunaļņiks". Tagad tās vietā darbojas firma "Orions".

Šo RK - 1,6 dūmcauruļu katlu pārbūve koksnes dedzināšanai saistīta ar katlu slodzes samazināšanos (dažreiz pat trīs reizes), tāpēc Skandināvijas valstīs jau pirms 20 gadiem no dūmcauruļu katlu rekonstrukcijas idejas enerģētiski ir atteikušies.

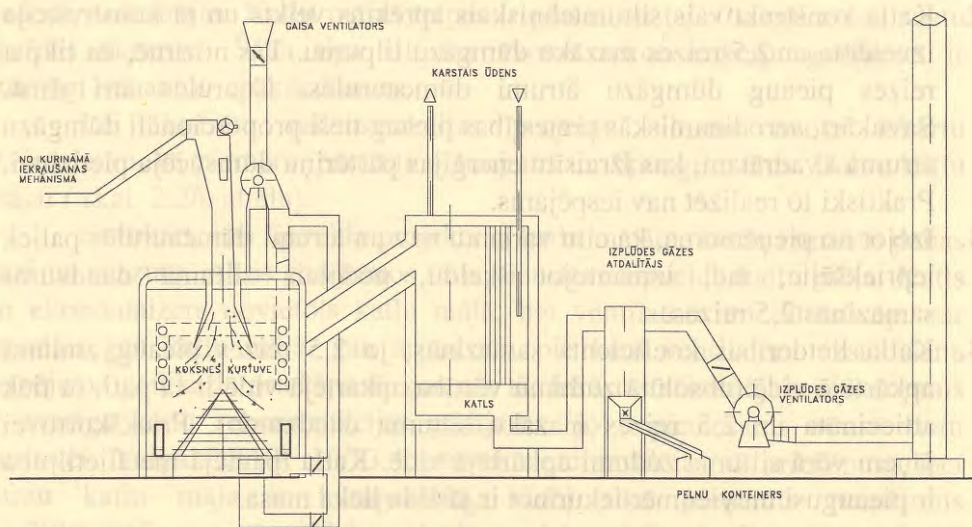
Slodzes samazināšanās iemesli ir šādi:

1. Lai iegūtu to pašu siltuma daudzumu, kuru sadegot izdala 1 kg mazuta, nepieciešams sadedzināt 5 reizes vairāk šķeldas. Dūmgāzu tilpums, sadegot 1 kg mazuta, ir 2 reizes lielāks nekā no 1 kg šķeldas. Tas nozīmē, ka, lai iegūtu to pašu siltuma daudzumu, aizvietojot mazutu ar šķeldu, dūmgāzu tilpums ir $5/2 = 2,5$ reizes lielāks.
2. Katla konstruktīvais siltumtehnikais aprēķins veikts un tā konstrukcija izveidota ar 2,5 reizes mazāku dūmgāzu tilpumu. Tas nozīmē, ka tikpat reizes pieaug dūmgāzu ātrumi dūmcaurulēs. Caurules ātri dilst. Savukārt, aerodinamiskās pretestības pieaug tieši proporcionāli dūmgāzu ātruma kvadrātam, kas izraisītu enerģijas pārtēriņu dūmsūcēja piedziņai. Praktiski to realizēt nav iespējams.
3. Izejot no pieņēmuma, ka citu variantu nav un ātrumi dūmcaurulēs paliek iepriekšējie, tad, izmantojot šķeldu, nodotais siltuma daudzums samazinās 2,5 reizes.
4. Katla lietderības koeficients samazinās, jo 2,5 reizes pieaug zudumi apkārtējā vidē (absolūtā zudumu vērtība apkārtējā vidē ir tā pati, tā tiek attiecināta uz 2,5 reizes mazāku siltuma daudzumu). Priekškurtovei jāņem vērā siltuma zudumi apkārtējā vidē. Katla īpatnējā metālietilpība ir pieaugusi un vienmēr iekurinot ir jāsilma lieka masa.

Šos tehniskos apsvērumus par RK - 1,6 katlu rekonstrukciju koksnes degšanas siltuma izmantošanai apkopo, tiem pievienojot ekonomiskos rādītājus - priekškurtoves izmaksas, kā arī ekspluatācijas izdevumus-, un salīdzina ar izdevumiem jaunam katlam. Tikai tehniski ekonomiskais pamatojums var dot precīzu atbildi, kurš variants ir labāks.

Zviedrijas valdības kredīti neaprobežojas ar investīcijām ārvalstīs būvētu modernu, enerģētiski efektīvu kurtuvju uzstādīšanu Latvijā. Pašlaik "Videi piemērotas energosistēmas veidošanas" programmas ietvaros, kuru Baltijas valstīs un Austrumeiropā Zviedrijas valdības vārdā realizē NUTEK, zviedru speciālisti piedāvāja kredītu nelielas jaudas katla (līdz 2,0 MW) vietējās ražošanas tehnoloģijas attīstībai mūsu valstī. Zviedru puses piedāvātā katla un kurtuves tehniskā risinājuma priekšlikuma principiāla shēma dota 2.27.attēlā.

Tehnisko piedāvājumu konkursa rezultāti parādīja vietējo katlu ražotāju gatavību un iespējas uzsākt progresīvas degšanas tehnoloģijas iekārtu ražošanu. Kā jau tas kļuvis par parastu lietu, konkursā uzvar ražotājs, kas piedāvā tehniski labāko un lētāko variantu. Diemžēl konkursa



I

2.27. att. Kurtuves un katla iekārtas principiāla shēma tenderu priekšlikumiem.

noteikumiem atbilstošie koksnes dedzināšanas kurtuvju vislabākie tehniski ekonomiskie parametri bija zviedru firmai, un līdz ar to vietējiem katlu ražotājiem bija jāapmierinās ar pasūtījumu tikai katla izgatavošanai. Tāda ir šibrīža situācija koksnes degšanas tehnoloģijā Latvijā.

2.3. SEKUNDĀRIE ENERGORESURSI

2.3.1. Sekundārās enerģijas izmantošanas koncepcija

Jebkurā ražošanas procesā, to vidū arī enerģijas, nav iespējams organizēt bezatlikuma tehnoloģiju. Sekundārās enerģijas izmantošana ir jāuzskata par vienu no racionālākajiem ceļiem enerģijas patēriņa samazināšanas virzienā. Sekundāro energoresursu definīcija ietver:

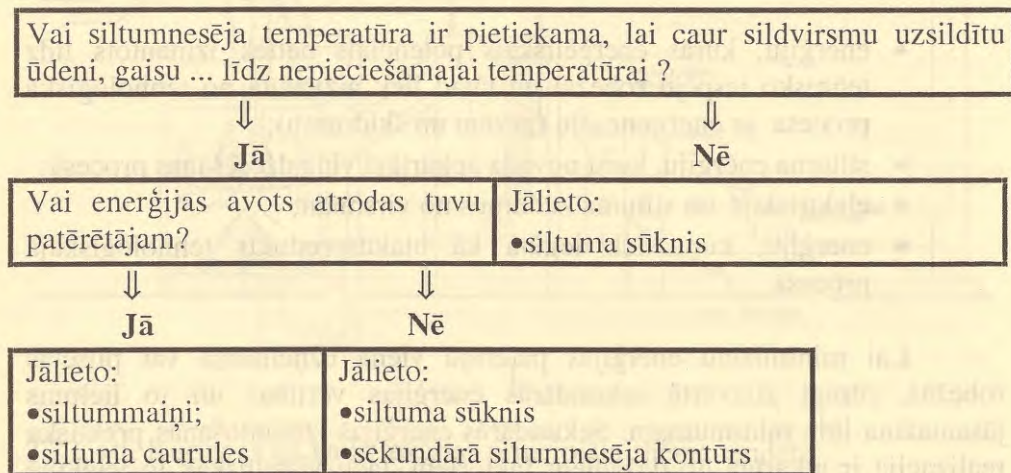
- enerģiju, kuras enerģētiskais potenciāls netiek izmantots līdz tehnisko iespēju robežai un tātad tiek aizvadīta no tehnoloģiskā procesa ar energonesēju (gāzēm un šķidrumu);
- siltuma enerģiju, kuru novada apkārtējā vidē dzesēšanas procesā;
- elektriskos un siltuma zudumus no virsmām;
- enerģiju, kura tiek iegūta kā blakusprodukts tehnoloģiskajā procesā.

Lai minimizētu enerģijas patēriņu viena uzņēmuma vai pilsētas robežās, rūpīgi jāizvērtē sekundārās enerģijas vērtības un to lielums jāsamazina līdz minimumam. Sekundārās enerģijas izmantošanas praktiska realizācija ir atkarīga no dažādiem faktoriem, taču visbūtiskāk to ietekmē energonesēja potenciāls.

Visā pasaulē enerģētiķu prātus nodarbina zema potenciāla (zemas temperatūras, retāk - spiediena) siltuma avotu izmantošana. Augstas temperatūras siltumnesēja vienībai ir plašākas realizācijas iespējas (tehnoloģiskos procesos, apkurē, ventilācijā, karstā ūdens apgādē utt.) salīdzinājumā ar tādu, kuras temperatūra ir zemāka. Savukārt nav racionāli izmantot augstas temperatūras siltumnesēju par siltuma avotu tehnoloģiskajos procesos, kur tas nav nepieciešams (piemēram, karstā ūdens sagatavošanai lietot ūdeni ar 200°C temperatūru), jo pilnā mērā netiek izmantota pievadītās enerģijas darbaspēja.

Vēl sarežģītāk ir lietot zemas temperatūras siltumnesēju: šobrīd neprotam izlietot ūdens siltuma enerģiju, ja tā temperatūra ir 25-35°C. Šādu ūdeni lielos daudzumos iegūst termoelektrostacijās, dzesējot turbīnu kondensācijas iekārtas, un tā siltumu ar dzesēšanas torņu palīdzību novada apkārtējā vidē. Tas pats sakāms par telpu nosūces ventilācijas sistēmu gaisu, par kompresoru dzesēšanas sistēmu siltumnesējiem un citiem tehnoloģisko procesu zema potenciāla energonesējiem.

Shematiski sekundāro energoresursu izmantošanas algoritmu varētu uzskicēt šādi:



Kā redzams no šī algoritma, siltummaiņi un siltuma sūkņi ir divi visbiežāk sastopamie inženiertehniskie risinājumi, kuri būtu lietojami sekundārās enerģijas izmantošanai.

Neskatoties uz to, ka siltuma sūkņi Latvijā ekonomisku apsvērumu dēļ, kuri tiks skaidroti vēlāk (skat. 3.nodaļu), pagaidām maz tiek lietoti, mums uzkrājusies neliela pieredze šajā jomā. 2.3. nodaļas pēdējā sadaļā izklāstīti eksperimentālo pētījumu rezultāti siltuma sūkņim, kurš uzstādīts individuālās dzīvojamās mājas siltumapgādes sistēmas vajadzību nodrošināšanai, izmantojot zemes siltumu.

Siltummaiņus, kurus iespējams lietot enerģijas atlikuma izmantošanas shēmās, varētu klasificēt pēc šādām pazīmēm:

- pēc siltumnesēja veida - šķidrums - šķidrums, gāzes - šķidrums, gāzes - gāzes;
- pēc siltumnesēju plūsmas - pretplūsmas, līdzplūsmas, kombinētie;
- pēc konstrukcijas - rekuperatīvais, reģeneratīvais un kontaktsiltummainis;
- pēc siltumapmaiņas virsmas elementu konstrukcijas - ar caurulēm, plāksnēm ;
- pēc lietojuma - katla rekuperatīvais ekonomizers un gaisa sildītājs, saplūdes tipa ekonomizers, ekonomizers - kondensators, atkritumu dedzināšanas iekārta.

Pēdējā grupa norāda sekundārā energoresursa izmantošanas iekārtu - siltummaiņu novietojumu tehnoloģiskajā procesā. Šādu aparātu lietošanas diapazonu un energoefektivitāti iespējams noteikt, tikai rūpīgi izpētot iekārtu darbības parametrus, to izmaiņas.

Viena no visperspektīvākajām gāzu zema potenciāla siltuma enerģijas atlikuma izmantošanas iekārtām ir kontaktaparāts, kurā vienlaicīgi norit sarežģīti siltuma un masas apmaiņas procesi, ieskaitot arī fāzu pārejas, t.i., kondensāciju un iztvaikošanu.

Kontaktaparātus jeb saplūdes tipa siltummaiņus nosacīti varētu iedalīt trīs grupās:

(I) aparāti, kuros par dzesēšanas aģentu izmanto gāzi (visbiežāk gaisu);

(II) aparāti, kuros karstās gāzes nonāk kontaktā ar dzesēšanas šķidrumu;

(III) aparāti, kuros karstās gāzes kontaktē ar šķidrumu, bet gāzu siltumu uzņem trešais siltumnesējs caur sienīņu, nesajaucoties ar šķidruma un gāzes maisījumu.

Jau piecpadsmit gadus autore kopā ar kolēģiem no Rīgas Tehniskās universitātes nodarbojas ar dūmgāzu atlikuma enerģijas izmantošanas problēmām, īpaša uzmanība tiek veltīta siltuma un masas apmaiņas procesu norisei, to pētījumiem un modelēšanai trešās grupas aparātos: ekonomaizerā - kondensatorā jeb aktīva pildījuma kontaktaparātā.

2.3.2. Siltuma un masas apmaiņa kontaktaparātos

Aktīva pildījuma kontaktaparātos tiek realizēta aizplūstošo gāzu siltuma utilizācija, dzesējot tās zem rāsas punkta un šajā gadījumā izmantojot gan gāzu fizisko siltumu, gan kondensējošos tvaiku fāzu pārejas siltumu. To darbība ir saistīta ar siltuma un masas pāreju, kura notiek starp piesārņoto tvaika-gāzu plūsmu un fāzu pārejas virsmu un tālāk cauruļu sieniņas virsmu. Kondensāta plēvīte, kas rodas uz siltumapmaiņas virsmas, veicina cieto daļiņu izgulsnēšanu no plūsmas un gāzveida komponentu absorbciju. Siltuma un masas apmaiņas intensifikācija saistīta ar spēcīgāku tvaika-gāzu plūsmas dzesēšanu un veicina gāzu attīrīšanas efektivitātes palielināšanos. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa principiālā shēma parādīta 2.28. attēlā.

Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi tiek veidotas divas plūsmas:

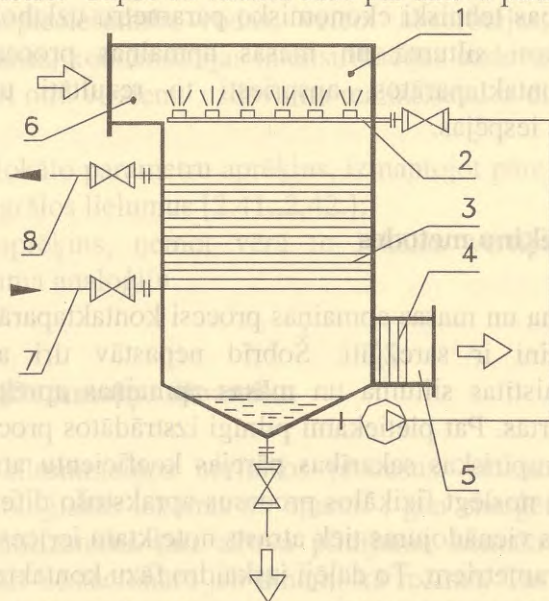
- tīrā - apskalo sildvirsmu no vienas puses (parasti tas ir ūdens);
- piesārņotā - applūst sildvirsmu no otras puses (dūmgāzes vai tehnoloģiskās gāzes un smidzināšanas šķidrums).

Smidzināšanas šķidrums tiek izsmidzināts kontaktaparāta augšējā daļā, kur tas kontaktējas ar dūmgāzēm. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi notiek kompleksā siltumapmaiņa:

- siltums no dūmgāzēm pāriet uz smidzināšanas šķidrumu un cauruļu sieniņu konvekcijas veidā, pie kam siltumatdevi no dūmgāzēm intensificē tvaiku kondensācijas un iztvaikošanas procesi;

- caur aktīvā pildījuma metāla sienu un smidzināšanas šķidruma plēvīti notiek siltuma vadīšana;
- no cauruļu sienas uz ūdeni - atkal konvekcija.

Sildvirsmas parasti tiek veidota no horizontāli vai vertikāli novietotām caurulēm, pa kuru iekšpusi (specifiskos gadījumos pa ārpusi) plūst tīrais siltumnesējs. Siltumapmaiņas virsma pilda arī siltumnesēju kontakta virsmas lomu un tādēļ radies nosaukums - pildījums. Uz sildvirsmas uzlabojas gāzes un smidzināmā šķidruma savstarpējā kontakta iespējas. Bez tam sakarā ar to, ka caurules tiek dzesētas, masas apmaiņas process intensificējas. Tātad tās piedalās vienlaicīgi siltuma un masas apmaiņas procesu norisē. Tāpēc šo virsmu sauc par aktīvo pildījumu.



2.28. att. Eksperimentāli rūpnieciskās aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa iekārtas principiāla shēma: 1 - korpuss; 2 - smidzināšanas sprauslas; 3 - aktīvais pildījums; 4 - separācijas iekārta; 5, 6 - (attiecīgi) gāzu ievads un izvads; 7, 8 - (attiecīgi) ūdens ievads un izvads.

Dzesētas un tīrītas (arī sausākas) dūmgāzes tiek aizvadītas no kontaktsiltummaiņa apakšējās daļas caur separācijas iekārtu. Tā nepieciešama, lai atdalītu šķidruma pilienus no dūmgāzu plūsmas. Smidzināšanas šķidrums uzkrājas apakšējā daļā, no kurienes ar sūkņa palīdzību tiek padots uz smidzināšanas sprauslām. Tātad tiek izveidots noslēgts smidzināšanas kontūrs. Sakarā ar to, ka no dūmgāzēm kondensējas tvaiks, smidzināšanas šķidruma daudzums pieaug un tā pārpalikums jāaizvada no kontaktaparāta apakšējās daļas. Tur uzkrājas arī cietās daļiņas, kas tiek atdalītas no dūmgāzu plūsmas.

Kontaktaparātu arvien plašākais lietojums gan katlu mājās un termoelektrostacijās, gan tehnoloģiskajās iekārtās izvirza nepieciešamību rūpīgāk izziņāt tajos notiekošos procesus, to īpatnības un meklēt šādu iekārtu darbības tehniski ekonomisko parametru uzlabošanas iespējas. Šajā nodaļā aplūkoti siltuma un masas apmaiņas procesu pētījumi aktīva pildījuma kontaktaparātos, apspriesti to rezultāti un parādītas dažas tehnoloģiskās iespējas.

2.3.2.1. Aprēķinu metodes

Siltuma un masas apmaiņas procesi kontaktaparātos norit vienlaicīgi un to aprēķini ir sarežģīti. Šobrīd nepastāv tīri analītiskas metodes savstarpēji saistītas siltuma un masas apmaiņas aprēķināšanai tiešā fāzu kontakta iekārtās. Pat pietiekami pilnīgi izstrādātos procesu matemātiskajos modeļos ir empīriskas sakarības pārejas koeficientu atrašanai. Empīriskās sakarības ļauj noslēgt fizikālos procesus aprakstošo diferenciālvienādojumu sistēmu. Katrs vienādojums tiek atrasts noteiktam ierīces tipam, fizikālajiem un režīma parametriem. To daļēji izskaidro fāzu kontakta virsmas īpatnības:

- formas nenoteiktība un stohastiskais raksturs,
- pārejas procesu vienlaicīga norise vairākos virzienos.

Turklāt iekārtu siltuma un masas apmaiņas jau tā komplicētos procesus sarežģī tas, ka tehnoloģiskajām vajadzībām lietojamie rūpniecības uzņēmumu katli darbojas izteikti dinamiskā režīmā.

Siltuma un masas apmaiņas aparātu aprēķini tiek veikti ar dažādiem mērķiem, tādēļ tiek lietotas atšķirīgas noteikšanas metodes. Var izdalīt divus izstrādņus virzienus:

- Pirmais virziens aplūko aparātu kā koncentrētu parametru kopumu un pārejas koeficienti ir integrāli lielumi visā kontaktsiltummaiņī. Šī virziena metodes ļauj veikt kontaktpaparātu projektēšanas un pārbaudes aprēķinus.
- Otrais virziens aplūko aparātu kā izkļiedētu parametru objektu, un aprēķinu mērķis ir lokālo parametru sadalījuma atrašana. Šāda nepieciešamība rodas, veicot absorbcijas, cieto daļiņu uztveršanas, kondensācijas intensifikācijas uzdevumu risināšanā. Savukārt otrā virziena uzdevumu realizēšanai ir divas pieejas:

(a) lokālo parametru aprēķins, izmantojot pārejas koeficientu integrālos lielumus [2.41.,2.42.];

(b) aprēķins, ņemot vērā to lokālās vērtības, izmantojot siltuma analogiju.

2.3.2.2. Kontaktsiltummaiņu dinamika

Aplūkojot siltummaiņos noritošos procesus, jāuzskata, ka reālos apstākļos gan tehnoloģiskās iekārtas un aparāti, gan enerģētiskās iekārtas, ieskaitot siltuma utilizatorus (arī aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņus), darbojas galvenokārt nestacionārā jeb dinamiskā režīmā. Tas izskaidrojams gan ar arējām, gan iekšējām ierosmēm, kas izjauc iekārtu stacionāros darbības režīmus. Pie šādām ierosmēm jāpieskaita apkārtējās vides un siltumnesēju parametru, iekārtas slodzes, tehnoloģiskā režīma un citu faktoru maiņas.

Nelielu ierosmju un lēni notiekošu siltuma un masas apmaiņas procesu gadījumā iekārta vai aparāts strādā kvazistacionārā režīmā. Vispārējā gadījumā tas ir tuvs nemainīgam režīmam, tādēļ kvazistacionāru procesu risinājumos var izmantot stacionāru režīmu aprēķina izteiksmes. Atšķirībā no iekārtu darbības ļoti mainīgos režīmos šādiem procesiem netiek izvirzītas speciālas prasības pret to dinamiku.

Tomēr iepriekš teikto nedrīkst attiecināt uz visiem gadījumiem, jo ne vienmēr tas ir pieļaujams. Piemēram, ja vajadzīgs automatizēt iekārtas darbību, tad šādu uzdevumu var atrisināt, tikai pamatojoties uz procesu dinamikas izpēti. Šis nosacījums jāievēro, arī pildot citus uzdevumus:

- izpētot iekārtu ieslēgšanas procesus;
- optimizējot mainīgus tehnoloģiskos režīmus;
- veicot iekārtu ieregulēšanai nepieciešamos bilances izmēģinājumus;
- nodrošinot un stabilizējot iekārtu darbības pamatrežīmus;
- kontrolējot un izpētot iekārtu režīmu stabilitāti.

Bez visu šo jautājumu risināšanas nav iedomājama mūsdienīga tehnoloģiskā iekārta un ekonomiska tās darbība. Tādēļ jau iekārtas projektēšanas laikā nepieciešams izveidot tās matemātisko modeli, ņemot vērā procesu dinamiku aparātā. Šie nosacījumi attiecas arī uz aktīva pildījuma siltuma utilizatoriem, putekļu uztveršanas un gāzu attīrīšanas aparātiem. Risināt šādus jautājumus iespējams, pētot dažādu iekārtu darbības parametrus un konstrukciju īpatnības. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņos par tādiem jāuzskata ūdens, gāzu maisījums, smidzināšanas šķidrums fizikālās īpašības, aparāta konstruktīvie parametri, kā arī siltuma un masas apmaiņas raksturojumi.

Šo parametru un raksturojumu savstarpējās ietekmes un saistības dēļ siltumā un masas apmaiņas procesos matemātiskais modelis aktīva pildījuma kontaktaparātos aptver sarežģītu vienādojumu sistēmu. Ilggadējas zinātniski pētnieciskas darbības rezultātā izveidoti vairāki matemātiskie modeļi:

- pirmais aplūko siltuma un masas apmaiņas procesus stacionārā režīmā, un tam veltīta autores doktores disertācija [2.13., 2.42];
- otrais tapis, izmantojot pieredzi darbā ar pirmo modeli, un tas ir plašāk lietojams, jo ietver nestacionāru procesu aprēķina iespējas [2.14., 2.16.].

Uz abu matemātisko modeļu bāzes izveidotas datorprogrammas attiecīgi stacionāro un nestacionāro procesu aprēķiniem.

2.3.2.3. Siltuma un masas apmaiņas procesu matemātiskie modeļi

Matemātiskie modeļi aktīva pildījuma kontaktaparātiem radušies pakāpeniski - ejot no vienkāršā uz sarežģīto. Pirmais modelis [2.13., 2.42.] ietvēra četrus diferenciālvienādojumu sistēmu:

- siltuma bilances vienādojumu;
- siltuma pārejas vienādojumu;
- masas atdeves vienādojumu;
- tvaika - gāzu maisījuma sausās siltumapmaiņas vienādojumu.

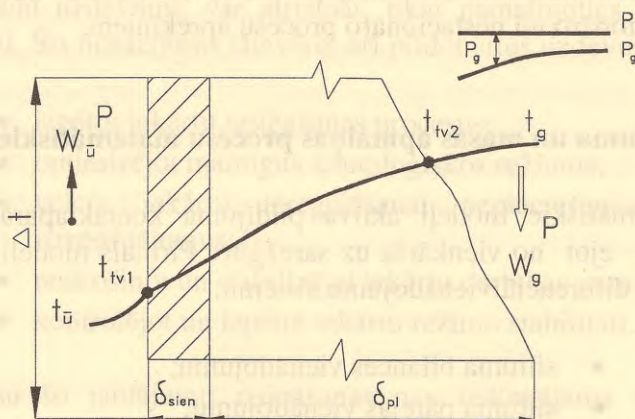
Šim matemātiskajam modelim ir ierobežots lietojums: tas aptver tikai stacionārus siltuma un masas apmaiņas procesus, kā arī tajā ieviestie korekcijas koeficienti neatspoguļo fizikālo procesu norises būtību.

Pēdējais izstrādātais matemātiskais modelis aplūko nestacionārus siltuma un masas apmaiņas procesus. Tas ir aptverošāks, ar plašāku lietojumu kontaktaparātos ar un bez smidzināšanas. Šajā monogrāfijā ir detalizēti apskatīts sarežģītākais aktīva pildījuma kontaktaparāta matemātiskais modelis ar smidzināšanas šķidrums izmantošanu aparātā [2.25.]. Gadījumā, ja kontaktsiltummainis tiek izmantots kā kondensators, diferenciālvienādojumos jāizdara korekcijas. Matemātiskais modelis, kas

apraksta nestacionāros siltuma procesus kontaktsiltummaiņos ar dzesējamu, neapsmidzinātu pildījumu, sīkāk aprakstīts [2.14.].

Veidojot siltuma un masas apmaiņas procesu matemātisko modeli aktīva pildījuma kontaktaparātā, izdarīti vairāki pieņēmumi.

1. Siltuma un masas pārejas procesu uzskata par viendimensijas, pie kam koordinātu ass pozitīvais virziens sakrīt ar tvaika un gāzu plūsmas virzienu (skat. 2.29. attēlā).



2.29. att. Siltumnesēja temperatūras un spiediena sadalījums aparāta elementa aprēķina shēmā.

2. Pieņemts šķidruma tecēšanas plēvītes modelis aparātā.
3. Sakarā ar to, ka Difo, Sores un barodifūzijas efektu ietekme ir niecīga, tos neņem vērā.
4. Masas pāreju aparātā nosaka koncentrācijas difūzija (Fika likums).
5. Šķidruma plēvītes plūsma notiek tikai gravitācijas spēka ietekmē, uzskatot, ka berze starp šķidrumu un gāzi ir niecīga.
6. Šķidruma plēvītes plūsma ir lamināra.
7. Gāzes plūsma jāaplūko kā ideālas gāzes plūsma, kas veidojusies no sausas gāzes un ūdens tvaika maisījuma.

8. Pildījuma cauruļu slapināšana ir pilnīga, un siltuma pāreja norit caur šķidrums plēvēti.
 9. Spiediena maiņas aparātā salīdzinājumā ar siltumnesēju absolūto spiedienu ir niecīgas.
- Temperatūras gradients pildījuma caurules sienīņā vienāds nullei.

Šādi pieņēmumi būtiski vienkāršo vienādojumu sistēmu, kas apraksta siltuma un masas apmaiņu aparātā. Nosacījumi (1) un (10) ļauj siltumvadīšanas diferenciālvienādojumu pildījuma cauruļu sienīņā nestacionārā procesā aizstāt ar siltuma bilances diferenciālvienādojumu, ņemot vērā siltuma akumulāciju metālā, bet nosacījumi (1), (5) un (9) - izslēgt kustības daudzuma saglabāšanas impulsa diferenciālvienādojumu.

Tātad aparātā norisošo siltuma un masas apmaiņas procesu diferenciālvienādojumu sistēmu var iegūt, pamatojoties uz siltuma bilances vienādojumu pildījuma caurulēm, masas un enerģijas saglabāšanas vienādojumiem katram siltumnesējam:

- ūdenim pildījumā;
- smidzināšanas šķidrums;
- mitrajām gāzēm.

Minētajiem vienādojumiem jāpievieno izteiksme, kas nosaka gāzes mitruma satura izmaiņas likumsakarības aparātā. Balstoties uz iepriekš izklāstīto, aparātā notiekošo siltuma un masas apmaiņas procesu matemātisko modeli iespējams uzrakstīt ar diferenciālvienādojumu sistēmu:

$$\frac{1}{\omega_{\bar{u}}^p} \cdot \frac{\partial t_{\bar{u}}}{\partial \tau} - \frac{\partial t_{\bar{u}}}{\partial x} = \frac{\alpha_{\bar{u}} \cdot F_{\text{pil}}^{\text{ic}}}{H \cdot L_{\bar{u}} \cdot c_{\bar{u}}} \cdot (t_{\text{sien}} - t_{\bar{u}}); \quad (2.11.)$$

$$M_m \cdot c_m \cdot \frac{dt_{\text{sien}}}{d\tau} = \frac{\lambda_{\text{pl}}}{\delta_{\text{pl}}} F_{\text{pil}}^{\text{ar}} (t_{\text{tv.r}} - t_{\text{sien}}) - \alpha_{\bar{u}} \frac{d_{\text{ic}}}{d_{\text{ar}}} F_{\text{pil}}^{\text{ar}} (t_{\text{sien}} - t_{\bar{u}}); \quad (2.12.)$$

$$\frac{1}{\omega_{s_k}^p} \cdot \frac{\partial t_{s_k}}{\partial \tau} + \frac{\partial t_{s_k}}{\partial x} = \frac{F_{pl}}{H \cdot L_{s_k} \cdot c_{s_k}} \times \\ \times \left(\alpha_0 \cdot (t_g - t_{tv-r}) + \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \left(r + (c_{tv} - c_{s_k}) \cdot t_{tv-r} \right) \right) - \\ - \frac{\alpha_{\bar{u}} \cdot F_{pil}^{ar}}{H \cdot L_{s_k} \cdot c_{s_k}} \cdot (t_{sien} - t_{\bar{u}}); \quad (2.13.)$$

$$\frac{dL_{s_k}}{dx} = \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{pl}}{H}; \quad (2.14.)$$

$$\frac{1}{\omega_g^p} \cdot \frac{\partial L_g}{\partial \tau} + \frac{\partial L_g}{\partial x} = -\beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{pl}}{H}; \quad (2.15.)$$

$$\frac{1}{\omega_g^p} \cdot \frac{\partial t_g}{\partial \tau} + \frac{\partial t_g}{\partial x} = -\frac{F_{pl}}{H_g \cdot L_g \cdot c_g} \times \\ \times \left[\alpha_0 \cdot (t_g - t_{tv-r}) + \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot c_{tv} \cdot (t_{tv-r} - t_g) \right]; \quad (2.16.)$$

$$\frac{1}{\omega_{sg}^p} \cdot \frac{\partial d}{\partial \tau} + \frac{\partial d}{\partial x} = -\beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{pl}}{H \cdot L_{sg}}. \quad (2.17.)$$

Uzrakstītā diferenciāvienādojumu sistēma (2.11. ... 2.17.) jāpapildina ar robežnosacījumiem un sākuma nosacījumiem, kā arī saistvienādojumiem starp plūsmas parametriem un aparāta konstrukciju. Svarīgākie no tiem aplūkoti vēlāk (skat. 2.3.2.4. un 2.3.2.5. nodaļā).

Saplūdes tipa siltummainī notiekošo siltuma un masas apmaiņas procesu analīze priekšplānā izvirza dažas procesu īpatnības, kuras iespējamas aparāta sākuma zonā. Tās ir vairākas. Ja smidzināšanas šķidrums plēvītes virsmas temperatūra ir zemāka par rasas punkta temperatūru $t_{tv-r} < t_{rp}$, tad ūdens tvaiku parciālais spiediens gāzēs visa pildījuma augstumā

būs lielāks par ūdens tvaiku spiedienu virs šķidrums plēvītes $p_{tv} > p_{tv,r}$. Šajā gadījumā sausās un mitrās siltumpārejas virziens sakrīt un aparātā norit tvaiku kondensācijas process no gāzes plūsmas. Tādēļ svarīgi novērtēt parametrus uz kondensāta plēvītes virsmas p_{tv} un t_{tv} . Ja $t_{tv,r} > t_{tp}$, tad veidojas divas zonas - iztvaikošanas un kondensācijas. Iztvaikošanas zonā sausā un mitrā siltumpāreja virzītas pretēji, pie kam virzienu maina mitrā siltumpāreja, jo $p_{tv} < p_{tv,r}$. Vienādojumu sistēma (2.11. ... 2.17.) iepriekšminētās īpatnības ņem vērā ar parciālo spiedienu starpības bezdimensiju lielumu Π_D , kura vērtība ir pozitīva kondensācijas apstākļos, bet negatīva iztvaikošanas gadījumā un vienāda ar nulli sausās siltumapmaiņas gadījumā.

Ja diferenciālvienādojumu sistēmā (2.11. ... 2.17.) parciālos atvasinājumus laikā pielīdzina nullei, tad iegūstam vienādojumu sistēmu, kura apraksta stacionāru siltuma un masas apmaiņas procesu aparātā. Aktīva pildījuma kontaktaparātos intensīvas šķidrums plēvītes dzesēšanas dēļ parasti kondensācijas process novērojams visā aparātā. Šajā gadījumā vienādojuma labās puses varētu aizstāt ar empīriskiem vienādojumiem, kuri raksturo vienlaicīgi notiekošo sauso un mitro siltumpārnesi. Vienādojumu sistēma ir šāda:

$$\frac{dt_{\bar{u}}}{dx} = - \frac{\alpha_{\bar{u}} \cdot F_{pil}^{ar} \cdot \frac{d_{ie}}{d_{ar}}}{H \cdot L_{\bar{u}} \cdot c_{\bar{u}}} \cdot (t_{sien} - t_{\bar{u}}); \quad (2.18.)$$

$$\frac{\lambda_{pl}}{\delta_{pl}} \cdot (t_{tv,r} - t_{sien}) = \alpha_{\bar{u}} \cdot \frac{d_{ic}}{d_{ar}} \cdot (t_{sien} - t_{\bar{u}}); \quad (2.19.)$$

$$\frac{dt_{\text{šk}}}{dx} = \frac{F_{\text{pl}}}{H \cdot L_{\text{šk}} \cdot c_{\text{šk}}} \cdot [\alpha_0 \cdot (t_g - t_{\text{tv-r}}) - \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot c_{\text{tv}} \cdot (t_g - t_{\text{tv-r}}) - \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot (c_{\text{šk}} - c_{\text{tv}}) \cdot t_{\text{tv-r}} - \frac{\alpha_{\bar{u}} \cdot F_{\text{pil}}^{\text{ar}}}{H \cdot L_{\text{šk}} \cdot c_{\text{šk}}} \cdot (t_{\text{sien}} - t_{\bar{u}})]; \quad (2.20.)$$

$$\frac{dL_{\text{šk}}}{dx} = \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{\text{pl}}}{H}; \quad (2.21.)$$

$$\frac{dL_g}{dx} = -\beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{\text{pl}}}{H}; \quad (2.22.)$$

$$\frac{dt_g}{dx} = \frac{F_{\text{pl}}}{H \cdot L_g \cdot c_g} \cdot (\alpha_0 \cdot (t_g - t_{\text{tv-r}}) - \beta_0 \cdot \Pi_D \cdot (r + 2c_{\text{tv}} \cdot (t_g - t_{\text{tv-r}}))); \quad (2.23.)$$

$$\frac{dd}{dx} = -\beta_0 \cdot \Pi_D \cdot \frac{F_{\text{pl}}}{H \cdot L_{\text{s-g}}}, \quad (2.24.)$$

kur M_m - pildījuma caurules metāla masa;

$c_{\bar{u}}$, c_{tv} , c_g , c_m , c_k , $c_{\text{s-g}}$, $c_{\text{šk}}$ - īpatnējās masas siltumietilpības (attiecīgi) ūdenim, tvaikam, gāzei, metālam, tvaika kondensātam, sausai gāzei, smidzināšanas šķidrums;

H - pildījuma augstums;

$F_{\text{pil}}^{\text{ie}}$, $F_{\text{pil}}^{\text{ar}}$, F_{pl} - pildījuma caurules (attiecīgi) iekšējais un ārējais, un šķidruma plēvītes virsmas laukums;

d_{ie} , d_{ar} - pildījuma caurules (attiecīgi) iekšējais un ārējais diametrs;

δ_{pl} - šķidrums plēvītes biezums;

$L_{\bar{u}}$, L_k , L_g , L_{sg} , $L_{\check{s}k}$ - (attiecīgi) ūdens, kondensāta, mitro un sauso gāzu un šķidrums masas patēriņš;

α_0 , $\alpha_{\bar{u}}$ - siltuma atdeves koeficients (attiecīgi) no ūdens uz caurules iekšsienām un no gāzēm uz kondensāta plēvīti;

λ_{pl} - šķidrums plēvītes siltumvadītspējas koeficients;

$t_{\bar{u}}$, t_{sien} , t_{pl} , t_k , t_g , $t_{tv,r}$, t_{rp} - ūdens, sienīņu, plēvītes virsmas, kondensāta, gāzu, fāzu robežvirsmas, rasas punkta temperatūra;

r - tvaika veidošanās siltums;

β_0 - masas atdeves koeficients;

Π_D - parciālspliedienu bezdimensiāla attiecība;

τ - laiks;

$\omega_{\bar{u}}^p$, ω_k^p , ω_g^p , ω_{sg}^p - reducētie ūdens, kondensāta, sauso un mitro gāzu ātrumi;

P_{tv} , $P_{tv,r}$ - tvaika un fāzu robežvirsmas spiediens.

Sarežģītos siltumapmaiņas procesus aparātā raksturo ar siltumpārejas koeficientu.

Cauruļu kūļa iekšpusē cirkulējošam siltumnesējam, visbiežāk ūdenim, vienlaicīgi ar siltumatdevi no gāzēm un smidzināšanas jeb rasiņāšanas šķidrums notiek gāzēs esošo ūdens tvaiku kondensācijas siltuma atdeve.

Tvaiki kondensējas gan uz plēvītes virsmas, kura pārklāj pildījuma caurules, gan arī uz šķidrums plēvītes, kas veidojas starpcauruļu telpā. Ja gāzes plūsma piesārņota ar cietajām daļiņām, kondensācijas process var noritēt arī uz to virsmas. Viss iepriekš sacītais ļauj izskaidrot to, ka vienīgais atsevišķu aparātu siltumpārejas datu ieguves avots ir eksperiments.

2.3.2.4. Siltuma un masas apmaiņas eksperimentālie pētījumi

Siltumpārejas eksperimentālie pētījumi aktīva pildījuma kontaktsiltummainī veikti ar iekārtu, kas attēlota 2.28. attēlā [2.16.].

Eksperimentālajai iekārtai ir korpuss, kas izgatavots no nerūsējoša tērauda. Smidzināšanas sistēma sastāv no centrālās sprauslām. Aktīvais pildījums izveidots no 210 nerūsējoša tērauda caurulēm ar ārējo diametru 20 mm, iekšējo - 17 mm un garumu 1,24 m. Pildījuma augstums un platums ir attiecīgi 0,92 m un 0,54 m. Siltumapmaiņas virsmas lielums ir 16,4 m², bet gāzes plūsmas šķērsriezums pildījumā - 0,334 m².

Iekārtas eksperimentālie pētījumi veikti stacionāros režīmos. Siltumpārejas koeficients noteikts, izmantojot siltuma daudzumu (sekundāro enerģiju), kuru iegūst no gāzēm, lietojot vidējo logaritmisko siltumnesēju temperatūras starpību. Tādēļ tika mērītas gāzu sausā un mitrā termometra temperatūras aparāta ieplūdē un izplūdē, ūdens temperatūras pildījuma ievadā un izvadā, smidzināšanas šķidrums temperatūra pirms sprauslām. Gāzes caurplūdi pirms un pēc iekārtas noteica ar Pito caurulīti, bet ūdens patēriņu caur pildījumu un smidzināšanas šķidrums caurplūdi - ar BT-50 tipa caurplūdes mērītāju.

Režīmi un tos raksturojošo parametru vērtības izvēlēti, pamatojoties uz eksperimentu plānošanu. Iekārtas darbību pārbaudīja arī papildu režīmos, lai izvērtētu iegūtā vienādojuma rezultātu - siltumpārejas koeficienta vērtības sakrītību ar eksperimentāli iegūtajām vērtībām.

Iekārtas eksperimentālie pētījumi attiecināmi uz trīsfaktoru eksperimentu, kurā katrs faktors jāvērtē divos līmeņos: maksimālajā un minimālajā. Tādēļ eksperimenta plānošanas uzdevums šajā gadījumā ir 2^k veida, kur k = 1, 2, 3 un nepieciešamo mēģinājumu skaits ir 8. Bez tam, lai izvērtētu izmēģinājumu rezultātu atbilstību plāna centrā, veikti trīs pētījumi ar faktoru vidējām vērtībām (ja visu faktoru vērtības ir vidējā līmenī).

Faktori, kuri ietekmē iekārtas siltumapmaiņas procesus, ir šādi:

- dūmgāzu ātrums pildījuma mazākajā šķērsgriezumā ω_g ,
- ūdens ātrums pildījuma caurulēs ω_u ,

- smidzināšanas blīvums H_{ω} .

Faktoru maiņas aparātā ir atkarīgas no dūmgāzu caurplūdes V_g , ūdens caurplūdes gan caur pildījumu $G_{\bar{u}}$, gan smidzināšanas sistēmā $G_{\bar{sk}}$. Eksperimenta plāns - izmēģinājumu laikā realizējamās parametru vērtības, un tā rezultāti atainoti 2.4. tabulā.

2.4. tabula

Faktoru reālie lielumi.

Izmēģi nājuma N ^o	Pirmais faktors		Otrais faktors		Trešais faktors		Izmēģinā- juma rezultāts
	V_g , m ³ /s	ω_g , m/s	$G_{\bar{u}} \cdot 10^3$, m ³ /s	$\omega_{\bar{u}}$, m/s	$G_{\bar{sk}} \cdot 10^3$, m ³ /s	H_{ω} , kg/m ² ·s	
1	1,97	5,9	0,97	0,23	1,35	2,0	174
2	1,97	5,9	3,83	0,78	1,35	2,0	370
3	1,97	5,9	0,97	0,23	4,03	6,0	215
4	1,97	5,9	3,83	0,78	4,03	6,0	443
5	0,49	1,48	0,97	0,23	1,35	2,0	162
6	0,49	1,48	3,83	0,78	1,35	2,0	222
7	0,49	1,48	0,97	0,23	4,03	6,0	170
8	0,49	1,48	3,83	0,78	4,03	6,0	321
9	1,23	3,7	2,4	0,5	2,69	4,0	260
10	1,23	3,7	2,4	0,5	2,69	4,0	285
11	1,23	3,7	2,4	0,5	2,69	4,0	297

Eksperimenta datu apstrādei izmantota gāzes caurplūdes vidējā aritmētiskā vērtība. Savukārt smidzināšanas blīvumu attiecina pret aparāta šķērsriezuma laukumu virs aktīvā pildījuma.

Plānojot eksperimentu un apstrādājot tā rezultātus, pieņemta hipotēze par to, ka siltumpārejas koeficienta atkarībai no pētāmajiem faktoriem ir lineārs raksturs. Šādā gadījumā, ņemot vērā faktoru mijiedarbības divkāršos un trīskāršos efektus, meklējamo sakarību iespējams uzrakstīt lineāra regresijas vienādojuma formā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 + b_{123}x_1x_2x_3, \quad (2.25.)$$

kur y - eksperimenta rezultāts;

b_0, b_1, b_2, b_3 - regresijas vienādojuma koeficienti;

b_{12}, b_{13}, b_{23} - faktoru dubultās mijiedarbības koeficienti;

b_{123} - faktoru trīskāršās mijiedarbības koeficients;

x_1, x_2, x_3 - pirmais, otrais un trešais faktors bezdimensiju veidā.

Koeficienti vienādojumā (2.25.) aprēķināti, izmantojot pilna trīs faktoru eksperimenta plānošanas paplašināto matricu. Vienādojuma (2.25.) regresijas analīze parādīja, ka, vērtējot koeficientus, šajā gadījumā jāņem vērā b_0, b_1 un b_2 . Koeficientu ietekme izvērtēta, izmantojot Stjudenta kritēriju t_p . No regresijas vienādojumā neizmantotajiem koeficientiem nākošie vērtīgākie ir b_3 un b_{12} . Sakritības kļūda aprēķināta, izmantojot trīs izmēģinājumus plāna centrā, un tās lielums ir $S_b = 18,9$. Regresijas vienādojums (2.25.), ņemot vērā konkrētās koeficientu vērtības, ir šāds:

$$y = 259,6 + 40,8x_1 + 79,4x_2. \quad (2.26.)$$

Pārbaudot vienādojumu ar Fišera kritēriju, iespējams konstatēt, ka izteiksme (2.26.) adekvāti apraksta eksperimentu.

Faktoru reālo lielumu savstarpējo atkarību matemātiski var aprakstīt šādi:

$$k = 46,9 + 18,5\omega_g + 288,7\omega_a, \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (2.27.)$$

Lai izvērtētu vienādojuma (2.27.) precizitāti, nepieciešams aprēķināt k noteikšanas kļūdu eksperimentos. Siltumpārejas koeficients, kā arī daļa citu aprēķiniem nepieciešamo lielumu iegūti netiešo mērījumu rezultātā. Šo lielumu sistemātiskās kļūdas nosaka ar tieši izmērāmu lielumu sistemātisko kļūdu palīdzību. To pakāpeniskā izskaitļošana rāda, ka k noteikšanas sistemātiskā kļūda ir $\Delta k = 7,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ [2.13.]. Atkārtotie mērījumi plāna centrā rāda, ka siltumpārejas koeficienta vērtību novirzes ir lielākas par sistemātisko kļūdu. Tas liecina par gadījuma kļūdu mērījumos.

Gadījumu kļūdu varbūtējās vērtības noteiktas plāna centram no trīs mērījumiem $m = 3$: siltumpārejas koeficienta matemātiskā cerība ir $k = 280,7$; vidējā kvadrātiskā kļūda vienam atsevišķam rezultātam ir vienāda ar sakritības kļūdu $S_b = 18,9$. Ticamības intervālu, ja ticamības varbūtība ir vienāda ar 0,95, ņemot vērā mērījumu vidējo aritmētisko un sistemātisko kļūdu, nosaka ar vienādojumu

$$t_p \cdot \frac{S_n}{\sqrt{m}} + \Delta k = 54,4. \quad (2.28.)$$

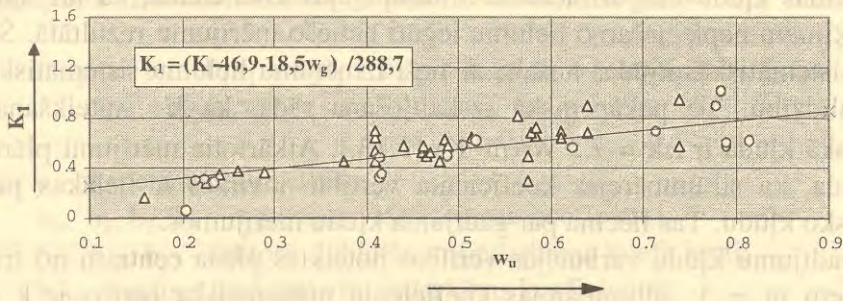
Šeit Stjudenta koeficienta vērtība ir $t_p = 4,3$ un relatīvā kļūda plāna centrā ir 19%.

Iegūto vienādojumu (2.27.) var izmantot aprēķinos, ja parametri aparātā mainās šādā diapazonā:

- gāzes plūsmas ātrums no 1,3 līdz 6,5 m/s;
- ūdens ātrums caurulēs no 0,2 līdz 0,8 m/s;
- smidzināšanas blīvums no 1,8 līdz 6,1 kg/(m² · s).

Grafiskais regresijas vienādojuma salīdzinājums ar eksperimenta datiem atspoguļots 2.30.attēlā. Tajā parādīti arī eksperimentālo pētījumu

dati citās pusrūpnieciskās iekārtās, kurās nedaudz atšķirās parametru diapazoni: ūdens ātrumu apakšējā robeža - 0,16 m/s, smidzināšanas blīvuma - 0,13 kg/(m². s), mitruma saturs - 0,099 kg/kg s.g., bet dūmgāzu ātruma augšējā robeža - 8,0 m/s.



2.30.att. Regresijas vienādojuma salīdzināšana ar aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa izmēģinājumu eksperimentālajiem datiem:

- - eksperimentālie dati - plānošanas rezultāti;
- Δ - citu iekārtu eksperimentālie pētījumi [2.42., 2.43.].

Kā redzams 2.30. attēlā, datu izkliede ir minimāla, ja ūdens ātrumi ir mazāki par 0,4 m/s. Lielāku datu izkliedi, ūdens ātrumiem pieaugot, varētu skaidrot ar kondensācijas apstākļu atšķirībām uz pildījuma virsmas: ūdens ātrumi palielinās \Rightarrow samazinās virsmas temperatūra \Rightarrow uzlabojas kondensācijas apstākļi. Šajā gadījumā kļūst būtiskāka tvaika - gāzu maisījuma ātruma un mitruma saturs ietekme uz siltuma un masas apmaiņas procesiem.

Parasti siltumtehniskā eksperimenta rezultātus apkopo kriteriālā vienādojumā. Tādēļ, lai iegūtos pētījuma datus apvienotu līdzības skaitļos, nepieciešams no kopējās termiskās pretestības siltumpārejai no gāzes maisījuma ūdenim pildījuma caurulēs, kuru nosaka eksperimentāli, atskaitīt divas termiskās pretestības: siltumatdevei no caurules sienas ūdenim un caurules sienai. Siltumatdeve šķidrums plūsmas cauruļu iekšpusē ir plaši izpētīta un to iespējams aprēķināt ar literatūrā sastopamo vienādojumu [2.17.]. Siltumatdeve ir atkarīga gan no plūsmas režīma, gan no

temperatūras un ātruma. Hidrodinamiskās un termiskās stabilizācijas iecirknī siltumatdeve, kuru nosaka ar Nuselta līdzības skaitli Nu_{ii} , līdz ar robežslāņu veidošanos samazinās un tiecas uz Nu_{ii} robežvērtību, kuru iegūst, robežslāņa biezumam stabilizējoties. Reynoldsa līdzības skaitļa vērtības ūdenim pildījumā Re_{ii} eksperimentālajā iekārtā mainās robežās 5000 ... 15000, kuras atbilst plūsmas pārejas un turbulentajam režīmam.

Hidrodinamiskās un termiskās stabilizācijas iecirkņa garumus izvērtē ar sakarību, kura piedāvāta [2.18.]. Aprēķina rezultāti liecina par to, ka caurulē ar garumu $l = 1,24$ m un diametru $d_{ie} = 0,017$ m gandrīz uz visas siltumapmaiņas virsmas notiek hidrodinamisko un termisko procesu stabilizācija.

Šādos apstākļos siltumatdeves koeficientu no caurules sienas šķidrums, kas cirkulē pa tām, rekomendē [2.17.] aprēķināt ar vienādojumu

$$Nu_{ii} = 0,012 \cdot (Re_{ii}^{0,67} - 280) \cdot Pr_{ii}^{0,4} \cdot \left[1 + \left(\frac{d_{ie}}{l} \right)^{2/3} \right]. \quad (2.29.)$$

Līdzības skaitļus nosaka ūdenim pildījumā vidējā temperatūrā.

Vienādojums (2.29.), kā arī zināmā pildījuma cauruļu sienas termiskā pretestība $\delta_{sien}/\lambda_{sien}$, dod iespēju kontaktsiltummaini ar aktīvu pildījumu vidējās parametru vērtībās aprēķināt nosacīto siltumpārejas koeficientu no tvaika-gāzu plūsmas uz ārējo caurules sienīgu [2.19.]. Šo lielumu iespējams apkopot ar Kirpičova līdzības skaitli

$$Ki = \frac{\alpha_n \cdot d_{ar}}{\lambda_g}. \quad (2.30.)$$

Šoreiz α_n lietots netradicionāli. Tas ir nosacītais siltumpārejas koeficients no gāzes maisījuma uz sienīgu un atšķiras no vispārpieņemtā siltumpārejas koeficienta jēdziena. Nosacītais siltumpārejas koeficients šajā gadījumā

raksturo lielumu, kas sevī ietver vienlaicīgi notiekošus masas un enerģijas pārvades procesus gāzveida fāzē un siltumapmaiņu šķidrā fāzē.

Gāzu plūsmas režīmu aparātā izvērtē ar Reynoldsa līdzības skaitli Re_g .

Siltumpārnese atkarību no vides plūsmas režīmiem iespējams raksturot ar vienādojumu

$$Ki = C \cdot Re_g^m \cdot Re_u^n. \quad (2.31.)$$

Logaritmējot izteiksmi (2.31.), iegūst regresijas vienādojumu, kas saista Kirpičova skaitļa logaritmu ar faktoru logaritmiem,

$$\lg Ki = \lg C + m \lg Re_g + n \lg Re_u. \quad (2.32.)$$

Izmantojot jaunus mainīgos - faktoru logaritmus, veika eksperimenta pilna plānošana un tā rezultātu apstrāde. Jāatzīmē, ka plāna centrs šajā gadījumā atbilda vidējām faktoru logaritmu vērtībām un tādējādi ir novirzīts attiecībā pret pašu faktoru vērtībām. Tādēļ bija nepieciešami trīs papildu mērījumi jaunā plāna centrā.

Pētījumu datu apstrādes rezultātā iegūts regresijas vienādojums

$$\lg Ki = -0,699 + 0,17 \cdot \lg Re_g + 0,59 \cdot \lg Re_u, \quad (2.33.)$$

kuru iespējams uzrakstīt kā

$$Ki = 0,2 \cdot Re_g^{0,17} \cdot Re_u^{0,59}. \quad (2.34.)$$

Iegūto vienādojumu (2.34.) var izmantot aprēķinos, ja Reynoldsa līdzības skaitļi aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņā mainās šādā diapazonā:

- $Re_g = 1400 \dots 63000$;
- $Re_u = 5700 \dots 15700$;

$$\bullet \quad \text{Re}_{\text{šk}} = 120 \dots 370.$$

Siltuma un masas apmaiņas procesu no tvaika un gāzu maisījuma uz pildījuma caurules sienas norise parādīta 2.29. attēlā.

No tvaika un gāzes maisījuma kondensāta plēvītes virsmi nodotais siltuma daudzums summējas no diviem siltumapmaiņas komponentiem - konvektīvās siltumatdeves un tvaika kondensācijas no maisījuma:

$$q = \alpha_0(t_g - t_{\text{tvr}}) + \beta_0 \Delta h \Pi_D, \text{ W/m}^2. \quad (2.35.)$$

Tvaika entalpiju starpību nosaka, izmantojot iztvaikošanas un tvaika pārkarsēšanas siltumu

$$\Delta h = r + c_{\text{tv}}(t_g - t_{\text{tvr}}), \text{ J/kg}. \quad (2.36.)$$

Masas pārejas intensitāti nosaka ne tikai masas atdeves koeficients, bet arī procesa virzošais spēks. Kā dzinējspēku izmanto dažādus potenciālus:

- komponentu masas vai molārās koncentrācijas,
- komponentu parciālos spiedienus,
- mitruma saturu gāzēs.

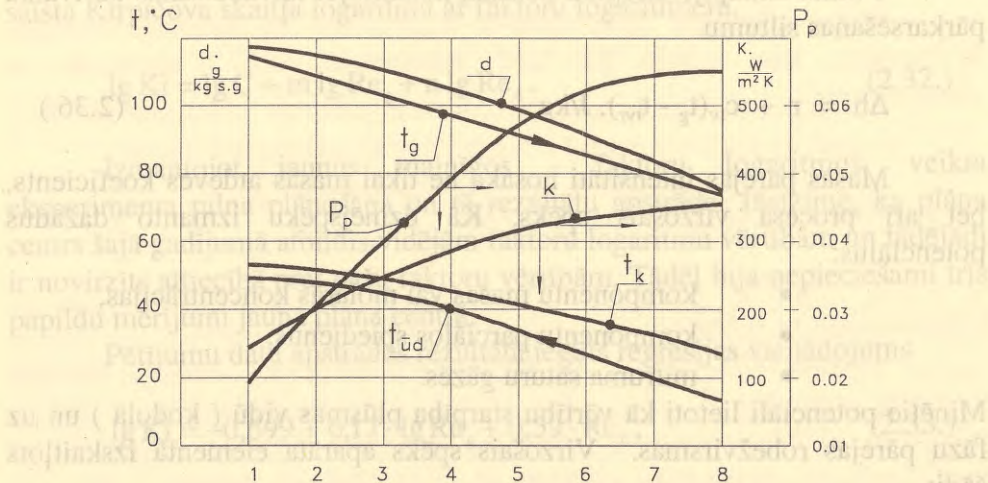
Minētie potenciāli lietoti kā vērtību starpība plūsmas vidū (kodolā) un uz fāzu pārejas robežvirsmas. Virzošais spēks aparāta elementā izskaitļots šādi:

$$\Pi_D = \frac{R_{\text{tv}}}{R_{\text{s.g}}} \cdot \left(\frac{d_{\text{tv}}}{1 + d_g \cdot \frac{R_{\text{tv}}}{R_{\text{s.g}}}} - \frac{d_{\text{šk.r}}}{1 + d_{\text{šk.r}} \cdot \frac{R_{\text{tv}}}{R_{\text{s.g}}}} \right), \quad (2.37.)$$

kur R_{tv} , $R_{\text{s.g}}$ - (attiecīgi) tvaika un sausu gāzu konstante;

d_{tv} , $d_{šk.r}$, d_g - (attiecīgi) tvaika, fāzu robežvirsmas un gāzu mitruma saturs.

Mitruma satura noteikšanai izmantotas empīriskas sakarības, kuras saista $d_{šk.r}$ ar tvaika parciālo spiedienu uz piesātinājuma līnijas, bet pēdējā, savukārt, - ar temperatūru. Siltuma un masas apmaiņas lokālo parametru aprēķina inženiermetodikas aprobācija pēc algoritma [2.16.] īstenota kontaktsiltummainim, kas novietots pie katla DE-16/14, kurš izmanto dabas gāzi, Rīgas piena kombināta katlu mājā [2.21.]. Aprēķinu rezultāti doti 2.31. attēlā.



2.31. att. Parametru izmaiņa pa kontaktaparāta augstumu ($n = 1 \dots 8$ aprēķinu zonas numurs).

Datoraprēķinu rezultātu analīze rāda, ka sakarā ar zemo ūdens temperatūru kontaktierīces ieejā, kondensācija notiek pa visu siltuma apmaiņas virsmu. Tās intensitāte ir atšķirīga: sākuma iecirknī process ir vāji izteikts un palielinās cauruļu virsmas apakšējā daļā. Par to liecina gāzu mitruma satura d un masas pārejas virzošā spēka Π_D izmaiņas. Kā zināms,

siltumatdeves koeficients cauruļu kūļos pieaug no pirmās līdz piektajai rindai, bet pārējās paliek nemainīgs.

Daudzos gadījumos masas pāreju var aprakstīt ar vienādojumiem, kas pēc formas analogi siltumpārejas vienādojumiem. Ņemot vērā analogiju, kura pastāv starp siltuma un masas apmaiņas procesiem, līdzīgā veidā mainīsies arī masas atdeves koeficients β_0 . Ūdens $t_{\bar{u}}$, gāzes t_g un kondensāta t_k temperatūras mainās monotoni. Temperatūru t_g un t_k izmaiņu raksturs atbilst tiešās plūsmas shēmai un ir atšķirīgs temperatūrām t_g un $t_{\bar{u}}$ (jauktā plūsmas shēma). Siltumpārejas koeficientam k , kas ietver sevī ne tikai siltuma, bet arī masas pāreju, tika novērota vērtības palielināšanās virzienā no pirmajām uz tālākajām cauruļu rindām. Jāatzīmē, ka pēdējās rindās siltumpārejas koeficienta k vērtība stabilizējas. To veicina koeficientu α_0 , β_0 un Π_D vērtību izmaiņas raksturs, kā arī tas apstākļi, ka palielinās kondensāta daudzums uz sildvirsmas, pieaug tā plēvītes biezums. Tā rezultātā palielinās aplūkojamā iecirkņa termiskā pretestība.

Ūdenim aktīvā pildījuma caurulēs nodoto tvaika un gāzu maisījuma siltuma daudzumu aprēķins:

$$q = \frac{L_{\bar{u}} \cdot c_{\bar{u}} \cdot (t_{\bar{u}}'' - t_{\bar{u}}')}{F_{\text{pil}}^{\text{ar}}}, \quad \frac{W}{\text{m}^2}. \quad (2.38.)$$

Šeit ūdens temperatūras starpība noteikta kā šī parametra lielumu starpība attiecīgi pildījuma izvadā un ievadā.

Siltumatdeves koeficientu α_0 var noteikt ar speciālistu plaši lietoto vienādojumu [2.22]:

$$\text{Nu}_0 = 0,41 \cdot \text{Re}_g^{0,6} \cdot \text{Pr}_g^{0,33} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_g}{\text{Pr}_{\text{sien}}} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_s \cdot \varepsilon_l. \quad (2.39.)$$

Šajā vienādojumā izmantoto lielumu vērtību analīze rāda, ka Prandtla līdzības skaitļu attiecība pakāpē 0,25 dotajos apstākļos mainās maz, ir tuva vienam, tādēļ tālākajos aprēķinos formulā (2.39.) nav vērā ņemama.

Viens no variantiem, kā noteikt masas atdeves koeficientu β_0 gadījumā, kad siltumapmaiņas procesu papildina kondensācija no tvaika un gāzu maisījuma plūsmas ar nelielu tvaika saturu, ir izmantots līdzīgā eksperimentā [2.23.] iegūto vienādojumu Šervuda līdzības skaitļa Sh noteikšanai:

$$Sh = 0,45 \cdot Re_g^n \cdot \Pi_D^{-0,33} \cdot \epsilon_g^{-0,65}, \quad (2.40.)$$

kur $n = 0,5$; ja $\epsilon_g = 0 \dots 0,6$;

$n = 0,65$; ja $\epsilon_g = 0,6 \dots 1,0$.

Savukārt Sh un β_0 saistību izsaka izteiksme

$$Sh = \frac{\beta_0 \cdot d_0}{\delta_{H_2O}}. \quad (2.40a.)$$

Kondensāta un šķidruma plēvītes biezumu nosaka ar vienādojumu no [2.24.]:

$$\delta_{pl} = 1,14 \cdot \sqrt[3]{Re_{\dot{s}k} \cdot \frac{v_{\dot{s}k}^2}{g}}, \text{ m.} \quad (2.41.)$$

Tvaikam kondensējoties no tvaika un gāzu maisījuma, šķidruma plēvīte, tekot pa pildījuma virsmu, kļūst biežāka. Šo apstākli ņem vērā, rēķinot Reynoldsa līdzības skaitli

$$Re_{\dot{s}k} = \frac{(H_{\omega} + \Delta d \omega_g \cdot S_g) \cdot d_c}{v_{\dot{s}k} \cdot \rho_{\dot{s}k}}. \quad (2.42.)$$

Šeit Δd atspoguļo tvaika un gāzu maisījuma mitruma satura izmaiņas aparātā.

Siltuma daudzumu, kuru nodod gāzes sildvirsmas sienīgai, iespējams aprēķināt ar izteiksmi

$$q = \alpha_n \cdot (t_g - t_{\text{sien}}) \cdot \frac{W}{m^2} \quad (2.43.)$$

Kopīgi risinot vienādojumus (2.35.), (2.37.) un (2.43.), iespējams iegūt izteiksmi, lai atrastu nosacīto siltumpārejas koeficientu no gāzes maisījuma uz pildījuma cauruļu sienīgu. Šī izteiksme jāuzskata par kontaktsiltummaiņas notiekošo siltuma un masas pārejas procesu vispārējā gadījuma konkretizētu formulējumu.

$$\alpha_n = \frac{1}{\frac{t_g - t_{\text{tvr}}}{\alpha_0 \cdot (t_g - t_{\text{tvr}}) + \beta_0 \cdot \Delta h \cdot \Pi_D} + \frac{\delta_{\text{pl}}}{\lambda_{\text{pl}}}}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.44.)$$

Aktīva pildījuma kontaktpaparātu rašanās pirmsākumos formulas (2.44.) izmantošanu sarežģīja daudzo nezināmo skaits, kuru aprēķina iespējas un atšifrēšana noritēja siltummaiņu darbības izpētes procesa laikā. Astoņdesmito gadu sākumā aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu eksperimentālo datu apstrādes rezultātā tika atrasts empīrisks vienādojums siltumatdeves koeficienta no gāzes maisījuma uz cauruļu sienīgu noteikšanai [2.15]:

$$\alpha_n = (50 \dots 100) \cdot \omega_g^{0,8} \cdot \omega_u^{0,25}, \frac{W}{m^2 \cdot K} \quad (2.44a.)$$

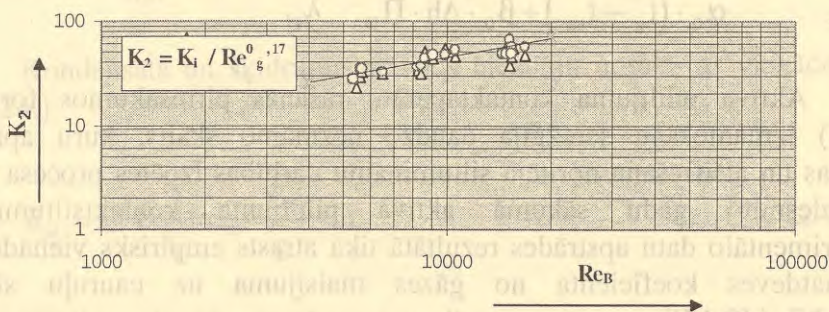
Šī formula jāuzskata par kvalitatīvu siltuma un masas apmaiņas procesu vērtējumu. Sakarā ar to, ka koeficienta vērtība var atšķirties divas reizes, un tas, savukārt, izraisa nekorektu sildvirsmas un aparāta

konstrukcijas izvēli, vienādojumu (2.44a) nedrīkst lietot ne konstruktīvajā, ne pārbaudes aprēķinā.

Koeficientu siltumpārejai no mitrām gāzēm uz ūdeni pildījuma caurulēs aprēķina ar vienādojumu (2.27.). Šī koeficienta saistību ar aparāta pildījuma zonas atsevišķām termiskajām pretestībām var uzrakstīt šādi:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_n} + \frac{\delta_{\text{siens}}}{\lambda_{\text{siens}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{ū}}}}, \frac{W}{m^2 \cdot K}. \quad (2.45.)$$

Eksperimentālie dati tika izmantoti, lai ar iepriekšaplūkoto aprēķina formulu palīdzību noteiktu siltumpārejas koeficienta vērtības. Grafiskais regresijas vienādojuma (2.34.) salīdzinājums ar eksperimenta datiem un aprēķinu rezultātiem, kuri veikti, izmantojot (2.39.), (2.40.) un (2.44.) vienādojumus, atspoguļots 2.32.attēlā.



2.32.att. Kriteriālā regresijas vienādojuma salīdzināšana ar aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa izmēģinājumu eksperimentālajiem datiem un aprēķinu rezultātiem:

○ - eksperimentālie dati - plānošanas rezultāti;

Δ - aprēķinu rezultāti, izmantojot vienādojumus (2.29), (2.30.), (2.34) un eksperimentālos datus.

Kā redzams no 2.32. attēla, vērojama laba eksperimentālo datu un regresijas vienādojuma (2.34.) korelācija. Aprēķiniem var arī izmantot "sausās" siltumatdeves, masas pārejas, termiskās pretestības fāzu pārejai un smidzināšanas šķidrums plēvītei vienādojumus.

Masas pārejas procesu analīze un pētījumi kontaktaparātos ar apsmidzināmu pildījumu detalizētāk parādīti [2.25.], kur dots masas šķērsplūsmas blīvuma vērtējums. Tas aplūkots aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi uz gāzveida fāzes un kondensāta robežvirsmas. Lai noskaidrotu šķērsplūsmas ietekmi uz siltumatdevi, tika noteikta caurlaides faktora b vērtība, kura mainījās no 0,095 līdz 0,118. Jāatzīmē, ka pie $b \leq 0,1$ siltumatdeve praktiski nav atkarīga no vielas šķērsplūsmas. Šis pats rezultāts iegūts, aprēķinot masas apmaiņas relatīvo intensitātes izmaiņas lielumu ar vai bez vielas šķērsplūsmas ψ . Aprēķini rāda, ka lielums ψ ir tuvs vienam. Tas liecina, ka vielas šķērsplūsma ir neliela un neizkropļo plūsmas hidrodinamiku.

Tas apstiprina iepriekš izteikto pieņēmumu, ka pastāv analogija starp siltuma un masas apmaiņu kontaktaparātā. Šajā gadījumā Lūisa līdzības skaitlis aptuveni vienāds ar vienu ($Le \sim 1$).

Tātad kontaktsiltummaiņu - kondensatoru siltuma un masas apmaiņas procesu aprēķinos izmantot vienādojumu

$$\frac{\alpha_0}{\beta_0} = c_g \quad (2.46.)$$

ir korekti.

Gadījumos, kad drīkst lietot vienādojumu (2.46.), siltuma un masas apmaiņas procesu aprēķinos pietiek ar viena koeficienta α_0 vai β_0 noteikšanu. Siltuma un masas pārejas analogija apstiprinājusies gan saplūdes tipa ūdens sildītājos [2.26.], gan gaisa kondicionēšanas sistēmās [2.27.] un arī aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņos [2.20.].

Gadījumos, kad masas šķērsplūsma ir būtiska, vienādojumu (2.46.) izmantot nedrīkst.

Siltuma un masas apmaiņas procesu aprēķinos svarīga ir arī raksturīgo ģeometrisko parametru un plūsmas raksturojumu izvēle. Šos parametrus tajos drīkst izmantot tikai tādā diapazonā, kādā tie lietoti formulu iegūšanai izmantoto eksperimentu datu apstrādē. Ja raksturlielumu vērtības ir ārpus šī diapazona, tad jāveic eksperiments un tā datu apstrāde, izmantojot šeit izklāstīto metodiku.

Papildus būtu jāatceras, ka:

1. siltumpārejas koeficienta empīriskais vienādojums (2.27.) ir lietojams tikai tad, ja gāzu ātrums ω_g noteikts pildījuma šaurākajā vietā;
2. aprēķinos jāizmanto vidējā logaritmiskā temperatūru starpība.

Siltumatdeves koeficientu no caurules sienīgas ūdenim, kas cirkulē pa pildījumu, nenostabilizēta dinamiska un siltuma robežslāņa gadījumā nosaka ar vienādojumu (2.29.). Ūdenim līdzības skaitļus atrod, izmantojot vidējās temperatūras vērtības, bet par raksturīgo izmēru izvēlēts caurules iekšējais diametrs d_i .

Izteiksme (2.34.) der Kirpičova līdzības skaitļa noteikšanai, no kura pēc tam aprēķina nosacīto siltumpārejas koeficientu α_n no tvaika-gāzes plūsmas uz pildījuma caurules ārējo sienīgu. Raksturīgie ātrumi gāzēm ω_g noteikti pildījuma šaurākajā vietā, bet ūdenim ω_n - cauruļu iekšpusē. Par raksturīgo temperatūru pieņemta tvaika-gāzu maisījuma vidējā temperatūra plūsmas kodolā.

Sausās siltumapmaiņas koeficientu α_o kūlim ar rombisko cauruļu izvietojumu aprēķina ar izteiksmi (2.39.). Plūsmas raksturojumus nosaka tvaika un gāzu maisījuma vidējā temperatūrā. Gāzes ātrumu ω_g , kuru izmanto Reinoldsa līdzības skaitļa Re_g aprēķinam, nosaka pildījuma šaurākajā vietā. Par raksturīgo ģeometrisko izmēru izvēlēts pildījuma caurules ārējais diametrs d_{ar} . Zinot cauruļu soļus vertikāli s_1 un horizontāli s_2 , labojuma koeficienti ir šādi:

$$\varepsilon_1 = 1, \quad \varepsilon_s = \left(\frac{s_1}{s_2} \right)^{0.17}.$$

Šervuda līdzības skaitli un masas atdeves koeficientu nosaka ar vienādojumu (2.40.), (2.40a.) un analogijas gadījumā izmantojot (2.46.). Nepieciešamos lielumus izskaitļo tvaika un gāzes maisījuma plūsmas vidējā temperatūrā. Gāzes plūsmas ātrums šeit ņemts pirms attiecīgās cauruļu rindas. Nekondensējošos gāzu tilpuma vienība tvaika-gāzes maisījumā aprēķināta kā

$$\varepsilon_g = 1 - \frac{d}{d + 0,746}. \quad (2.47.)$$

Šķidrums plēves parametrus nosaka ar formulām (2.41.) un (2.42.), kurās izmanto temperatūras vērtību uz fāzu robežvirsmas $t_{\text{šķr.}}$. Raksturīgais izmērs šeit ir pildījuma ekvivalentais diametrs

$$d_e = \frac{4 \cdot V_{\text{br}}}{F_{\text{pil}}^{\text{ār}}}, \text{ m.} \quad (2.48.)$$

Pildījuma brīvā tilpuma izskaitļošanai lieto izteiksmi

$$V_{\text{br}} = a \cdot l \cdot H - n \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ār}}^2}{H} \cdot l, \text{ m}^3. \quad (2.49.)$$

Jāatzīmē, ka vienādojums (2.41.) domāts tādas šķidrums plēves biezuma aprēķināšanai, kura tek pa horizontāli novietota cilindra virsmu. Citiem apstākļiem analogiskas formulas var atrast [2.24.].

2.3.2.5. Siltuma un masas apmaiņas modeļa adekvātuma pārbaude

Lai pārbaudītu iegūto empīrisko sakarību siltumpārejas koeficientu aprēķināšanai un piedāvātā matemātiskā modeļa adekvātumu, dažādos laikos tika veikti siltuma un masas apmaiņas eksperimentālie pētījumi aktīva pildījuma kontaktaparātos:

- ar smidzināšanu - ZRA "Tehugļerod" (Jaroslavļa);
- bez smidzināšanas - Rīgas piena kombināta katlu mājā.

Siltumpārejas no piesārņotā tvaika-gāzu plūsmas uz ūdeni eksperimentālo pētījumu rezultāti, kas iegūti pusrūpnieciskā aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi (ar smidzināšanu), aplūkoti [2.28.,2.29.].

Ja gāzu plūsma ir piesārņota ar cietām daļiņām, siltuma un masas pārejas procesā parādās specifiska īpatnība. Tā ir saistīta ar iespēju kondensēt tvaikus uz virsmas un tilpumā. Tilpumiskā kondensācija ir būtiska gadījumos, ja tiek īstenota tvaika-gāzu plūsmas kompleksā apstrāde: dzesēšana un attīrīšana.

Lai novērtētu iegūto rezultātu ticamību, veikta to salīdzināšana ar citu autoru rezultātiem un iegūta apmierinoša sakritība [2.30.].

2.5.tabula

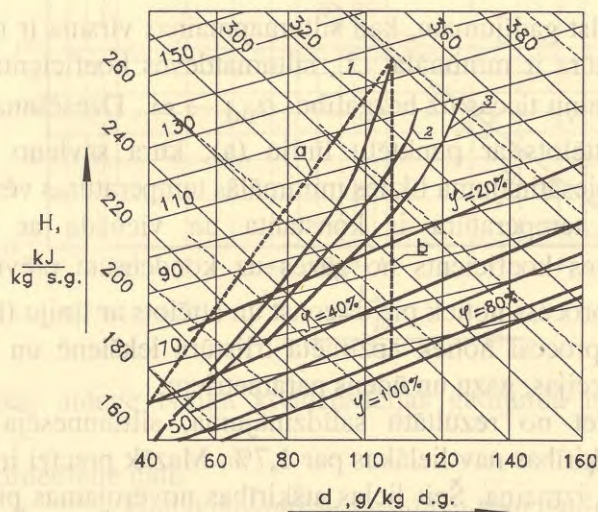
Kontaktsiltummaiņu datoraprēķinu un eksperimentu rezultātu salīdzinājums.

Režīma N ^o	Datu avots	t_g' , °C	t_u' , °C	d' , kg/kg s.g	t_g'' , °C	t_u'' , °C	d'' , kg/kg s.g
1	Aprēķins	136	14	104	67,1	48	57,4
2	Aprēķins	120	10	114	52,9	37	44,1
3	Aprēķins	120	14	122	70,4	51	74,3
1	Eksperiments	136	15	104	68	47	67
2	Eksperiments	120	10	114	53	37	50
3	Eksperiments	120	12	122	71	51	80

Piedāvātā matemātiskā modeļa eksperimentālie un analītiskie pētījumi, lai novērtētu tā adekvātumu, tika veikti kontaktsiltummainim, kurš uzstādīts Rīgas piena kombināta katlu mājā aiz tvaika katliem DE 16/14.

Triju režīmu aprēķina dati un to eksperimentālās pārbaudes rezultāti parādīti 2.5. tabulā.

Siltuma un masas apmaiņas procesi, kuri notiek aktīva pildījuma kontaktsiltummainī, grafiski atspoguļoti $H-d$ diagrammā 2.33. attēlā. Šajā gadījumā izmantoti 2.5. tabulā dotie parametri.



2.33. att. Siltuma un masas apmaiņas procesi aktīva pildījuma kontaktsiltummainī (līkņu numerācija atbilst 2.5.tabulā dotajiem eksperimentālajiem režīmiem).

Kā izriet no šī zīmējuma, mitruma kondensācija sākas no pirmajām rindām un novērojama visā siltumapmaiņas virsmas augstumā. Nepieciešams atzīmēt, ka piesātinājuma stāvoklis novērojams pie cauruļu virsmas, uz kuras nosēžas kondensāts. Plūsmas vidū gāzes ir nepiesātinātas un tādā stāvoklī paliek līdz pat kontaktsiltummaiņa izvadam. Ja gāzes

stāvokļu izmaiņu liknei kontaktaparāta ievadā novelk pieskari, tās krustpunkts ar piesātinājuma līniju atbilst visaugstākajai virsmas temperatūrai. Pieskares, kas novilkta citos liknes punktos, tādā pašā veidā ļauj noteikt kondensāta plēvītes temperatūru, kura ir nedaudz augstāka par siltumapmaiņas virsmas temperatūru. Kondensāta temperatūru, kā arī siltumapmaiņas virsmas aptuveno temperatūru nosaka ar pieskari tajā procesa punktā, kurš atbilst parametriem aparāta izvadā.

Var izdalīt kondensatora darba divus robežrežīmus:

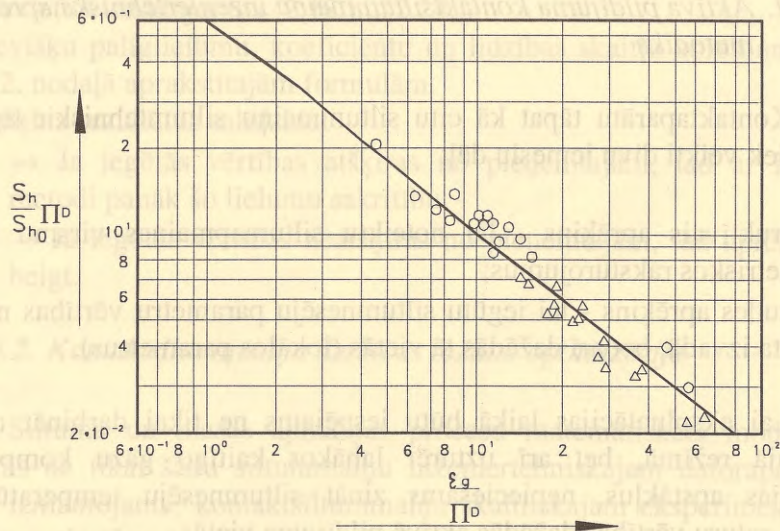
1. Pirmais atbilst gadījumam, kad siltumapmaiņas virsma ir izotermiska un tās temperatūra ir minimāla, t.i., siltumatdeves koeficients no ūdens uz caurules sienīņu tiecas uz bezgalību $\alpha_{\text{ūd}} \rightarrow \infty$. Dzesēšanas process šajā gadījumā attēlots ar punktētu līniju (a), kura savieno gāzu sākuma stāvokli ar piesātinājuma līknes minimālās temperatūras vērtību.
2. Ja virsmas temperatūra ir konstanta un vienāda ar rasas punktu (siltumatdeves koeficients no gāzes uz kondensāta plēvīti $\alpha_{\text{O}} \rightarrow \infty$), dzesēšanas process notiek pie $d = \text{const}$ un attēlots ar līniju (b).

Reālie procesi notiek apzīmētā trijstūra iekšienē un ir atkarīgi no ierīces konstrukcijas, gāzu un ūdens parametriem.

Kā izriet no rezultātu salīdzinājuma, siltumnesēja temperatūras noteikšanas atšķirības nav lielākas par 1,7%. Mazāk precīzi ir noteikta gāzu mitruma satura izmaiņa. Šeit lielas atšķirības novērojamas pirmajā režīmā, un tas ir 14,3%. Kopumā jāatzīmē, ka piedāvātais modelis adekvāti apraksta konvektīvo siltummaiņu - kondensatoru siltuma un masas apmaiņas procesus un var tikt lietots šo kontaktaparātu aprēķiniem.

Adekvāta modeļa esamība ļāva veikt kontaktaparāta ar neapsmidzināmu pildījumu analītiskos pētījumus ar datora palīdzību, lai iegūtu sakarību masas apmaiņas koeficienta aprēķināšanai [2.31.]. Pētāmo režīmu tvaika-gāzu plūsmas un ūdens parametri tika pārbaudīti eksperimentāli. Rezultāti doti kritēriāla vienādojuma veidā:

$$Sh = Sh_0 \frac{\ln\left(\frac{\Pi_D}{\varepsilon_g} + 1\right)}{\Pi_D} \quad (2.50.)$$



2.34. att. Masas atdeve tvaika kondensācijas gadījumā no tvaika-gāzes plūsmas.

Eksperimentālie dati:

- o - kontaktaparāti ar apsmidzināmu cauruļu kūli;
- Δ - kondensatori ar neapsmidzināmu sildvirsmu;
- - citu autoru sakarības.

Apkopojot eksperimenta rezultātus kontaktaparātiem ar apsmidzināmu un neapsmidzināmu pildījumu sakarības $\frac{Sh \cdot \Pi_D}{Sh_0}$ no $\frac{\varepsilon_g}{\Pi_D}$ veidā, tie uzrāda labu sakritību ar citu pētījumu rezultātiem un parādīti 2.34. attēlā.

2.3.2.6. Siltuma un masas apmaiņas procesu izpētes inženiertehniskais lietojums

2.3.2.6.1. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu inženiertehniskā aprēķina metodika

Kontaktpaparātu tāpat kā citu siltummaiņu siltumtehnikie aprēķini parasti tiek veikti divu iemeslu dēļ:

- konstruktīvais aprēķins - lai noteiktu siltumapmaiņas virsmu un tās ģeometriskos raksturojumus;
- pārbaudes aprēķins - lai iegūtu siltumnesēju parametru vērtības ne tikai aparāta izvadā, bet arī dažādās tā vietās (lokālos parametrus).

Lai ekspluatācijas laikā būtu iespējams ne tikai darbināt aparātu optimālajā režīmā, bet arī uzturēt labākos kaitīgo gāzu komponentu absorbcijas apstākļus, nepieciešams zināt siltumnesēju temperatūru un mitruma saturu vērtības dažādās aktīvā pildījuma vietās.

Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa konstruktīvā aprēķina metodika un piemērs dots grāmatā [2.15.].

Kontaktsiltummaiņa ar aktīvo pildījumu pārbaudes aprēķina metodika balstās uz 2.3.2.3. un 2.3.2.4. nodaļā iegūtajiem vienādojumiem, un risinājuma piemērs aplūkots grāmatā [2.25.].

Izejas datus var sadalīt divās neatkarīgās grupās:

- konstruktīvie parametri: F_{pil}^{ar} , F_{pil}^{ie} , F_{pl} , d_{ie} , d_{ar} , n , n_I , n_{II} , a , l , H , s_2 ;
- siltumnesēju raksturojumi: t_g' , t_u' , t_u'' , d_1 , V_g' , G_u , $G_{šk}$.

Risinājums ļauj atrast siltumnesēju parametrus jebkurā pildījuma punktā:

1. Lai to panāktu, pildījumu sadala mazās zonās - elementos, kuru augstums ir Δx , pie kam, jo mazāks ir šis lielums, jo precīzāk iespējams noteikt parametru vērtības.
2. Šajos elementos pieņem siltumnesēju parametru maiņas Δt_g , Δt_u , Δt_{sk} , Δd un ievieto vienādojumos (2.18.)...(2.24.).
3. Atsevišķu palīglielumu, koeficientu un līdzības skaitļu aprēķinu veic ar 2.3.2. nodaļā aprakstītajām formulām.
4. Aprēķina rezultātus salīdzina:
 - Ja iegūtās vērtības atšķiras no pieņemtajām, tad ar iterācijas metodi panāk šo lielumu sakrītību.
 - Ja iegūtās vērtības neatšķiras no pieņemtajām, tad aprēķinu var beigt.

2.3.2.6.2. Kontaktsiltummaiņu darbības režīmu optimizācija

Siltuma un masas apmaiņas procesu matemātiskais modelis ērti lietojams ne tikai šādu siltummaiņu inženiertehniskajam datoraprēķinam, bet arī izmantojams kontaktsiltummaiņu skaitliskajam eksperimentam, lai noteiktu optimālos darbības režīmus. Tas ļauj laboratorijas, pusrūpnieciskos un rūpnieciskos eksperimentālos pētījumus veiksmīgi aizvietot ar datoraprēķiniem.

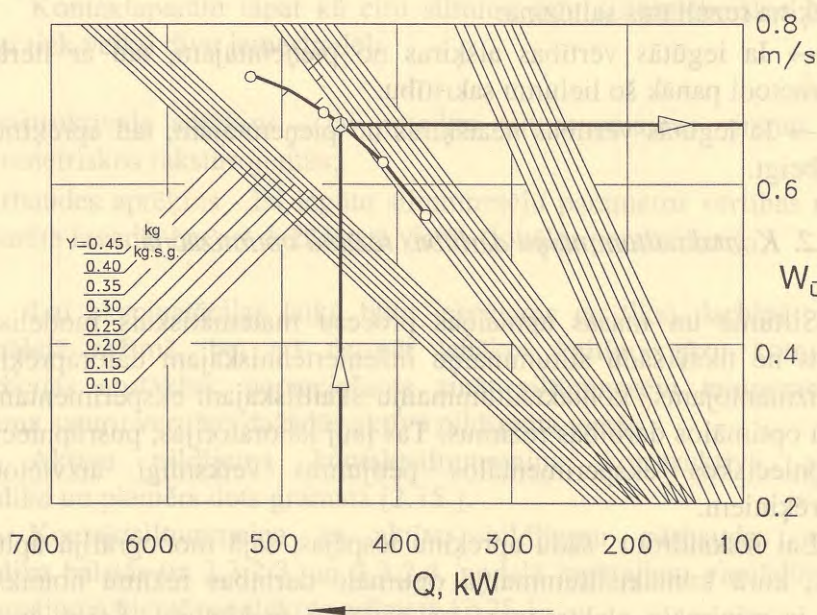
Lai izskaidrotu šādu aprēķinu iespējas, šajā monogrāfijā aplūkots variants, kurā kontaktsiltummaiņa optimālo darbības režīmu noteikšanas pamatā ir minimālo elektroenerģijas patēriņu meklējumi. Šajos aparātos elektroenerģija tiek tērēta dūmgāzu plūsmas aerodinamisko pretestību un ūdens plūsmu (caur caurulēm un smidzināšanas sprauslām) hidrodinamisko pretestību pārvarēšanai.

Optimizācijas uzdevuma izpilde tika realizēta ar četru faktoru skaitliskā eksperimenta palīdzību, izmantojot iepriekš aplūkoto eksperimenta plānošanas metodiku. Tā rezultātā tika iegūts vienādojums, kas parāda saistību starp ūdens un dūmgāzu ātrumu un dūmgāzu mitruma saturu:

$$Q = 22,1 - 2,3 \cdot \omega_g + 236,8 \cdot \omega_{\bar{u}} + 184,6 \cdot d + 61,5 \cdot \omega_g \cdot \omega_{\bar{u}}, \text{ kW.} \quad (2.51.)$$

Kā redzams no vienādojuma, smidzināšanas blīvuma ($1,0 \dots 6,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$) vērtību diapazonā) ietekme uz kontaktsiltummaiņa ražību ir niecīga un tā netiek ņemta vērā.

Regresijas vienādojuma grafiskais attēls parādīts nomogrammas veidā 2.35. attēlā.



2.35. att. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa darbības režīma noteikšanas nomogramma.

Optimālo darbības režīmu meklējumiem šajā gadījumā tiek izmantota stāvā kāpuma metode, ar kuras palīdzību tika noteikts atkarīgā mainīgā funkcijas (siltuma ražības) optimuma vērtību virziens, kurā būtu jāturpina izpēte. Skaitliskā eksperimenta rezultāti, nosakot parametru optimālo attiecību vērtības, atrodas uz līknes nomogrammā 2.29. attēlā. Tā

atspoguļo kontaktsiltummaiņa vislielāko siltuma ražības pieauguma kāpumu.

Rezultātus, kas iegūti ar iepriekšpieminētās optimizācijas metodes palīdzību, iespējams lietot tālākos aprēķinos. Elektroenerģijas patēriņš sūkņu un dūmsūcēju piedziņai plūsmu aero- un hidrodinamisko pretestību pārvarēšanai tiek noteikts ar vienādojumu:

$$N_{el} = \frac{G \cdot \Delta p}{\rho \cdot \eta \cdot 10^3}, \text{ kW}; \quad (2.52.)$$

kur G/ρ - siltumnesēja caurplūde, m^3/s ;

Δp - spiediena kritums, Pa;

η - sūkņa (dūmsūcēja) lietderības koeficients.

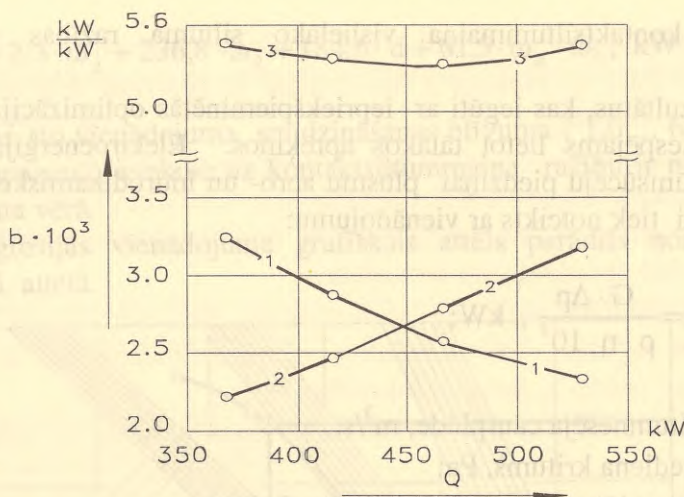
Lai vienkāršāk būtu atrast minimālā energopatēriņa vērtību, papildus ieviests īpatnējā elektroenerģijas patēriņa jēdziens:

$$b_{el} = \frac{N_{el}}{Q}, \text{ kW/kW}. \quad (2.53.)$$

Aprēķinu rezultāti parādīti 2.36.attēlā.

Šādi optimālo faktoru meklējumi ar skaitliskā eksperimenta palīdzību uz datora šajā konkrētajā piemērā parāda, ka minimālais elektroenerģijas patēriņš sūkņu un dūmsūcēja piedziņai būs gadījumā, ja kontaktsiltummaiņa siltuma ražība būs diapazonā 430 ... 470 kW.

Ar aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa darbības režīmu nomogrammas (skat. 2.29.attēlu) palīdzību iespējams noteikt optimālās dūmgāzu un ūdens ātrumu vērtības aparātā, lai nodrošinātu iepriekš atrasto siltuma ražību.



2.36. att. Optimālā darbības režīma noteikšanas grafiks:

- 1 - enerģopatēriņš smidzināšanas sūkņa piedziņai;
- 2 - enerģopatēriņš ūdens sūkņa un dūmsūcēja piedziņai;
- 3 - kopējais īpatnējais enerģopatēriņš.

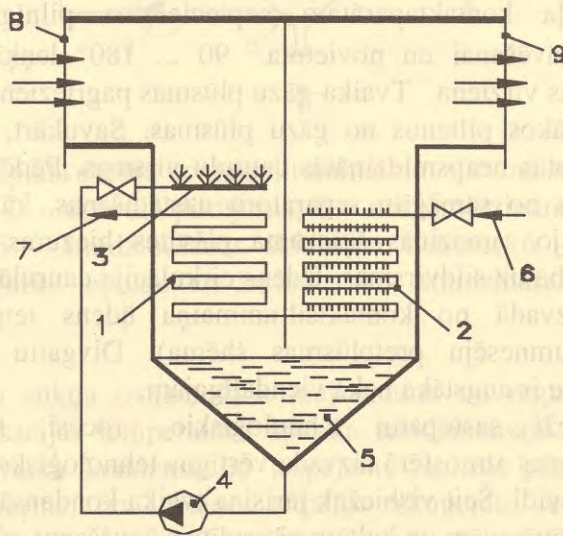
Vēlreiz jāuzsver, ka šeit aplūkotais optimālo darbības režīmu meklēšanas piemērs ir parādīts, lai varētu izskaidrot pašu optimizācijas metodi. Tā tiek piedāvāta aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu darbības optimālo režīmu noteikšanai, lietojot skaitlisko eksperimentu. Vispārējā gadījumā šīs optimizācijas metodes lietojums ir daudz plašāks un to ierobežo vienīgi parametru un robežnosacījumu daudzums. Optimizācijas metode aizsargāta ar autorapliecību [2.32.].

2.3.2.6.3. Tehnoloģiskās iekārtas sekundārās enerģijas izmantošanai

Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu izmantošanas iespējas palielinās līdz ar jaunu konstrukciju izstrādi un veco pilnveidošanos. Tie var pildīt dažādus uzdevumus:

- sekundārās enerģijas izmantošana;
- tvaiku kondensācija no tvaika - gāzu maisījuma;
- cieto daļiņu izgulsnēšana no gāzu plūsmas;
- gāzveida komponentu absorbcija.

Atkarībā no tā, kādas funkcijas (vienlaicīgi var būt arī vairākas) pilda aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi, tie tiek uzstādīti katlu mājās, aiz tehnoloģiskām krāsnīm, ventilācijas sistēmās. Pasaulē tie visplašāk tiek lietoti pilsētu atkritumu dedzināšanas katlu mājās un termoelektrostacijās.



2.37. att. Divgaitu aktīva pildījuma kontaktsiltummainis - kondensators:

- 1, 2 - (attiecīgi) gludu un ribotu cauruļu kūlis; 3 - smidzināšanas sprauslas; 4 - smidzināšanas sūknis; 5 - smidzināšanas šķidruma un kondensāta tvertne; 6, 7 - (attiecīgi) dzesēšanas ūdens ievads un izvads; 8, 9 - (attiecīgi) tvaika-gāzu plūsmas ievads un izvads.

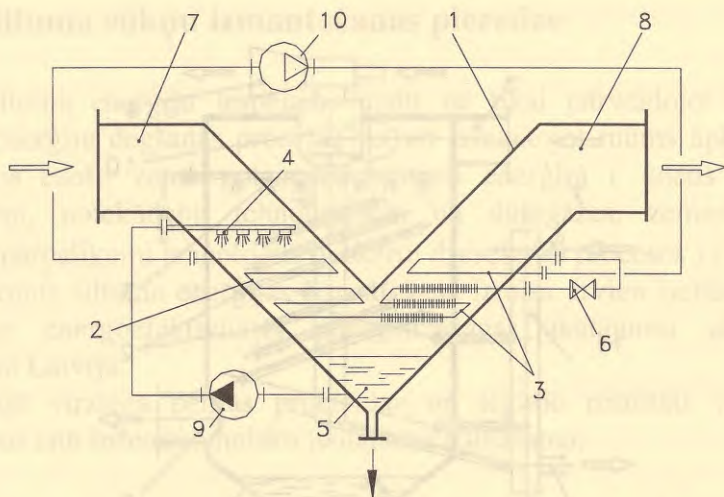
Pamatojoties uz siltuma un masas apmaiņas pētījumu rezultātiem, sadarbībā ar kolēģiem no RTU un uzņēmumiem, ar kuriem bija noslēgti

līgumi par zinātniski pētniecisko darbu izpildi, ir izstrādātas dažādas kontaktaparātu konstrukcijas, kuras risina zema potenciāla sekundārās siltuma enerģijas izmantošanas un tvaika - gāzu putekļainu un ar kaitīgiem gāzveida komponentiem piesārņotu plūsmu attīrīšanas problēmas. Tās ir apstiprinātas ar autorapliecībām [2.33. ... 2.40.]. Dažas no tām tiks aplūkotas šajā nodaļā, bet citas - 4. nodaļā, izklāstot dūmgāzu attīrīšanas problēmas.

Lai dzesētu un žāvētu dūmgāzes, aktīva pildījuma kontaktsiltummainis sadalīts divās daļās: ar un bez smidzināšanas. Divgaitu aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa principiāla shēma parādīta 2.37. attēlā.

Otrā daļa kontaktaparātam nepieciešama pilnīgākai dūmgāzu dzesēšanai un žāvēšanai un novietota $90 \dots 180^\circ$ leņķī, raugoties no dūmgāzu kustības virziena. Tvaika-gāzu plūsmas pagrieziens nepieciešams, lai atdalītu rupjākos pilienus no gāzu plūsmas. Savukārt, sīkākie pilieni separējas uz ribotās neapsmidzinātās cauruļu virsmas. Pēdējās izveide dod iespēju atteikties no sarežģītu separatoru uzstādīšanas, kā arī intensificē siltumapmaiņu, jo samazinās šķidrums plēvītes biezums un tātad arī termiskā pretestība uz sildvirsmas. Ūdens cirkulācija caurulēs organizēta tā, lai dūmgāzu izvadā no kontaktsiltummaiņa ūdens temperatūra būtu viszemākā (siltumnesēju pretplūsmas shēma). Divgaitu kontaktaparāta energoefektivitāte ir augstāka nekā viendaļīgajam.

Ļoti bieži sastopami tehnoloģiskie procesi, kuros nosūces ventilācijas sistēmas atmosfērā aizvada vērtīgus tehnoloģiskos produktus, ar tiem piesārņojot vidi. Šeit visbiežāk jārisina tvaika kondensācijas jautājumi. Piemēram, pēc žāvētavām un kaltēm aizvadītais žāvēšanas aģents gaiss ir ne tikai ar lielu mitruma saturu, bet arī bieži satur šķīdinātāju tvaikus un citus gāzveida piemaisījumus. Lai dzesētu, attīrītu, žāvētu un sildītu šādus gāzveida izmešus, izveidots divgaitu kontaktaparāts, kas strādā kopā ar siltuma sūkni. Principiālā shēma šai iekārtai dota 2.38. attēlā.

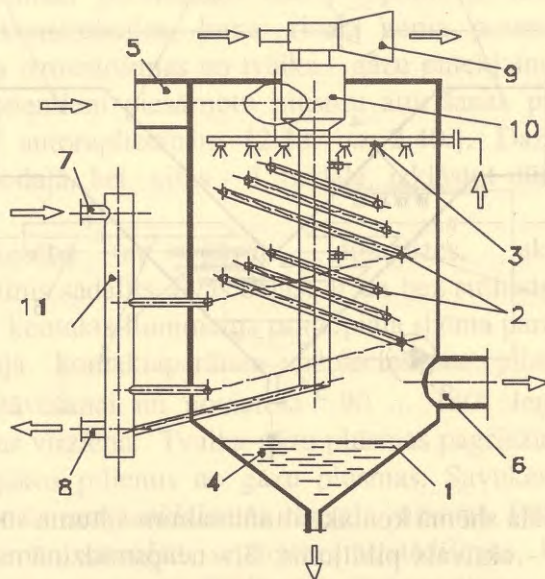


2.38. att. Principiāla shēma kontaktsiltummainim siltuma sūkņa kontūrā:

1- korpusis; 2 - aktīvais pildījums; 3 - neapsmidzināma sildvirsmā; 4 - sprauslas; 5 - smidzināšanas šķidrums tvertne; 6 - drosele; 7,8 - (attiecīgi) gāzes ieplūde un izplūde; 9 - smidzināšanas sūkņi; 10 - kompresors.

Siltuma sūkņa izmantošana ļauj uzturēt un regulēt nepieciešamo tvaika kondensācijas temperatūru aparāta smidzināmajā daļā. Līdz ar to gāzēs esošo tvaika kondensāciju iespējams realizēt pilnībā. Kondensāts nonāk nosēdvertnē, no kurienes atdalīto rekuperātu iespējams atkārtoti izmantot tehnoloģijā. Arī daļēji uzsildītās sausās gāzes vai gaisu pēc aparāta iespējams atkārtoti izmantot tehnoloģiskajā procesā, veidojot noslēgtu ciklu, t.i., mazatlikuma tehnoloģiju.

Aktīva pildījuma centrālās kontaktsiltummaiņi veidoti, lai ne tikai izmantotu dūmgāzu sekundāro siltuma enerģiju, bet arī lai izgulsnētu cietās daļiņas no dūmgāzu plūsmas. Šī aparātu grupa atšķiras ar pildījuma konstruktīvo risinājumu. Viens no variantiem ir spirālveida centrālās kontaktsiltummaiņi, kura principiālā shēma parādīta 2.39. attēlā.



2.39. att. Spirālveida aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņis:

- 1 - korpuss; 2 - spirālveida pildījums; 3 - smidzināšanas sprauslas;
 4 - smidzināšanas šķidruma tvertne; 5, 6 - (attiecīgi) dūmgāzu ievads
 un izvads; 7 - ūdens ievads; 8 - ūdens pārpalikumu izvads; 9 -
 ežektors; 10 - izplešanās trauks; 11 - kolektors.

Kontaktsiltummaiņa pildījums izveidots Arhimēda spirāļu veidā, lai intensificētu siltuma un masas apmaiņas procesus, samazinot smidzināšanas šķidruma un kondensāta plēvītes biezumu, kā arī lai ar vairākiem dzesēšanas ūdens ievadiem panāktu maksimālu tvaiku kondensāciju. Šajos kontaktsiltummaiņos uzlabojas kondensācijas process tilpumā.

Dūmgāzu attīrīšanas problēmām kontaktparātos vairāk uzmanības pievērsts monogrāfijas 4. nodaļā.

2.3.3. Siltuma sūkņu izmantošanas pieredze

Siltuma enerģiju iespējams iegūt ne tikai pārveidojot kurināmā ķīmisko enerģiju degšanas procesā, bet arī izmantojot mums apkārt lielos daudzumos esošo zema potenciāla siltuma enerģiju (ūdens krātuves, gruntsūdeņi, notekūdeņi, tehnoloģiskās un dūmgāzes, zemes siltums, enerģijas pārpalikumi tehnoloģisko iekārtu dzesēšanas procesos) [2.44.].

Grunts siltuma enerģijas izmantošana izraisa arvien lielāku interesi sakarā ar energoefektivitātes paaugstināšanas jautājumu aktualitātes pieaugumu Latvijā.

Šajā virzienā pētītās problēmas un iegūtie rezultāti varētu būt nodēriģi arī citu inženiertehnisku jautājumu risināšanai:

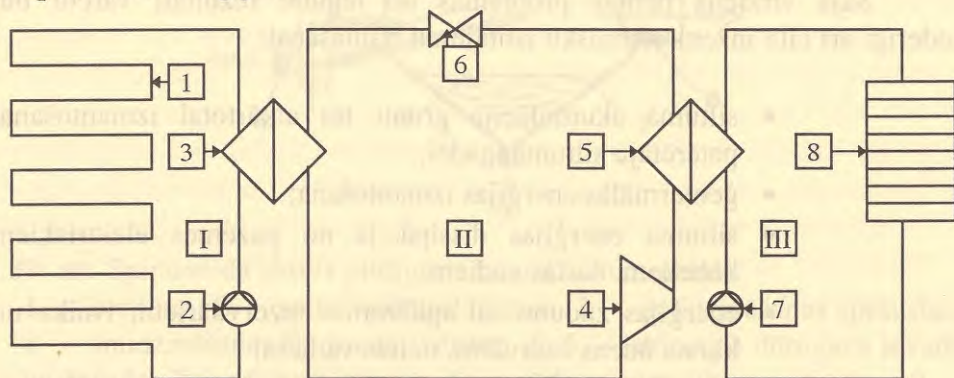
- siltuma akumulācija gruntī tās atkārtotai izmantošanai patērētāju siltumapgādei;
- ģeotermālās enerģijas izmantošana;
- siltuma enerģijas dissipācija no pazemes elektriskiem kabeļiem, naftas vadiem;
- enerģijas zudumi no apkšzemes rezervuāriem, tvaika un karsta ūdens caurulēm, naftas vadiem;
- inženierbūvju siltuma izolācija, tās izvietojot zem zemes.

Šajā nodaļā galvenā uzmanība ir veltīta siltuma sūkņa darbības izpētei, bet iegūtie rezultāti var tikt izmantoti arī iepriekš minēto inženiertehnisko problēmu risināšanai.

2.3.3.1. Siltuma sūkņa darbība

Lai paaugstinātu enerģijas potenciālu, tiek lietota speciāla iekārta - siltuma sūknis, kura piedziņai kalpo elektriskā enerģija. Tā faktiski ir saldešanas sistēma, kurā uzsvars ir likts uz kondensatora siltuma enerģijas izmantošanu.

Termodinamikas otrais likums nosaka, ka siltums nepāriet no ķermeņa ar zemāku temperatūru uz ķermeni ar augstāku temperatūru. Lai veiktu šādu procesu, ir jāpatērē darbs. Tas tiek darīts siltuma sūkņos un saldēšanas mašīnās, no kurām pēdējās ikdienā pazīstamas kā ledusskapji. Siltuma sūkņa darbība atšķiras no saldēšanas mašīnas darbības ar to, ka saldēšanas ciklā siltums no dzesēšanas kameras tiek aizvadīts apkārtējā vidē. Turpretī siltuma sūkņī siltumenerģija tiek saņemta no apkārtējās vides (gaisa, grunts, ūdens) un nodota siltumnesējam siltumapgādes sistēmā, pie kam apgrieztajā termodinamiskajā ciklā tiek patērēts darbs kompresora un sūkņu piedziņai. Ūdens temperatūra siltumapgādes sistēmā ir augstāka nekā temperatūras enerģijas avotā.



2.40.att. Principiāla siltuma sūkņa shēma:

1 - siltuma kolektora caurules grunti; 2 - cirkulācijas sūknis; 3 - iztvaikotājs; 4 - kompresors; 5 - kondensators; 6 - drosele; 7 - karstā ūdens cirkulācijas sūknis; 8 - apkures elementi.

Mūsu valstī pirmie soļi siltuma sūkņu ieviešanā sākti 1981. gadā. Latvijas starpkolhozu celtniecības organizācija nopirka somu firmas "AGA" siltuma sūkņus, kuros tika izmantots zemes siltums. Pirmās divas iekārtas uzstādīja individuālajās mājās (Salienā), kuru apsildāmo telpu platība ir 150 m². Siltuma sūkņa elektriskā jauda ir 4,2 kilovati, bet siltumapgādes apkures sezonas vidējā nepieciešamā jauda - 10,5 kilovati. Tātad enerģijas

pārveides koeficients ir 2,5. Siltuma sūkņa principiālā shēma parādīta 2.40. attēlā.

Siltuma sūknis sastāv no trīs savstarpēji saistītiem kontūriem:

- | | | |
|-----|---|----------------|
| I | - | zemes; |
| II | - | aukstumaģenta; |
| III | - | siltumapgādes. |

Kontūru "saskares punkti" ir siltummaiņi:

- I un II kontūram - iztvaikotājs;
- II un III kontūram - kondensators.

Zemes kontūrs ietver 0,8 ... 1,0 m dziļumā novietotu cauruļvadu sistēmu, kurā cirkulē nesasalstošs šķidrums, ir cirkulācijas sūknis un dzesētājs - iztvaikotājs. 40 mm diametra plastmasas caurules ieguldītas zemē viena līdz divu metru attālumā cita no citas. Šādam izvietojumam nepieciešams apmēram 400 ... 600 m² zemes. Pa caurulēm plūstošais zemas temperatūras siltumnesējs - tehniskā spirta un ūdens maisījums vai ūdens un antifrīza maisījums - uzņem grunts siltumu un tālāk nodod enerģiju aukstumaģentam dzesētājā - iztvaikotājā.

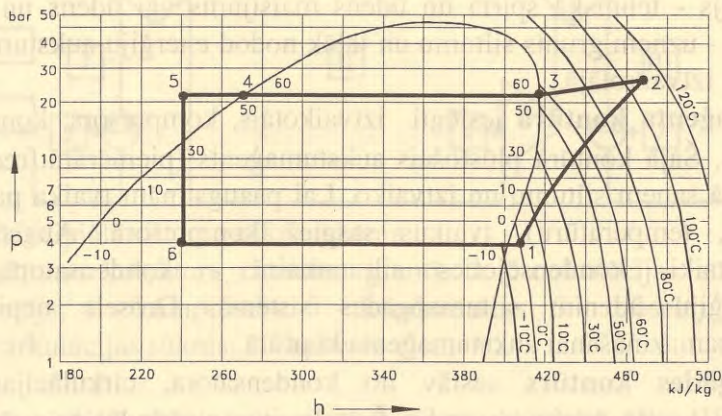
Aukstumaģenta kontūrā ieslēgti iztvaikotājs, kompresors, kondensators un drosele. Šajā kontūrā plūstošais aukstumaģents (piemēram, freons - 22) iztvaikotājā saņem siltumu un iztvaiko. Lai paaugstinātu tvaika parametrus (spiedienu, temperatūru), tvaikus saspiež kompresorā. Augstspiediena freona tvaiki, kondensējoties siltummaiņī - kondensatorā, nodod siltumenerģiju ūdenim siltumapgādes sistēmā. Drosele nepieciešama spiediena samazināšanai aukstumaģenta kontūrā.

Siltumapgādes kontūrs sastāv no kondensatora, cirkulācijas sūkņa, apkures un karstā ūdens sistēmas. Šajā kontūrā cirkulējošais ūdens tiek sildīts kondensatorā un tālāk - padots gan apkures sistēmā, gan karstā ūdens boilerā.

Siltuma sūkņa darbība ilustrēta ar aukstumaģenta kontūrā noritošajiem procesiem, kuri p - h diagrammā parādīti 2.41. attēlā.

Kā izriet no 2.41. attēlā uzzīmētā cikla, iztvaikotājā, kurā nodrošināts spiediens 4 bāri un atbilstošā piesātinājuma temperatūra -7°C,

freons - 22 iztvaiko un tā tvaikus pārkarsē līdz temperatūrai -1°C (taisne 6 - 1). Tam nepieciešamo siltumu aukstumnesējs saņem no pirmā kontūra siltumnesēja, kura temperatūra, kā rāda veiktie mērījumi , ziemas sezonā var mainīties no $+1 \dots +2^{\circ}\text{C}$ līdz -2°C . Tas nozīmē, ka pirmā kontūra pusē iztvaikotājā starp ievadu un izvadu ir pietiekama $3 \dots 4^{\circ}\text{C}$ temperatūras starpība, lai iekārta nodrošinātu nepieciešamo siltuma ražību. Saspiežot tvaikus kompresorā (līkne 1 - 2) , freona tvaiku spiediens pieaug līdz 22 bāriem , bet temperatūra sasniedz $+110^{\circ}\text{C}$. Kondensatorā, kas parasti tiek ievietots karstā ūdens akumulācijas tvertnē (boilerā), tvaiki atdziest līdz piesātinājuma temperatūrai $+55^{\circ}\text{C}$ (līkne 2 - 3) un kondensējas (taisne 3 - 4). Kondensāts tiek nedaudz pārdzesēts (taisne 4 - 5). Siltumapmaiņas procesi kondensatorā nodrošina ūdens uzkaršēšanu akumulācijas tvertnē līdz $+55^{\circ}\text{C}$. Šis ūdens cirkulē siltumapgādes sistēmas kontūrā un nodrošina mājas apkuri, kā arī karstā ūdens patēriņu.



2.41. att. Siltuma sūkņa darbības procesi p - h diagrammā.

Siltumu, kuru novada no grunts un pievada iztvaikotājam aukstumaģenta kontūrā, nosaka ar siltuma bilances vienādojumu:

$$Q_0 = m \cdot (h_1 - h_6), \text{ kW}, \quad (2.54.)$$

kur m - aukstumnesēja caurplūde siltuma sūknī, kg/s;

h_1 - aukstumnesēja entalpijas dažādos stāvokļos, kuri attēloti siltuma sūkņa ciklā: i vērtības atbilst punktu numerācijai 2.41.attēlā, kJ/kg.

Kondensatorā novadīto un siltumapgādes sistēmā izmantojamo siltumu aprēķina ar formulu:

$$Q_s = m \cdot (h_2 - h_5), \text{ kW.} \quad (2.55.)$$

Kompresora piedziņai nepieciešamo jaudu, uzskatot, ka tā adiabatiskais lietderības koeficients η_a ir ņemts vērā, novērtē ar izteiksmi:

$$P_k = m \cdot (h_2 - h_1) \cdot \eta_e, \text{ kW,} \quad (2.56.)$$

kur η_e - piedziņas efektīvais lietderības koeficients.

Siltuma sūkņa darbināšanai bez kompresora nepieciešami arī siltumnesēju cirkulācijas sūkņi I un III kontūrā. Tāpēc kopējo elektrisko jaudu nosaka, summējot trīs komponentus,:

$$P = P_k + P_I + P_{III}, \text{ kW.} \quad (2.57.)$$

Katrā konkrētā siltuma sūkņa lietošanas gadījumā jāsummē visas iekārtas ar elektrisko piedziņu.

Siltuma sūkņa darbību raksturo enerģijas izmantošanas koeficients, kas rāda, cik zemā potenciāla siltumenerģijas (grunts siltuma) izdodas izmantot siltumapgādes sistēmā iekārtas darbības rezultātā. To nosaka, izmantojot attiecību:

$$\Psi = \frac{Q_s}{Q_0}. \quad (2.58.)$$

2.3.3.2. Grunts temperatūras izmaiņu izpēte

2.3.3.2.1. Grunts temperatūras izmaiņu noteikšanas modelēšana

Galvenais pētījumu mērķis ir grunts nestacionāro temperatūras lauku aprēķinu inženiermetodikas izstrāde. Šī iemesla dēļ tika precizēts pētījumu virziens. Izpētes saturs izriet no konkrētiem uzdevumiem, kuri ir saistīti ar siltuma sūkņa darbību:

- grunts temperatūras lauka izmaiņas apkures sezonas laikā, kuras izraisījusi siltuma sūkņa darbība [2.46.];
- siltuma sūkņa darbības (apkures sezonas laikā) ietekme uz augu veģetāciju pavasarī (jāņem vērā , ka siltuma sūkņa siltuma kolektori cauruļu veidā galvenokārt izvietoti piemājas zemē un virs tiem tiek organizēta saimniecības augļkopība un dārzeņu audzēšana);
- siltuma sūkņa - siltumapgādes sistēmas siltuma avota ekonomiskie rādītāji, salīdzinot ar citiem alternatīviem enerģijas avotiem.

Atbildes uz šiem jautājumiem meklētas gan procesus matemātiski modelējot, gan tos pētot eksperimentāli.

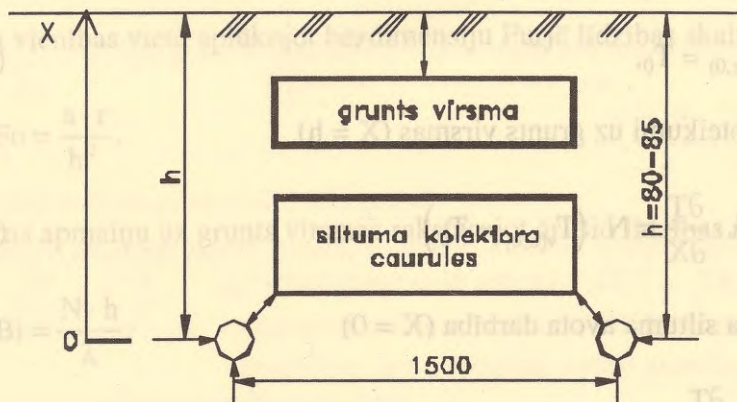
Aprēķina shēma procesu matemātiskā modeļa veidošanai parādīta 2.42. attēlā. Šeit ilustrēti objekta izmēri un siltumapmaiņa uz robežas un procesa sākumā. Parādīts arī negatīvā siltuma avota izvietojums pie siltuma kolektora caurulēm.

Matemātiskais modelis ir formulēts, ņemot vērā šādus pieņēmumus un noteikumus:

- tiek aplūkots nestacionārs temperatūras lauks;
- grunts mitruma saturs tiek ņemts vērā, nosakot pārejas koeficientus un īpatnējo siltumietilpību;
- siltuma pārejas process ir viendimensijas un norit X ass virzienā;

- grunts ir viendabīga un nesasalusi;
- uz grunts virsmas notiek siltumapmaiņa ar apkārtējo vidi sakarā ar Ņutona - Rihmana likumu;
- attālumā h no virsmas, kur ieguldītas siltuma kolektora caurules, darbojas negatīvs siltuma avots S ;
- siltuma nestacionāros procesus var izraisīt divu veidu iedarbes: apkārtējās vides temperatūras pazemināšanās un siltuma sūkņa ieslēgšana (sāk darboties siltuma avots S), iespējamas arī abas iedarbes vienlaicīgi.

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial X} = N \cdot (T_{c(h,0)} - T_0) \quad \text{- siltumapmaiņas noteikumi uz grunts virsmas.}$$



$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial X} = S \quad \text{- siltumapmaiņas noteikumi pie kolektora caurulēm.}$$

2.42. att. Siltumapmaiņas procesu aprēķinu shēma.

2.3.3.2. Matemātiskais modelis, kurš raksturo nestacionāros siltuma pārejas procesus gruntī, ietver dažādus diferenciālvienādojumus, sākuma un robežnoteikumus:

1. Furjē siltuma vadīšanas vienādojums gruntij

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial X^2}, \quad (2.59.)$$

2. sākuma nosacījumi apkārtējai videi

$$T_{(x,0)} = T_{v(h,0)}, \quad (2.60.)$$

3. sākuma nosacījumi gruntij

$$T_{(x,0)} = T_0, \quad (2.61.)$$

4. robežnoteikumi uz grunts virsmas ($X = h$)

$$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial X} = N \cdot (T_{v(h,0)} - T_0), \quad (2.62.)$$

5. negatīva siltuma avota darbība ($X = 0$)

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial X} = S, \quad (2.63.)$$

kur T - grunts temperatūra, °C;

a - grunts temperatūras vadīšanas koeficients, m^2/s ;

T_0 - grunts temperatūra procesa sākumā, °C;

$T_{v(h,0)}$ - vides temperatūra, °C

λ - grunts siltumvadītspējas koeficients, $W / (m \cdot K)$;

N - vispārināts grunts siltumatdeves koeficients, $W/(m^2 \cdot K)$;

h - siltuma kolektora cauruļu ievietošanas dziļums, m ;

S - siltuma plūsma, kuru noņem no grunts $1 m^2$, W / m^2 ;

τ - laiks, s .

Matemātiskā modeļa lielumus var pārveidot šādi:

1. Koordinātes vietā aplūkojot lineāro izmēru attiecību

$$\eta = \frac{X}{h}. \quad (2.64.)$$

Šim lielumam nav mērvienību un tā izmaiņas ir no 0 ($X = 0$) līdz 1 ($X = h$).
Tad $X = h \cdot \eta$, $dX = h \cdot d\eta$ un $dX^2 = h^2 \cdot d\eta^2$.

2. Laika vienības vietā aplūkojot bezdimensiju Furjē līdzības skaitli

$$Fo = \frac{a \cdot \tau}{h^2}. \quad (2.65.)$$

3. Siltuma apmaiņu uz grunts virsmas raksturojot ar Bio līdzības skaitli

$$Bi = \frac{N \cdot h}{\lambda}. \quad (2.66.)$$

Ņemot vērā iepriekš minētos pārveidojumus, matemātisko modeli, kurš raksturo grunts siltumapmaiņas procesus, var pierakstīt ar piecu vienādojumu palīdzību:

1. Siltuma vadišanas vienādojums gruntī

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2}. \quad (2.67.)$$

2. Sākuma nosacījumi apkārtējai videi

$$T_{v(1,0)} = T_v. \quad (2.68.)$$

3. Sākuma nosacījumi gruntij

$$T_{(\eta,0)} = T_0. \quad (2.69.)$$

4. Robežnosacījumi uz grunts virsmas ($\eta = 1$)

$$-\frac{\partial T}{\partial \eta} = Bi \cdot (T_v - T_0). \quad (2.70.)$$

5. Robežnosacījumi pie siltuma kolektora caurules ($\eta = 0$)

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = \frac{S \cdot h}{\lambda}. \quad (2.71.)$$

Nestacionāros siltuma procesus gruntī, kurus apraksta vienādojumu sistēma (2.67. ... 2.71.), izraisa divu veidu iedarbes:

- apkārtējās vides temperatūras izmaiņas;
- siltuma sūkņa ieslēgšana vai izslēgšana.

Lai atvieglotu uzdevuma risināšanu, lietderīgi ir to sadalīt divos uzdevumos un lietot superpozīcijas principu beigu rezultātam. Tādā gadījumā šie uzdevumi būtu šādi:

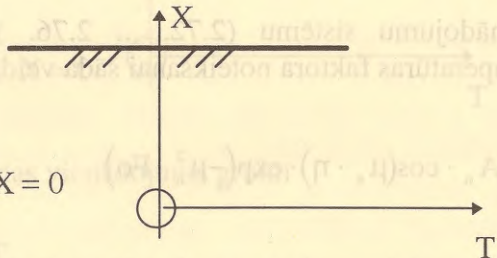
1. Apkārtējās vides temperatūras ierosme T_v ir ņemama vērā, ja grunts temperatūra ir T_0 vienāda ar 0 un siltuma sūkņi ir izslēgti.
2. Ierosme, kas saistīta ar siltuma sūkņa darbību, ir būtiska, bet nenotiek siltuma apmaiņa ar apkārtējo vidi.

Abu šo uzdevumu gadījumā mainās grunts temperatūra un tādā robežnoteikumi ir atkarīgi no tās. Šādos gadījumos elementārā superpozīcijas principa vietā jālieto autoru [2.47.] piedāvātais saliktās superpozīcijas princips. Arī šeit, saskaitot atsevišķu uzdevumu risinājumu rezultātus, iegūst galīgo vērtējumu.

Atbilstoši iepriekš formulētajam, pirmajam uzdevumam tiek piedāvāta aprēķinu shēma un vienādojumu sistēma:

$$-\frac{\partial T}{\partial \eta} = Bi \cdot (T_v - T_0); X = h$$

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0; X = 0$$



1. Siltuma vadīšanas vienādojums gruntī

$$\frac{\partial T}{\partial F_0} = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2}. \quad (2.72.)$$

2. Sākuma nosacījumi apkārtējai videi

$$T_{v(1,0)} = T_v = 0. \quad (2.73.)$$

3. Sākuma nosacījumi gruntij

$$T_{(\eta,0)} = T_0 = 0. \quad (2.74.)$$

4. Robežnosacījumi uz grunts virsmas ($\eta = 1$)

$$-\frac{\partial T}{\partial \eta} = \text{Bi} \cdot (T_v - T_0). \quad (2.75.)$$

5. Robežnosacījumi pie siltuma kolektora caurules ($\eta = 0$)

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0. \quad (2.76.)$$

Risinot vienādojumu sistēmu (2.72. ... 2.76.) [2.48.], iegūst izteiksmi grunts temperatūras faktora noteikšanai šāda veidā :

$$\Theta_1 = 1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos(\mu_n \cdot \eta) \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot \text{Fo}) \quad (2.77.)$$

Šajā izteiksmē μ_n ir vienādojumu sistēmas raksturīgā vienādojuma

$$\text{ctg } \mu_n = \frac{1}{\text{Bi}} \cdot \mu_n \quad (2.78.)$$

saknes.

Savukārt, koeficientu A_n nosaka ar izteiksmi

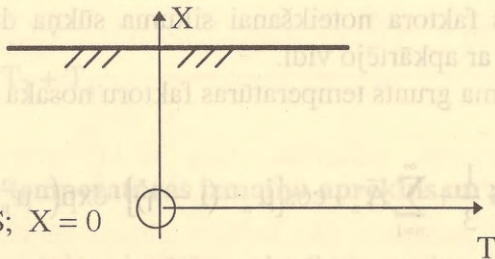
$$A_n = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2 \cdot \text{Bi} \cdot \sqrt{\mu_n^2 + \text{Bi}^2}}{\mu_n \cdot (\mu_n^2 + \text{Bi}^2 + \text{Bi})}. \quad (2.79.)$$

Grunts temperatūru ar noteikto temperatūras faktoru saista sakarība [2.47.]

$$T_1 = \Theta_1 \cdot (-T_v). \quad (2.80.)$$

Otrajam uzdevumam atbilstošā aprēķinu shēma un vienādojumu sistēma:

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0; \quad X = h$$



$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \eta} = S; \quad X = 0$$

1. Siltuma vadīšanas vienādojums gruntī

$$\frac{\partial T}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2}. \quad (2.81.)$$

2. Sākuma nosacījumi apkārtējai videi

$$T_{v(1,0)} = T_v = 0. \quad (2.82.)$$

3. Sākuma nosacījumi gruntij

$$T_{(\eta,0)} = T_0 = 0. \quad (2.83.)$$

4. Robežnosacījumi uz grunts virsmas ($\eta = 1$)

$$\frac{\partial T}{\partial \eta} = 0. \quad (2.84.)$$

5. Robežnosacījumi pie siltuma kolektora caurules ($\eta = 0$).

$$\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial \eta} = S. \quad (2.85.)$$

No vienādojumu sistēmas (2.81. ... 2.85.) [2.48.] iegūta izteiksme grunts temperatūras faktora noteikšanai siltuma sūkņa darbības gadījumā bez siltumapmaiņas ar apkārtējo vidi.

Otrā uzdevuma grunts temperatūras faktoru nosaka ar vienādojumu :

$$\Theta_2 = Fo - \eta + \frac{\eta^2}{2} + \frac{1}{3} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cdot \cos[\mu_n \cdot (1 - \eta)] \cdot \exp(-\mu_n^2 \cdot Fo). \quad (2.86.)$$

Sakņu noteikšanai izmanto izteiksmi :

$$\mu_n = n \cdot \pi. \quad (2.87.)$$

Koeficientu vērtības nosaka ar vienādojumu :

$$A_n = (-1)^{n+1} \cdot \frac{2}{\mu_n^2}. \quad (2.88.)$$

Grunts temperatūru un temperatūras faktoru saista sakarība :

$$T_2 = -\Theta_2 \cdot \frac{S \cdot h}{\lambda}. \quad (2.89.)$$

Balstoties uz sakarībām (2.80. un 2.89.) un izmantojot sarežģītās superpozīcijas principu, var noteikt grunts temperatūru, ja tās sākuma temperatūra $T_{(n,0)} = 0$ un uz virsmas notiek siltumapmaiņa ar apkārtējo vidi, un ir ieslēgts siltuma sūkņis. To noteiks sakarība

$$T = T_1 + T_2. \quad (2.90.)$$

Tajā gadījumā, ja grunts sākuma temperatūra nav vienāda ar 0, bet eksistē temperatūras sākuma fons $T_{(n,0)} = T_g$, tad rezultējošo temperatūru, ņemot vērā iepriekš minētos siltumapmaiņas procesus, nosaka ar šādu vienādojumu:

$$T = T_1 + T_2 + T_g. \quad (2.91.)$$

2.3.3.3. Grunts temperatūras izmaiņu aprēķins un pārbaude

Lai, izmantojot iegūtās sakarības, veiktu grunts temperatūras izmaiņu aprēķinus, ir nepieciešams zināt augsnes siltumfizikālās īpašības un to izmaiņas atkarībā no galvenajiem parametriem, piemēram, blīvuma, mitruma satura, temperatūras, struktūras, minerālu sastāva. Plašs eksperimentāls materiāls par grunts siltumfizikālām īpašībām ir apkopots darbā [2.49.]. Tajā ir piedāvāta sakarība grunts temperatūras difūzijas koeficienta noteikšanai:

$$a = [m_1 (W - m_4)^2 + 10^{-3} m_2 \rho + m_3] \cdot 10^{-7}, \text{ m}^2/\text{s}, \quad (2.92.)$$

kur $m_1 \dots m_4$ - empīriski koeficienti, raksturīgi katram grunts veidam ;

W - grunts mitruma saturs, % ;

ρ - grunts blīvums, kg / m^3 .

Grunts aprēķinos plaši lieto tās tilpuma īpatnējo siltumietilpību, kuru nosaka sausas grunts un ūdens maisījumam:

$$c = (c_p + 0,01 c_u W) \cdot \rho, \text{ kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{K}), \quad (2.93.)$$

kur c_p - sausas grunts tilpuma īpatnējā siltumietilpība, $\text{kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{K})$;

$c_{\text{ū}}$ - ūdens tilpuma īpatnējā siltumietilpība, $\text{kJ} / (\text{m}^3 \cdot \text{K})$.

Grunts siltumvadītspējas koeficientu nosaka, izmantojot aprēķinātās temperatūras difūzijas koeficienta un tilpuma īpatnējā siltuma vērtības :

$$\lambda = a \cdot c, \text{ W} / (\text{m} \cdot \text{K}). \quad (2.94.)$$

Izteiksmes (2.92. ... 2.94.) ir derīgas noteiktā temperatūru diapazonā: $- 10^{\circ}\text{C} \dots + 20^{\circ}\text{C}$.

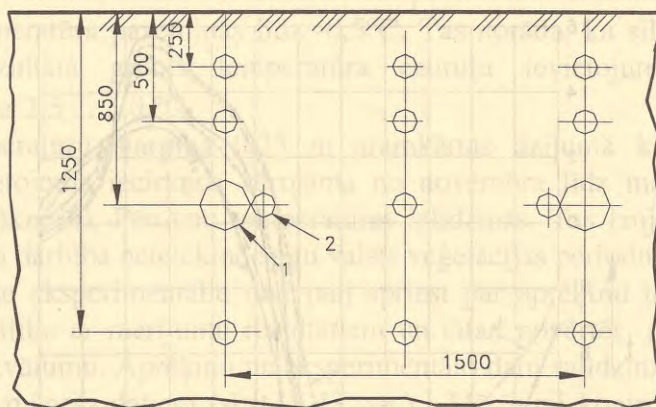
Izmantojot iegūtās sakarības, tika veikti grunts temperatūras izmaiņas aprēķini. Jāievēro arī noteikums, ka vides temperatūras krasas pazemināšanās (-8°C) gadījumā, tika ieslēgts siltuma sūknis, kura darbības laikā siltuma plūsma no grunts bija $12 \text{ W}/\text{m}^2$. Aprēķinos aplūkots laika posms $\tau = 24 \text{ h}$, kam atbilst Furjē līdzības skaitļa vērtība $Fo = 0,054$. Aprēķinu dati apkopoti 2.6. tabulā. Šeit uzrādītas temperatūras izmaiņas, kuras izraisa katra iedarbe atsevišķi, kā arī to abu summārais rezultāts. Aprēķini veikti, pieņemot, ka grunts sākuma temperatūra ir 0°C .

2.6. tabula

Iedarbju izraisītās grunts temperatūru izmaiņas.

X, m	η	Θ_1	$T_1, ^{\circ}\text{C}$	Θ_2	$T_2, ^{\circ}\text{C}$	$T_1 + T_2, ^{\circ}\text{C}$
0	0	-	-	0,27	- 2,57	- 2,57
0,1	0,125	-	-	0,17	- 1,62	- 1,62
0,2	0,25	-	-	0,1	- 0,95	- 0,97
0,3	0,375	-	-	0,06	- 0,57	- 0,57
0,4	0,5	0,04	- 0,32	0,01	- 0 095	- 0,42
0,5	0,625	0,1	- 0,8	-	-	- 0,8
0,6	0,75	0,23	- 1,84	-	-	- 1,84
0,7	0,875	0,39	- 3,12	-	-	- 3,12
0,8	1,0	0,59	- 4,72	-	-	- 4 72

1984. gada rudenī tika uzsākti pētījumi augsnes temperatūras un mitruma izmaiņu noteikšanai dažādos dziļumos virs, zem, starp un pie siltuma kolektora caurulēm, salīdzinot šos datus ar kontroles lauciņa datiem [2.50.]. Kontroles lauciņš atradās 10 m attālumā no pirmā kontūra un tajā netika izvietotas siltuma kolektora caurules. Temperatūras mērīšanai tika izmantoti elektriskie tranzistoru termometri TET - 2 ar augsnes temperatūras devējiem. Devēju izvietojuma shēma parādīta 2.42. attēlā.



2.42. att. Temperatūras devēju izvietojums:

1- siltuma kolektora caurule; 2 - temperatūras devējs.

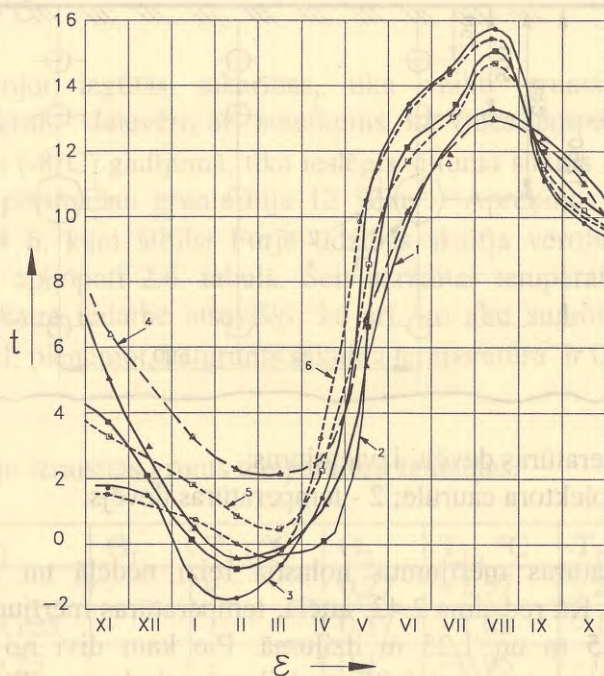
Temperatūras mērījumus nolasiņa reizi nedēļā un tie turpinājās septiņus gadus. Kā redzams 2.42. attēlā, temperatūras mērījumi veikti 0,25 m, 0,5 m, 0,85 m un 1,25 m dziļumā. Pie kam divi no temperatūras devējiem, kuri ir izvietoti 0,85 m dziļumā, pieskaras siltuma kolektora caurulēm un uzrāda cauruļu virsmu temperatūru. Temperatūras noteikšanas precizitāte ir $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

Bez temperatūras mērījumiem tika noteikts grunts mituma saturs un tā izmaiņas [2.51., 2.52.]. Šajā nolūkā reizi divās nedēļās augsnes mitruma

noteikšanai tika noņemti astoņi grunts paraugi (četros atkārtojumos): četri starpcauruļu telpā un četri kontroles lauciņā - dziļumos:

0 ... 0,25 m; 0,25 ... 0,75 m; 0,75 ... 1,0 m un 1,0 ... 1,25 m.

Mitruma saturs tika noteikts procentos ar svēršanas metodi, attiecinot augsnes parauga svara zudumu žāvējamā skapī pret grunts sauso masu. Par mitruma patieso vērtību pieņēma četrus paraugu vidējo vērtību. Šie dati izmantoti grunts temperatūras difūzijas koeficienta, īpatnējās siltumietilpības un siltumvadītspējas koeficienta aprēķiniem.



2.43. att. Ikmēneša grunts temperatūras izmaiņas 1984. / 85. gadā:

- 1 - izmēģinājuma iecirknis - 0,85 m; 4 - kontroles iecirknis - 0,85 m;
- 2 - izmēģinājuma iecirknis - 0,50 m; 5 - kontroles iecirknis - 0,50 m;
- 3 - izmēģinājuma iecirknis - 0,25 m; 6 - kontroles iecirknis - 0,25 m.

1984. / 85. gadā eksperimentāli noteiktās mēneša vidējās grunts temperatūras dažādos dziļumos kontroles un siltuma kolektoru cauruļu izvietošanas vietās parādītas 2.43. attēlā.

Jāatzīmē, ka 1984./ 85. gada ziema bija raksturīga ar zemām ārgaisa temperatūrām un tas bija nopietns pārbaudījums siltuma sūkņa siltuma apgādes sistēmai. 2.43. attēlā ir redzams, ka siltuma kolektora cauruļu ievietošanas dziļumā ir vērojamas ikgadējās temperatūras izmaiņas. Temperatūra kontroles lauciņā visu gadu ir pozitīva un sasniedz minimumu $+ 2^{\circ}\text{C}$ marta mēnesī (likne 4). Siltuma sūkņa darbības rezultātā tajā pašā dziļumā temperatūra pazeminās līdz $-0,5^{\circ}\text{C}$. Tas norāda, ka siltuma sūkņa darbības rezultātā grunts temperatūra cauruļu izvietošanas dziļumā pazeminās par $2,5 \dots 3,0^{\circ}\text{C}$.

Temperatūru starpība $0,25$ m aramkārtas dziļumā kontroles un cauruļu izvietošanas iecirkņos vērojama no novembra līdz marta beigām (likne 3 un likne 6). Pēc tam temperatūras izlīdzinās. Tas ļauj secināt, ka siltuma sūkņa darbība neietekmē augu valsts veģetācijas periodu.

Iegūtie eksperimentālie dati ļauj spriest par aprēķinu temperatūras izmaiņu sakritību ar mērījumu rezultātiem un tātad novērtēt matemātiskā modeļa adekvātumu. Aprēķinu un eksperimentālo datu salīdzināšana veikta pēc februāra mēneša datiem (skat. 2.43. att.). Mērījumi kontroles iecirknī rāda, ka grunts sākuma temperatūra ir 0°C vienīgi $0,25$ m dziļumā, kam atbilst $X = 0,55$ m (likne 4). Bet $0,5$ m dziļumā, kur koordināte $X = 0,3$ (likne 5) grunts sākuma temperatūra ir $+ 0,8^{\circ}\text{C}$. Siltuma kolektora cauruļu izvietošanas $0,8$ m dziļumā; kur $X = 0$ (likne 6) temperatūras vērtība ir $+2,1^{\circ}\text{C}$. Izmantojot eksperimentāli noteiktās grunts T_g temperatūras kontroles iecirknī (aprēķiniem sākuma vai fona temperatūras), aprēķinus var koriģēt, lietojot izteiksmi (2.91.) vienādojuma (2.90.) vietā. Aprēķinu grunts temperatūras izmaiņu korekcijas rezultāti, ņemot vērā grunts fona temperatūras, kā arī rezultāta salīdzinājums ar mērījumu datiem iecirknī, kur darbojas siltuma kolektora caurules, parādīti 2.7. tabulā. Atsauksmes uz līknēm atbilst 2.43. attēlam.

Speciāli pētījumi par grunts virskārtas un kārtas ap siltuma kolektora caurulēm sasalšanu netika veikti. Ir zināms [2.53.], ka grunts sasalšanas

temperatūra, sakarā ar dažādu sāļu klātbūtni tajā, ir zemāka par 0°C un atkarībā no mitruma satura var pazemināties līdz $-1,5^{\circ}\text{C}$. Tas ļauj domāt, ka grunts ap caurulēm var būt nesasalušā stāvoklī. Citādi apstākļi ir vērojami grunts virskārtā. Kā redzams no 2.7.tabulas, aptuveni 0,2m dziļumā virskārtas temperatūra ir zemāka par $-1,5^{\circ}\text{C}$ un grunts atrodas sasalušā stāvoklī. Tas nozīmē, ka šajā zonā piedāvātais matemātiskais modelis nav korekts un tas ir jāpapildina ar siltuma vadīšanas vienādojumu sasalušai gruntij.

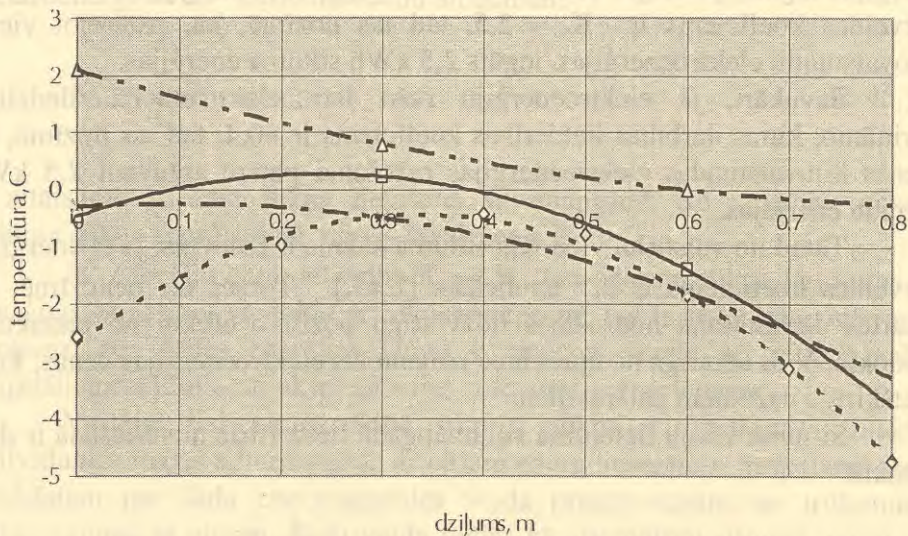
2.7. tabula

Aprēķinu un eksperimentāli noteikto grunts temperatūru izmaiņu salīdzinājums.

X, m	$T_1 + T_2, ^{\circ}\text{C}$	$T_g, ^{\circ}\text{C}$	$T_1 + T_2 + T_g, ^{\circ}\text{C}$	$T_{\text{eks}}, ^{\circ}\text{C}$
0,8	- 4,72	-	-	-
0,7	- 3,12	-	-	-
0,6	- 1,84	-	-	-
0,55	- 1,4	0 (līkne 6)	- 1,4	- 1,8 (līkne 3)
0,5	- 0,8	-	-	-
0,4	- 0,42	-	-	-
0,3	- 0,57	+ 0,8 (līkne 5)	+ 0,23	- 0,5 (līkne 2)
0,2	- 0,97	-	-	-
0,1	- 1,62	-	-	-
0	- 2,57	+ 2,1 (līkne 4)	- 0,47	- 0,3 (līkne 1)

2.7. tabulas dati ir parādīti grafiski 2.44. attēlā.

Kā redzams 2.44. attēlā, zonā no siltuma kolektora ievietošanas caurulēm līdz sasaluma joslas sākumam dati par grunts temperatūras izmaiņām siltumsūkņa darbības laikā labi korelē ar mērījumu datiem. Tas norāda, ka šajā zonā matemātiskais modelis adekvāti atspoguļo grunts temperatūras izmaiņas un to var izmantot temperatūru aprēķiniem. Kas attiecas uz jautājumu par grunts virskārtu, tad vietā, kur vērojama sasaluma josla, nepieciešami tālāki pētījumi, lai pilnveidotu matemātisko modeli.



2.44. att. Grunts temperatūras izmaiņas siltuma sūkņa darbības laikā:

- - - - - aprēķinu temperatūra ($T_g = 0$); - · - - mērītā grunts temperatūra kontroles laukā; - · - mērītā grunts temperatūra siltuma sūkņa kolektora cauruļu izvietošanas zonā; — aprēķinu temperatūra.

2.3.3.4. Siltuma sūkņu izmantošanas enerģētiskais vērtējums

Siltuma sūkņa darbības enerģētisko efektivitāti raksturo iegūtā siltuma enerģijas daudzuma attiecība pret patērēto darbu, un to sauc par enerģijas pārveides koeficientu, kuru nosaka ar attiecību:

$$K_t = \frac{Q_s}{P}. \quad (2.95.)$$

Izmantojot siltuma sūkni siltumapgādes sistēmā, šī koeficienta vērtība ir diapazonā 2 ... 4.

Enerģijas pārveides koeficients rāda, cik kilovatstundu siltuma enerģijas iegūts, patērējot vienu kilovatstundu elektroenerģijas. Ja enerģijas pārveides koeficients ir $K_t = 2,5$, tad tas nozīmē, ka, patērējot vienu kilovatstundu elektroenerģijas, iegūts 2,5 kWh siltuma enerģijas.

Savukārt, ja elektroenerģiju ražo termoelektrostacijā, dedzinot kurināmo, kuras darbības lietderības koeficients ir $\sim 0,4$, tad tas nozīmē, ka vienas kilovatstundas elektroenerģijas ražošanai patērē aptuveni 2,5 kWh siltuma enerģijas.

Tātad no valstiskā viedokļa siltuma sūknis ir izdevīgs, ja tā enerģijas pārveides koeficients ir 2,5 un lielāks [2.45.]. Tomēr tas nenozīmē, ka iekārtas darbināšana nodrošinās līdzvērtīgu pozitīvo efektu no patērētāju viedokļa. Viss atkarīgs no aprēķinos izmantotās elektroenerģijas cenas, kura ir atšķirīga dažādiem patērētājiem.

Siltuma sūkņa lietojuma siltumapgādē lietderības novērtēšanā ir divi aspekti:

- patērētāja puses intereses;
- valsts ekonomiskās intereses.

Tās var arī nesakrist. Patērētājs vienmēr centīsies izmantot vislētāko energoapgādi, un tas ir dabiski. Turpretī valsts interesēm vajadzētu saistīties ar visaugstāko energoefektivitāti. Lai sakristu valsts un patērētāju intereses, samazinot energoresursu patēriņu ar siltuma sūkņu palīdzību, nepieciešams šos jautājumus iekļaut valsts enerģētikas attīstības politikā. Šeit varētu būt vairāki risinājuma varianti, kas sastīti ar energopieprasījuma vadības stratēģiju. Par pēdējo tuvāk izklāstīts 1. nodaļā.

Siltuma sūkņī, izmantojot zema potenciāla grunts siltumu, iegūst Ψ reiz vairāk siltumapgādei noderīgu augsta potenciāla siltuma enerģiju, potenciāla izmaiņas procesam patērējot elektroenerģiju. Jāatzīmē, ka enerģijas izmaksas ir viens no galvenajiem faktoriem, kas nosaka iekārtas ekspluatācijas izmaksas un tās dzīvotspēju [2.1.]. Tāpēc patērētājs ir ieinteresēts, lai siltumapgādes jautājumus risinātu ar iespējami mazām enerģijas izmaksām. No šī viedokļa ir lietderīgi noskaidrot, pie kādām elektroenerģijas un kurināmā cenu attiecībām

$$K_{en} = \frac{C_{el}}{C_{kur}} \quad (2.96.)$$

ir attaisnota siltuma sūkņa lietošana siltumapgādē. Šo attiecību nosaka siltuma sūkņa enerģijas pārveides koeficients K_t .

Ja enerģiju cenu attiecība $K_{en} < K_t$, tad siltuma sūkņa lietojums no enerģijas izmaksas viedokļa ir attaisnojams un tas ir patērētāja interesēs. Protams, pēc šādas enerģijas izmaksu analīzes jāveic arī citu izmaksu (kapitālieguldījumi, citi ekspluatācijas izdevumi) izvērtējums.

Vērtējot Salienā uzstādītā siltuma sūkņa darbināšanas izmaksas individuālās mājas siltumapgādē ar citiem energoresursiem, iespējams iegūt priekšstatu par šāda energoapgādes veida priekšrocībām un trūkumiem salīdzinājumā ar citiem. Šāda veida mājās kā alternatīvu siltuma avotu var izmantot karstā ūdens katlu, darbināmu ar šķidro kurināmo vai malku.

1. Mazas jaudas šķidrā kurināmā katla lietderības koeficients ir 80 ... 93% [2.56.]. Saražotās siltumenerģijas izmaksa ir atkarīga arī no kurināmā izmaksām, kuras ir atkarīgas ne tikai no tirgus apstākļiem. Siltumenerģijas izmaksas svārstās diapazonā 8 ... 14 Ls / MWh.
2. Mazas jaudas malkas apkures katlu lietderības koeficients mainās periodiski (par to jau sīkāk izklāstīts 2. nodaļas sākuma daļā). Tā vidējais lielums ir 55 ... 70%. Siltumenerģijas izmaksas svārstās 5 ... 9 Ls / MWh.
3. Elektroenerģijas cena individuālajam patērētājam no 1995. gada 1. janvāra ir 28,3 Ls / MWh.

Tātad šobrīd, lietojot dažādus kurināmos, enerģiju cenu attiecība ir plašā diapazonā:

šķidrājam kurināmajam $K_{en} = 3,54 \dots 2,02$;

malkai $K_{en} = 5,66 \dots 3,14$,

un tikai gadījumā, ja siltumenerģijas izmaksas ir lielākas par 11,3 Ls / MWh, individuālajam patērētājam ir ekonomiski izdevīgi izmantot.

Ir arī citi jautājumi, kas ietekmē siltuma sūkņu energoefektīvu izmantošanu. Tie ir saistīti ar siltuma sūkņu darbināšanu un to darbības apstākļiem.

Kā redzams, būtisks siltuma sūkņa energoefektivitātes rādītājs ir enerģijas pārveides koeficients K_p . Jo lielāka koeficienta vērtība, jo mazākas siltumenerģijas cenas gadījumā patērētājam būs izdevīgi izmantot siltuma sūkņa iekārtu siltuma apgādē. Grunts kā siltuma sūkņa zema potenciāla siltuma avota pētījumi [2.54.] rāda, ka tās mitruma satura palielināšana paaugstina enerģijas pārveides koeficientu K_p . Tas skaidrojams ar to, ka, pieaugot mitruma saturam, pieaug grunts siltuma vadišanas koeficients un veidojas labāka grunts un siltuma sūkņa kolektora cauruļu saskares virsma.

Salienas ciemats atrodas teritorijā, kur ir augsts gruntsūdens līmenis (polderis). Ar to izskaidrojams, ka caurules ieliktas sekli, jo augsne ir ļoti mitra un līdz ar to arī siltumvadītspējas koeficients ir lielāks, un siltuma sūkņa darbības rādītāji labāki nekā sausā gruntī. Ja gruntsūdens līmenis ir zems, caurules jāiegulda dziļāk un to aizņemtā teritorija jāpaplašina (pieaug cauruļu kopējais garums), samazinās siltuma plūsma no grunts uz cauruli. Tādos gadījumos rodas nepieciešamība mākslīgi saglabāt maksimāli augstu mitruma saturu augsnē.

To iespējams sasniegt, ievietojot siltuma sūkņa siltuma kolektora caurules speciālā mitruma akumulācijas zonā. Šo zonu izveido ar polietilēna plēves ekrānu palīdzību atkarībā no augsnes struktūras un klimatiskajiem apstākļiem noteiktā dziļumā un platumā [2.55.]. Ekrānēto tranšeju pārklāj ar polietilēna mulču, lai samazinātu mitruma zudumu ar iztvaikošanu no zemes virsmas un savāktu atmosfēras nokrišņus. Sienas ekrānu perforācija nepieciešama, lai novadītu lieko mitrumu un augsne nepārpurvotos.

Literatūra

- 2.1. Eastop T.D., Croft D.R. Energy Efficiency. London, UK. 1990.
- 2.2. Blumberga D., Veidenbergs I. Koksnes degšanas tehnoloģijas // Koksnes atkritumu izmantošana Latvijas kokapstrādē. EK THERMIE zinātniski praktisks seminārs. Rīga, 1995. gada 27. septembris.
- 2.3. Blumberga D., Veidenbergs I. // Zinātne un Mēs. - 1993. - №2.
- 2.4. Kaitīgo izmešu dūmgāzēs un siltuma zudumu samazināšana rūpnīcas "ETMA" katlu mājā Madonā // Līgumdarba № 5692/91 atskaite. RTU. 1991.
- 2.5. Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of the coal combustion process in small capacity boilers // IAEE - East - European Conf. Improved Energy Efficiency in Former Centrally Planned Economies. Kaunas, Lithuania, October 19 - 21, 1992.
- 2.6. Blumberga D. Improvement of Combustion Efficiency and Air Pollution // ECEEE Summer Study. The Energy Efficiency Challenge for Europe. Rungstedgaard, Denmark, June 1 - 5, 1993.
- 2.7. Blumberga D. Setubal Thermal Power Plant: Technology. Combustion. Efficiency. Environment // Report TEMPUS Project JEP 6116 "PAMPS" Part No 2. Lisbon, June - August, 1994.
- 2.8. Blumberga D., Veidenbergs I., Cassiano J. Engineering Calculations of Experimental Data in Boiler of Setubal Power Plant: Results. Analysis. Conceptions // 3rd International Conference on Combustion Technologies for a Clean Environment. Lisbon, Portugal, 3 - 6 July 1995.
- 2.9. Blumberga D. Šķelda Balvu katlu mājā // Ekoloģiski tīras enerģētiskās sistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā. NUTEK. Stokholma, 1994.
- 2.10. Blumberga D. Evaluation of Fuel Conversion Projects in Latvia. NUTEK. Stockholm, 1995.
- 2.11. Enerģētikas attīstības programma, 1994.
- 2.12. Koksnes izmantošana Latvijas enerģētikā. Kopsavilkums. JAAKKO POYRY atskaite ERAB C4100/EC - 92- 12 -68. 1995.

- 2.13. Блумберга Д. Разработка и исследование тепломассообменных аппаратов с активной насадкой для высоковлажных парогазовых потоков. Автореферат.- Каунас, 1988.
- 2.14. Блумберга Д., Вейденберг И. Тепловые режимы конвективных тепломассообменников - конденсаторов // *Latvian J.Phys. Tech. Sci.*-1991. - No 2.
- 2.15. Блумберга Д., Ильин И. Мокрая очистка газов: Учебное пособие.- Рига, 1987.
- 2.16. Вейденберг И., Блумберга Д., Бажбауэр Г., Бажбауэр Я. Определение локальных параметров тепло- и массообмена конвективных теплообменников - конденсаторов // *Latvian J.Phys. Tech. Sci.*-1992.- No1.
- 2.17. Справочник по теплообменникам: В 2-х т./Пер. с англ., под ред. Б. Петухова, В. Шикова. -Москва, 1987.
- 2.18. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Под общ. ред. В. Григорьева и М. Зорина. - Москва, 1982.
- 2.19. Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И. Теплоотдача при наличии конденсации водяного пара из парогазовой смеси в контактных теплообменных аппаратах с активной насадкой // *Изв. АН ЛатвССР. Серия физических и технических наук.*-1988. - №6.
- 2.20. Блумберга Д., Вейденберг И., Ильин И. Конденсация пара из парогазовой смеси в насадке контактного теплообменника с активной насадкой // *Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации: Тез. докл. Всесоюз. конф.*-Рига, 1988.
- 2.21. Блумберга Д., Вейденберг И., Бригис Л., Бажбауэр Г. Методика определения локальных значений параметров в насадке контактного аппарата // *Повышение эффективности использования топлива в народном хозяйстве: Сб. докл. Всесоюз. конф.*-Рига, 1990.
- 2.22. Исаченко В., Осипова В., Сукомел А. Теплопередача.-Москва, 1975.
- 2.23. Буглаев В., Лившиц М., Влияние компоновки трубчатых теплообменников на теплообмен при конденсации водяного пара // *Тез. докл. Всесоюз. конф. по теплообмену и гидравлическому сопротивлению при движении двухфазного потока в элементах энергетических машин и аппаратов.*-Ленинград, 1978.

- 2.24. Гимбутис Г. Теплообмен при гравитационном течении пленки жидкости.-Вильнюс, 1988.
- 2.25. Blumberga D., Veidenbergs I. Tehnoloģisko gāzu attīrīšana un dzesēšana.- Rīga, 1990.
- 2.26. Соснин Ю., Бухаркин Е. Высокоэффективные газовые контактные водонагреватели.-Москва, 1988.
- 2.27. Богословский В., Поз М. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.- Москва, 1983.
- 2.28. Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И., Гришин В. Исследование теплопередачи в контактном теплообменном аппарате с активной насадкой // Изв. АН ЛатвССР. Серия физических и технических наук.- 1988. - № 4.
- 2.29. Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И. Тепломассообмен при конденсации из парогазового потока в аппаратах с активной насадкой // Кипение и конденсация: Сб. научн. тр.- Рига, 1988.
- 2.30. Блумберга Д., Вейденберг И., Ильин И. Оптимальные параметры работы контактных теплообменников с активной насадкой // Тез. докл. научно-техн. конф.-Днепропетровск, 1989.
- 2.31. Вейденберг И., Блумберга Д., Бажбауэр Г. Конденсация пара из продуктов сгорания природного газа // Двухфазный поток в энергетических машинах и аппаратах: Тез. докл. Всесоюз. конф.- Ленинград, 1990.
- 2.32. А.С. 1673818, СССР, МКИ, Ф 28С 3/06. Способ определения оптимального режима работы теплообменника / Блумберга Д., Вейденберг И., Ильин И. - Заявл. 24.11.88; №4608476/06. Опубл. 30.08.91. Бюл.№32.
- 2.33. А.С. 1469190, СССР, МКИ, 01 К 17/02, 24Н 3/12. Система теплофикации / Ильин И., Блумберга Д., Гривцов В. и др. - Заявл. 10.03.87; №4234223/24-06. Опубл. 30.03.89. Бюл.№12.
- 2.34. Заявка БНР №86778/ЛВЦ МКИ 24/3/147 Метод и инсталация за тепловлажностна обработка на воздух / Горсиев Я., Блумберга Д., Гривцов В. и др. - Положит. реш. 06.01.89.
- 2.35. А.С. 1611451, СССР, МКИ, В 04 С 3/02; 3/06. Вихревой пылеуловитель / Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И. и др. - Заявл. 13.12.88; №4618629/31-26. Опубл. 07.12.90. Бюл.№45.

- 2.36. А.С. 1457974, СССР, МКИ, В 01 В 53/18. Теплообменный аппарат со спиральной насадкой / Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И. и др. - Заявл. 06.07.87; №4277288/31-26. Оpubл. 15.02.89. Бюл.№6.
- 2.37. А.С. 1272061, СССР, МКИ, 24 Н 1/10. Контактный теплообменник / Ильин И., Блумберга Д. и др. - Заявл. 27.05.86; №3905773/29-06. Оpubл. 23.11.86. Бюл.№3.
- 2.38. А.С. 1224534, СССР, МКИ, А28 В5/00; А28 С3/06. Теплообменник для охлаждения и осушки парогазовых потоков / Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И. и др. - Заявл. 10.06.84; №3791279/23-06. Оpubл. 15.04.86. Бюл.№14.
- 2.39. А.С. 1374001, СССР, МКИ, А 25 В 1/00; А28 С3/06. Теплообменник для охлаждения и осушки парогазовых потоков / Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И., Гришин В. - Заявл. 16.06.86; №4128051/23-06. Оpubл. 15.02.88. Бюл.№6.
- 2.40. А.С. 1443948, СССР, МКИ, В 01 В 53/18. Теплообменный аппарат / Ильин И., Блумберга Д., Вейденберг И., Кононенко В. - Заявл. 27.05.87; №4251607/31-26. Оpubл. 15.12.88. Бюл.№46.
- 2.41. Ильин И.Н., Блумберга Д.М., Вейденберг И.К., Бажбауэр Я.Ф., Гришин В.А. Метод расчета контактных теплообменных аппаратов с активной насадкой // Теплофизика и гидрогазодинамика процессов кипения и конденсации: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Рига, 1988.-Т.2.
- 2.42. Блумберга Д. Разработка и исследование тепломассообменных аппаратов с активной насадкой для высоковлажных парогазовых потоков. Диссертация кандидата технических наук. - Рига, 1988.
- 2.43. Ильин И.Н., Блумберга Д.М., Гришин В.А., Попов П.Я., Рубина М.А., Якушин О.А. Об эффективности контактных теплообменников с активной насадкой// Промышленная энергетика. - 1986. - №8.
- 2.44. Blumberga D., Veidenbergs I. Zemes siltums ienāk mājā // Zinātne un Tehnika.- 1986. - № 2.
- 2.45. Блумберга Д., Вейденберг И., Лаудис А. Эффективность работы тепловых насосов в системе теплоснабжения // Сб. тез. докл. XXX студ. научной конференции.-Таллин, 1986.
- 2.46. Блумберга Д., Бажбауэр Я., Вейденберг И., Ворп Х. Экспериментальное исследование подземного теплообмена при использовании тепловых насосов // Повышение эффективности использования топлива в народном хозяйстве. Т. 1.-Рига, 1990.

- 2.47. Пехович А., Жидких В. Расчеты тепловых режимов твердых тел.- Ленинград, 1976.
- 2.48. Лыков А. Теория теплопроводности.-Москва, 1967.
- 2.49. Куртнер Д., Чудновский А. Гидрометеорологические основы тепловой мелиорации почвы.- Ленинград, 1979.
- 2.50. Блумберга Д., Бажбауэр Я., Вейденберг И. Экспериментальное исследование грунта как источника теплоты // Сб. тез. докл."Основные направления и опыт использования нетрадиционных источников энергии в народном хозяйстве".-Душанбе, 1988.
- 2.51. Баскина М., Блумберга Д., Вейденберг И. Динамика изменения влажности грунта // Сб. тез. докл. XXVIII студ. научной конференции.- Минск, 1984.
- 2.52. Баскина М., Блумберга Д., Вейденберг И. Изотермический массоперенос в песчаном грунте // Сб. тез. докл. XXIX студ. научной конференции.-Каунас, 1985.
- 2.53. Кулик М., Синельщикова В. Сельскохозяйственная метеорология.- Ленинград, 1966.
- 2.54. Блумберга Д., Вейденберг И., Бажбауэр Я. Экспериментальное исследование теплопроводности грунта // Теплопроводность и диффузия.-Рига, 1988.
- 2.55. А.С. 1170230, СССР, МКИ, F24 D11/02. Система теплоснабжения/ Блумберга Д., Вейденберг И., Грейвулис Я. и др. - Заявл. 21.07.83; №3626026/30-15. Оpubл. 30.07.85. Бюл.№28.
- 2.56. Роддатис К., Полтарецкий А. Справочник по котельным установкам малой производительности.-Москва, - 1989.

3. ENERGOEFEKTIVITĀTES EKONOMISKIE ASPEKTI

Izvērtējot jaunas tehnoloģiskās shēmas un iekārtas, energosaimniecības vadītājam ir iespēja lietot dažādas inženiertehniskās analīzes metodes, lai aplūkotu viena vai otra priekšlikuma priekšrocības un trūkumus un nolemtu ieviest jauno vai nē.

Ļoti bieži praksē nākas salīdzināt atšķirīgus tehniskos risinājumus ar dažādiem kapitālieguldījumiem un iekārtu darbināšanas un apkalpošanas izdevumiem. Bez tam laika ritumā mainās kurināmā un elektroenerģijas cenas, tehnoloģijas kļūst modernākas, izmainās arī ekonomiskie apstākļi valstī.

Lai izvērtētu un izdarītu slēdzienus, nepietiek ar labām inženiertehniskajām zināšanām vien. Energosaimniecības vadītājam jālieto dažādas ekonomiskās analīzes metodes, jāprot prognozēt ietekme uz apkārtējo vidi un jāspēj arī pārvarēt psiholoģiskos šķēršļus.

3.1. IZMAKSAS

Jebkurš pasākums, kas tiek īstenots dzīvē, prasa ieguldījumus, bet, savukārt, to lietošanas ekonomiskais pamatojums atkarīgs no sagaidāmā naudas ietaupījuma. Izmaksas, kas saistītas ar energoekonomiju, ir šādas:

- sākotnējie ieguldījumi (biznesa plāna izstrādāšana, projekta dokumentācija un kapitālieguldījumi);
- primāro energoresursu izmaksas (kurināmais, elektroenerģija);
- citi ekspluatācijas izdevumi (apkalpošana, uzturēšana, materiāli, darbs, servisa pakalpojumi, noliktava, remontī).

3.1.1. Kapitālieguldījumi

Kapitālieguldījumi jaunu iekārtu un tehnoloģisko līniju iegādei un uzstādīšanai vispārējā gadījumā var būt definēti kā izmaksas ražošanas nodrošināšanai, no kurām peļņu varētu iegūt garā laika periodā. Energoekonomijas pasākumu realizācijai parasti tiek pieprasīti kredīti - sākuma ieguldījumiem jaunām iekārtām, lai sasniegtu nospraustos mērķus energoefektivitātes paaugstināšanā. Par to, cik projekts ir veiksmīgs, spriež pēc ietaupījuma vērtības lieluma naudas izteiksmē. Faktiski tas rāda, kā samazinās primāro energoresursu izmaksas un dažos gadījumos - arī ekspluatācijas izdevumi. Jebkura projekta pamatnosacījums ir, ka ietaupījumiem sākotnējās izmaksas jānosedz iespējami īsā laikā.

Latvijā šobrīd veiksmīgi tiek realizēti dažādi katlu māju rekonstrukciju projekti. Visplašāko atzinību guvuši tie, kuros aizstāts dārgais importētais kurināmais - mazuts, dīzeļdegviela un dabas gāze ar vietējo kurināmo - koksnes šķeldu vai zāģu skaidām.

Cits energoekonomijas projektu virziens ir enerģijas zudumu samazināšana, nomainot esošo iekārtu daļēji vai pilnībā, pie kam pirmajā gadījumā veicot palikušo elementu rekonstrukciju.

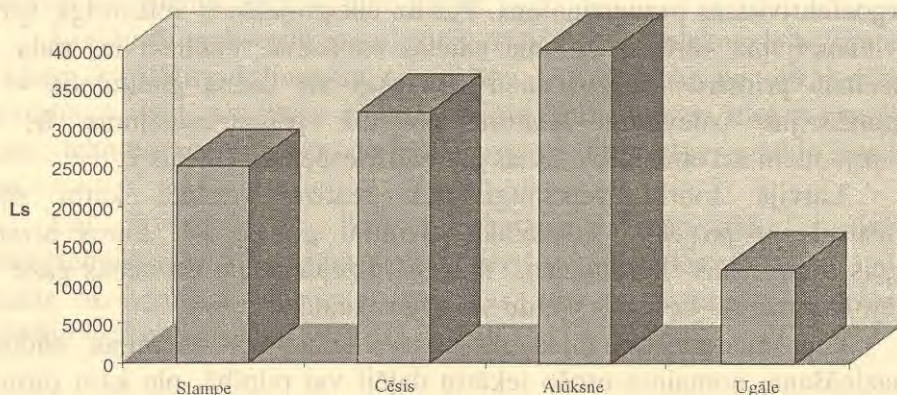
Pamazām attīstās arī energoefektīvu tehnoloģisko līniju veidošana.

Ieskatu par kapitālieguldījumu lielumiem varētu sniegt realizēto projektu dati, kuri atspoguļo situāciju, kāda veidojas siltuma avotos, enerģijas sadales sistēmās un patērētājos pēc rekonstrukcijas projektu ieviešanas. Piemēram, plānoto kapitālieguldījumu absolūtās vērtības Latvijas četrās katlu mājās realizētajos kurināmā nomaiņas projektos (1994. gadā NUTEK programmas "Videi piemērotas energosistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā" ietvaros) ir parādītas 3.1. attēlā [3.1.].

Projektu kapitālieguldījumi atšķiras vairāku iemeslu dēļ: dažādas katlu jaudas, iegādātās iekārtas, uzstādīšanas darbu apjomi.

Projektu realizācijas prakse rāda, ka plānotie kapitālieguldījumi atšķiras no reālajām kapitālizmaksu vērtībām, pie kam tie var būt gan lielāki, gan mazāki. Tas liecina par izmaiņām tenderu pieteikumu izstrādāšanas laikā, par iespējām palielināt vietējā, t.i., lētākā darbaspēka

ieguldījumu projekta realizācijā. Piemēram, Cēsu rajonā Jāņmuižas lauksaimniecības skolas katlu mājas rekonstrukcijas projekta kapitālizmaksas samazinājās par 15% (45 tūkstošiem latu). Tas panākts, galvenokārt pateicoties projekta vietējā vadītāja un katlu mājas īpašnieka zināšanām un organizatoriskajām dotībām, kā arī maksimālai vietējo ražojumu izmantošanai un vietējo speciālistu iesaistīšanai projektā.



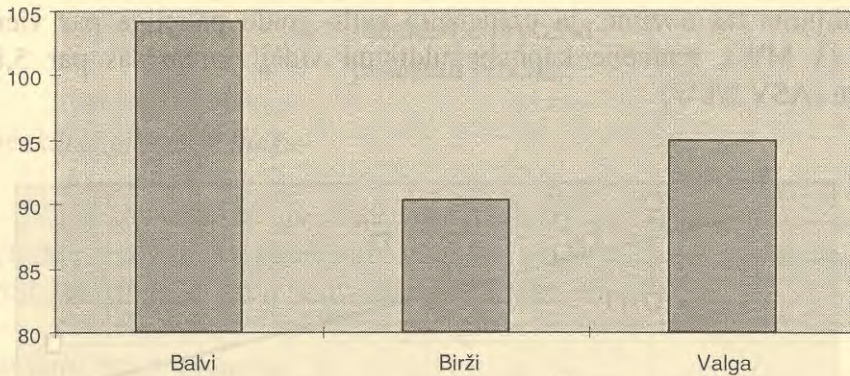
3.1. att. Plānotie kapitālieguldījumi šķeldas projektiem.

Aplūkojot absolūtās kapitālieguldījumu vērtības, grūti salīdzināt projektus savā starpā. Lai atvieglotu plānoto kapitālieguldījumu noteikšanu, kā arī projektu realizācijas priekšlikumu izvērtēšanu, var noteikt īpatnējos kapitālieguldījumus - kapitālizmaksas, kas attiecinātas pret uzstādīto jaudu.

Pirmo trīs NUTEK programmas ietvaros Baltijas valstīs realizēto katlu māju šķeldas projektu īpatnējo kapitālieguldījumu salīdzinājums grafiski atspoguļots 3.2. attēlā. Biržu katlu mājā ir vislielākais katls (8MW) un vismazākās īpatnējās kapitālizmaksas. Savukārt Balvos ir otrādi. Vērojamas likumsakarības: īpatnējie kapitālieguldījumi ir proporcionāli uzstādītajai katlu jaudai.

Lai prognozētu katlu māju rekonstrukcijas kapitālizmaksas projektu priekšstadijā Latvijā, tiek piedāvāts regresijas vienādojums, kurš iegūts statistisko datu apstrādes rezultātā [3. 2.]. Tas aplūkots nedaudz vēlāk.

ASV \$/kW



3.2. att. Īpatnējie kapitālieguldījumi pirmajos NUTEK šķēldas projektos Baltijas valstīs.

NUTEK un ERAB programmu ietvaros Latvijā realizēto katlu māju rekonstrukciju projektu īpatnējo kapitālieguldījumu izmaiņas atkarībā no uzstādītās jaudas parādītas 3.3. attēlā.

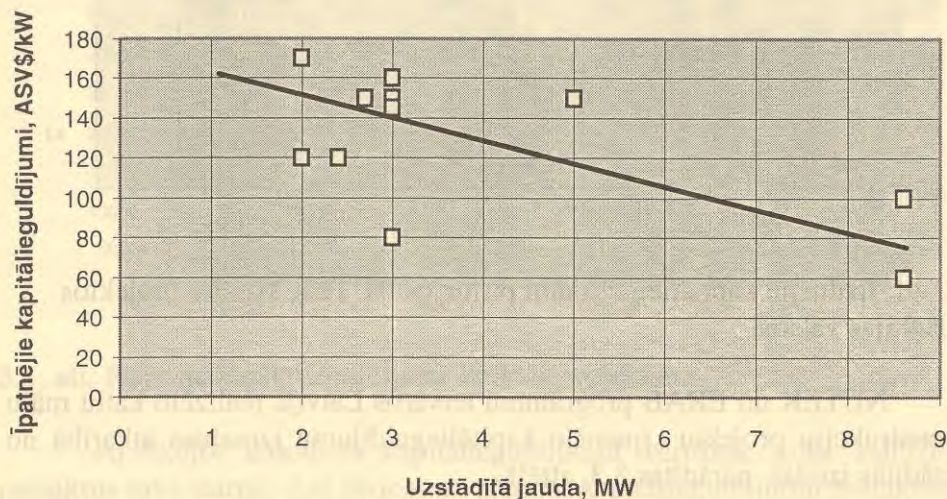
Iegūto datu regresijas analīze rāda, ka starp īpatnējiem kapitālieguldījumiem (atkarīgais mainīgais) un uzstādīto katlu jaudu (neatkarīgais mainīgais) vērojama apmierinoša korelācija. Korelācijas koeficienta vērtība ir 0,62. Matemātiskās analīzes rezultātā iegūts lineārs vienādojums:

$$C = 161,24 - 5,87 E, \quad (3.1.)$$

kur C - atkarīgais mainīgais (īpatnējie kapitālieguldījumi, kas attiecināti uz uzstādīto jaudu, ASV \$/kW),

E - neatkarīgais mainīgais (uzstādītā jauda, MW),
 5,87 - slīpums (regresijas koeficients),
 161,24 - konstants lielums (noteikta īpatnējo kapitālieguldījumu vērtība).

Regresijas koeficients parāda, par cik vidēji izmainās īpatnējie kapitālieguldījumi, ja uzstādāmo katlu jaudu palielina par vienu vienību. Šajā gadījumā tas nozīmē: ja uzstādāmo katlu jaudu palielina par vienu vienību (1 MW), īpatnējie kapitālieguldījumi vidēji samazinās par 5,87 vienībām (ASV \$/kW).



3.3. att. Īpatnējie kapitālieguldījumi (ASV \$/kW) atkarībā no uzstādītās katla jaudas.

Formulas (3.1.) izmantošana ir ierobežota. To var lietot uzstādāmo katlu jaudas diapazonā no 2,0 MW līdz 8,8 MW. Izsmēļošāka informācija par iepriekšminētajiem projektiem sniegta [3.1., 3.2., 3.3.].

3.1.1.1. Kredīta procenti

Ja sākuma kapitālam nauda tiek aizņemta, tad kapitālieguldījumiem ir jāpieskaita procenti. Procentu maksa var būt divējāda:

- vienkāršie procenti;
- procentu procenti.

Vienkāršā procentu maksa

Tā ir noteikti procenti par aizdoto kapitālu. Maksu aprēķina vienošanās periodam, piemēram, vienam gadam, un kopējo procentu maksu atrod, sareizinot ar gadu skaitu, kad jāatdod kredīts.

Procentu procentu maksa

Šajā sistēmā procenti tiek maksāti katra perioda beigās, kuri pamatojas uz kopējo summu (kapitāls plus procentu izmaksa).

3.1. piemērs

Siera rūpnīca izlēmusi iegādāties energovadības datoru sistēmu un programmu nodrošinājumu. To cena un uzstādīšanas izdevumi ir 30 000 Ls.

1. variants

Banka aizdod naudu ar vienkāršo procentu maksu gadā 12% trīs gadu periodam. Noteikt kopējo summu, kas jāatmaksā bankai.

Kopējā summa, kas jāatmaksā bankai, būs:

sākuma summa + procentu maksa / gadā x gadu skaits šajā gadījumā

$$30\ 000\ \text{Ls} \times (3\ 600\ \text{Ls/gadā} \times 3) = 40\ 800\ \text{Ls}.$$

Šeit ikgadējā procentu maksa aprēķināta

$$12\% \text{ no } 30\ 000\ \text{Ls} = 3\ 600\ \text{Ls}.$$

Siera rūpnīcai - kredītaņēmējai nav svarīgi atmaksāt kredītu ātrāk nekā trīs gados, un pareizas organizācijas apstākļos tai tas var būt izdevīgi. Šajā gadījumā firmai var parādīties papildu līdzekļi gada laikā. Turpretī bankai tas nav izdevīgi, tādēļ biežāk lieto procentu procentu maksu.

2.variants

Banka aizdod naudu ar procentu procentu maksu gadā 12% trīs gadu periodam. Noteikt kopējo summu, kas jāatmaksā bankai.

Kopējā summa, kas jāatmaksā bankai, jāaprēķina katram gadam atsevišķi:

- kopējā atmaksa 1.gada beigās

$$\begin{aligned} &\text{kapitāls} + \text{procentu maksa} \\ &30\ 000\ \text{Ls} + 3\ 600\ \text{Ls} = 33\ 600\ \text{Ls}; \end{aligned}$$

- kopējā atmaksa 2.gada beigās

$$\begin{aligned} &1.\text{gada atmaksa} + \text{procentu maksa } 1.\text{gada atmaksai} \\ &33\ 600\ \text{Ls} + (0,12 \times 33\ 600)\ \text{Ls} = 37\ 632\ \text{Ls}; \end{aligned}$$

- kopējā atmaksa 3.gada beigās

$$37\ 632 \text{ Ls} (0,12 \times 37\ 632) \text{ Ls} = 42\ 148 \text{ Ls.}$$

Šī summa ir lielāka nekā pirmajā variantā, un firma ir ienteresēta atmaksāt regulāri (mēnesī, gadā). Par to tiek noslēgta vienošanās starp banku un firmu.

3.1.1.2. Vērtības krišanās

Praksē nācies sastapties ar gadījumiem, kad grūti paredzēt perspektīvo attīstību. Īpaši tas attiecas uz laiku Latvijā pēc neatkarības atgūšanas. Dažreiz neiespējami bija prognozēt siltumapgādes sistēmu tālāko attīstību pilsētā, dzīvojamā rajonā, rūpniecības uzņēmumā. Tāpēc šobrīd rodas situācijas, kad pēc kāda laika firma, kura uzstādījusi modernas iekārtas, konstatē, ka tehnoloģiju neizmanto pilnībā. Tādēļ būtu nepieciešams daļu no iekārtām pārdot. Protams, ka iekārtas vērtība ir kritusies. Kā to aprēķināt, aplūkots nākošajā piemērā.

3.2. piemērs

Sūknis ir uzstādīts, lai apgādātu ar dzesēšanas ūdeni siltuma utilizācijas shēmu. Pēc 4 gadiem rūpnīcai sūknis vairs nav nepieciešams. Sākotnējās izmaksas uzstādītajam sūknim ir 60 000 Ls. Noteikt sūkņa vērtību pēc četriem gadiem.

1. variants

Vērtības krišanās ir noteikta 10 000 Ls/gadā.

Pēc četriem gadiem kopējā vērtības krišanās ir

$$4 \times 10\ 000 \text{ Ls} = 40\ 000 \text{ Ls.}$$

Pašreizējā (saglabātā) vērtība ir:

sākotnējā vērtība - vērtības krišanās

$$60\ 000 - 40\ 000 = 20\ 000 \text{ Ls.}$$

2. variants

Vērtības krišanās ir noteikta 20% gadā.

Pašreizējo vērtību var aprēķināt ar vienādojumu:

$$\text{pašreizējā vērtība} = \text{sākotnējais kapitāls} \times (1 - L/100)^N,$$

kur L - vērtības krišanās mērs, %;

N - lietošanas gadu skaits.

Pašreizējā vērtība ir aprēķināta tabulā.

3.1. tabula

Aprēķinu rezultāti

Gads	Vērtība gada sākumā, Ls	20% vērtības krišanās, Ls	Atlikums
1.	60 000	12 000	48 000
2.	48 000	9 600	38 400
3.	38 400	7 680	30 720
4.	30 720	6 144	24 576

3.1.2. Primāro energoresursu izmaksas

Energoresursu cenas un izmaksas ir grūti noteikt vairāku iemeslu dēļ:

1. Lielie rūpniecības uzņēmumi ir labākā situācijā, jo tie patērē lielāku kurināmā daudzumu un tāpēc var vienoties ar piegādātāju par zemākām cenām nekā mazie energopatērētāji. Tāda ir arī pasaules pieredze ar energoresursu cenām. Savukārt, Latvijā pagaidām enerģijas cenu politika vēl neatbilst šādiem modeļiem.

2. Kurināmā iegūšanas metode un vieta ietekmē cenas. Latvijā tas vairāk attiecas uz koksnes šķeldu: jo kvalitatīvāks izejmateriāls, jo tālāk jātransportē, jo dārgāks. Citās valstīs kurināmā cenu ietekmē citi nosacījumi. Piemēram, Anglijā tas vairāk attiecināms uz oglēm un gāzi: jo dziļāk atrodas ogles zem zemes, jo tās ir dārgākas.

3. Tirgus pieprasījums pēc kurināmā nosaka tā cenu. (80.gados tika novērota šķidrā kurināmā cenas krišanās. Tas izraisīja dabas gāzes cenas pieauguma tendenci.)

Energoresursu cenas rūpnieciskajiem patērētājiem Latvijā [3.4.] mainās ne tikai plašā diapazonā, bet mainās arī laikā. Apkures sezonas laikā kurināmā cenas ir augstākas nekā vasarā. Šeit piemēra nolūkā aplūkotas energoresursu vērtības 1994. gadā Latvijā, kuras apkopotas 3.2. tabulā. Salīdzinājumam pievienotas energoresursu cenas Anglijā [3.5.].

Jāatzīmē, ka cenu dažādība ir noderīga tirgus ekonomikas apstākļos, un, apspriežoties ar piemērotu piegādātāju, diskusijas varētu kalpot virzībai uz enerģijas tarifu regulēšanu. Nedrīkst aizmirst, ka kurināmā un elektroenerģijas izmaksas ir iekārtu ekspluatācijas izdevumu galvenā sastāvdaļa.

3. 2. tabula

Energoresursu cenas rūpniecības energopatērētājiem Latvijā [3.4.] un Anglijā [3.5.].

Kurināmais	Kurināmā cena Anglijā 1990. gadā	Kurināmā cena Latvijā 1994. gadā
El. enerģija	0.05 £/ kWh	0,037 Ls /kWh
Dabas gāze	122 £/ 1 000 m ³	55 ... 65 Ls / 1 000 m ³
Šķidrāis	110 £/tonna	65 ... 90 Ls / tonna
Ogles	65 £/tonna	23 ... 33 Ls / tonna

3.3. piemērs

Papīra un celulozes rūpnīca tehnoloģiskajām vajadzībām viena gada laikā patērē

elektroenerģiju	20 000 MWh ;
dabas gāzi	9 miljoni m ³ .

Pašlaik uzņēmums elektroenerģiju pērk un siltuma enerģiju ražo katlā, sadedzinot dabas gāzi. Uzņēmuma vadība nolēmusi samazināt enerģijas izmaksas, uzstādot dīzeļģeneratoru, tādā veidā - paši ražojot gan elektroenerģiju, gan siltumu. Plānotais šķidrā kurināmā patēriņš dīzeļģeneratoram ir 5 tūkstoši tonnu gadā.

Noteikt kurināmā izmaksas abos gadījumos.

1. variants

Pašreizējā sistēma:

elektroenerģijas izmaksas (20 000 x 1 000) x 0,037 =	740 000 Ls;
dabas gāzes izmaksas 9 000 x 65	= 585 000 Ls.
Kopējās energoresursu izmaksas	1 325 000 Ls.

2. variants

Dīzeļģeneratorā patērētā kurināmā izmaksas

$$5 \times 10^3 \times 90 = 450\,000 \text{ Ls.}$$

Tādad ietaupījums, kas saistīts ar kurināmā un elektroenerģijas izmaksām, salīdzinot 1. un 2. variantu, ir:

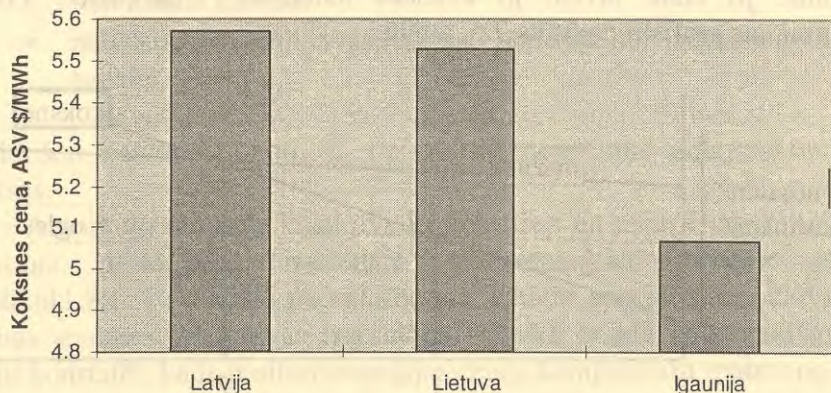
$$1,325 - 0,45 = 0,875 \text{ miljoni Ls.}$$

Abos variantos aplūkoti tikai ar energoresursiem saistītie izdevumi, neņemot vērā pārējos izdevumus. Šis piemērs varētu kalpot tikai ekonomiskās analīzes priekšstadijai, lai izprastu ieguldījumu lietderību.

3.1.2.1. Koksnes šķeldas izmaksas

Latvijas valstiskās neatkarības atgūšana likusi pārvērtēt ekonomiskās attīstības iespējas: to starpā arī mainījusies attieksme pret vietējo energoresursu izmantošanu. Enerģētiskā koksne arvien drošāk ieņem savu vietu Latvijas energosaimniecībā.

Viens no būtiskākajiem argumentiem tās turpmākajā izmantošanā ir tāds ekonomiskais rādītājs kā koksnes cena.



3.5. att. Šķeldas cenas 1994. gada janvārī Baltijas valstīs pirmajos trīs katlu māju NUTEK programmas projektos [3.3.].

Koksnes šķeldas cenu prognozes ļoti bieži ir atšķirīgas:

- pesimistiskās - paredz to izmaksu celšanos 10 reizes,

- optimistiski noskaņotie speciālisti cer, ka mežu tīrīšanas darbu intensifikācija tirgus apstākļos palielinās šķeldas piegādātāju konkurenci un cenas paaugstinājums būs neliels.

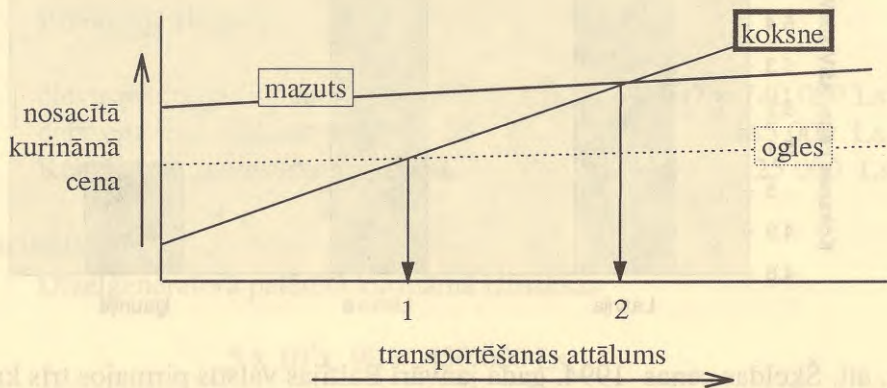
Lai būtu iespējams salīdzināt pašreizējo situāciju šķeldas tirgū Baltijas valstīs, trīs pirmo NUTEK programmas realizēto projektu kurināmā izmaksas parādītas 3.5. attēlā.

Vislētākā šķelda šobrīd tiek izmantota Jānmuižas lauksaimniecības skolas katlu mājā - 1,2 Ls/ ber. m³.

Pēc vācu speciālistu domām, koksnes šķeldas cena Latvijā tuvākajos gados varētu sasniegt 5 ... 10 Ls/ CM m³ [3.7.].

Visprecīzāko atbildi par koksnes cenām sniegs laiks.

Enerģētiskās koksnes cenas ir atkarīgas no tās transportēšanas attāluma: jo tālāk jāved, jo koksnes izmaksas - dārgākas. Vispārējā gadījumā tas grafiski parādīts 3.6. attēlā.



3.6. att. Kurināmā cenu atkarība no transportēšanas attāluma.

Transportējot koksni lielos attālos, iespējams sasniegt tik būtisku koksnes cenas pieaugumu, ka tās vērtība pārsniedz gan ogļu, gan mazuta cenas. Attēlā parādīts, kā grafiski noteikt ekonomiski pamatotu koksnes

transportēšanas attālumu. Punkts 1 atbilst transportēšanas attālumam, kurā koksnes cena izlīdzinās ar ogļu cenu, bet punkts 2 - ar mazuta cenu.

Dažādu kurināmo vienlaicīgas izmantošanas jautājumi katlu mājās aplūkoti nedaudz vēlāk 3.2.1.2. nodaļā.

3.1.3. Eksploatācijas izdevumi

Tie ir izdevumi, kas saistīti ar iekārtu un tehnoloģisko līniju eksploatāciju. Ražošanas izdevumi iedalāmi divās grupās:

- tiešajos - izejmateriāli, enerģijas izmaksas (tās ir atšķirīgas no kurināmā izmaksām), iekārtu apkalpošana, eksploatācija un uzturēšana kārtībā;
- netiešajos - noliktavas, noma, nodokļi, arī administrācija un sadale.

Pēdējie šeit netiks aplūkoti, jo tie būtiski neietekmē energoekonomijas izmaksas.

Autore un radošais kolektīvs Rūpniecības un enerģētikas ministrijas uzdevumā 1993. gadā izstrādāja siltumenerģijas cenas aprēķina metodiku [1.8.]. Tā domāta pašvaldību enerģētikas speciālistiem katlu māju darbības analīzei. Metodikas izstrādāšanas laikā veiktā datu analīze deva iespēju konstatēt, kāds ir siltumenerģijas cenas komponentu īpatsvars. Katlu mājas eksploatācijas izmaksu galvenā sastāvdaļa ir kurināmais: 65 ... 85% no saražotās enerģijas pašizmaksas. Eksploatācijas izdevumu sastāvdaļas Latvijas katlu mājās noteiktas, izstrādājot siltuma enerģijas cenas metodiku. Tie pamatojas uz 1991./92. un 1992./93. gada apkures sezonu statistisko datu analīzi. Eksploatācijas izdevumu komponenti tad bija šādā apjomā:

- | | |
|------------------------------------|-------|
| • elektroenerģijas izmaksa | 8,0%; |
| • algas un sociālie nodokļi | 5,0%; |
| • amortizācija un remonta izdevumi | 3,0%; |

- pārējās izmaksas 2,5% .
Kopā 18,5%.

Šobrīd daudzās Latvijas katlu mājās atsevišķu ekspluatācijas izdevumu sastāvdaļu īpatsvars pieaudzis gan tādēļ, ka izmantotas investīcijas, gan arī tādēļ, ka pieaugušas algas un citas izmaksas.

3.1.4. Pastāvīgās un mainīgās izmaksas

Izmaksu klasifikāciju var veikt arī pēc citām pazīmēm. Piemēram, pēc to izmaiņu rakstura izmaksas iedala:

- pastāvīgās (fiksētās) izmaksas - nav atkarīgas no rūpniecības uzņēmumā saražotās produkcijas (noma, procenti, nodokļi, apdrošināšana);
- mainīgās izmaksas - mainās līdz ar saražotās produkcijas apjomu (kurināmais, elektroenerģija, iekārtu ekspluatācija, uzturēšana, darbs).

Kopējās izmaksas ir pastāvīgo un mainīgo summa. Kopējās izmaksas mainās līdz ar produkcijas apjoma pieaugumu vai samazinājumu. Ļoti bieži energoekonomijas pasākumu ekonomiskajam salīdzinājumam un izvērtējumam tiek meklētas sakarības starp saražoto produkciju un enerģijas patēriņu piedāvātajiem variantiem.

3.4. piemērs

Metālapstrādes rūpnīcā iekārtu uzstādītā elektriskā jauda ir 1000 kW. Elektroenerģiju uzņēmums šobrīd pērk par 0,037 Ls/kWh no LATVENERGO. Kā alternatīvu pašreizējai situācijai rūpnīca nolēmusi

elektroenerģijas ražošanai iegādāties dīzeļdzinēju. Dzinēja vērtības krišanās ir 56 000 Ls/gadā un ražošanas izmaksas ir 0,023 Ls/kWh.

Noteikt minimālo darba stundu skaitu gadā, kas nepieciešams, lai būtu ekonomiski izdevīgi uzstādīt dīzeli.

Gada izmaksas ir atšķirīgas:

- gadījumā, ja pērk elektroenerģiju,

$$C_1 = 1\,000 \times 0,037 \times n, \text{ Ls,}$$

kur n - darba stundu skaits gadā;

- gadījumā, ja strādā dīzeli,

$$C_2 = 56\,000 \text{ Ls} + (1\,000 \times 0,023 \times n), \text{ Ls.}$$

Atrisinot vienādojumu sistēmu, iegūst:

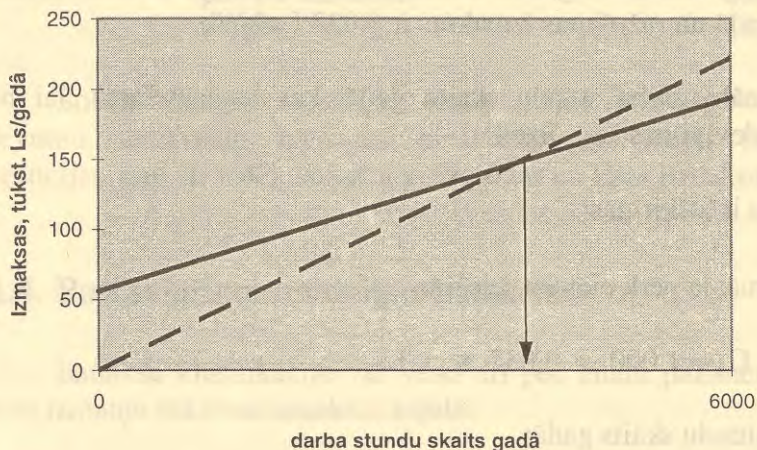
$$37n = 56\,000 + 23n$$

$$n = 4\,000 \text{ st.}$$

Zinot, ka gadā ir 8 760 st, var teikt, ka katru dienu dīzelim jāstrādā 11 st.

Attēlojot izmaksu izmaiņas laikā grafiski (skat. 3.7. attēlu), katru gadījumu ilustrē atšķirīga taisne:

- pirmajā gadījumā taisne ($C_1 = a_1 \cdot n$) sākas koordinātu krustpunktā;
- otrajā - taisne ($C_2 = a_2 \cdot n + b_2$) sākas punktā, kas raksturo pastāvīgās izmaksas, kuras nekad nebūs vienādas ar nulli: $b_2 > 0$, šajā piemērā pastāvīgās izmaksas ir 56 000 Ls/gadā.



3.7. att. Divu variantu izmaksu salīdzinājums:

- - elektroenerģijas pirkšanas gadījumā;
 ————— - dīzeļa darbināšanas izmaksas.

Šajā zīmējumā redzami divi būtiski energoekonomijas projektu vērtēšanas momenti:

1. Ja iekārtu darbības laiks atrodas pa kreisi no taisņu krustpunkta, tad uzņēmumam lētāk ir pirkt elektroenerģiju.
2. Dīzeļa uzstādīšanas gadījumā energoefektivitātes uzlabošanas pasākumus ietekmē tikai mainīgās izmaksas.

3.2. IEGULDĪJUMU IZVĒRTĒŠANAS METODES

Energoefektivitātes paaugstināšanas projektu realizēšanas ekonomiskā puse vienmēr ir saistīta ar jautājumu: kura ir visefektīvākā kapitāla ieguldīšanas izvērtēšanas metode tieši šāda veida projektos.

Pamatprasība, kurai jāatbilst šai metodei, ir tāda, ka jāņem vērā visas izmaksas, kas attiecas uz projektu, un jādod vienkārša atbilde par to, kuri pasākumi ir vispieņemamākie, lai enerģētikas speciālisti uzņēmumā varētu precīzi izanalizēt, kurš virziens ir pareizākais.

3.2.1. Izmaksu efektivitāte

Realizējot energoefektivitātes uzlabošanas pasākumus, būtiski ir ne tikai finansiālie un ekonomiskie aspekti. Viens jautājums ir izmaksas un to absolūtie lielumi, bet tas nav pietiekami, lai spriestu par veikto ieguldījumu ekonomisku pamatojumu. Tam nepieciešama tālāka analīze.

Izmaksas varētu klasificēt un iedalīt šādās grupās:

1. *Tiešo ieguldījumu izmaksas* - tās izmantotas iekārtu iegādei, kuras nepieciešamas projektu īstenošanai.
2. *Vidutāju organizāciju izdevumi* - tos sedz bankas, starptautiskas organizācijas un dažādu valstu fondi, lai realizētu energoefektivitātes uzlabošanas programmas. Latvijā tādas ir realizētas ar ASV Starptautiskās attīstības palīdzības fonda (USAID), Pasaules bankas, Eiropas rekonstrukcijas un attīstības bankas (ERAB) un Zviedrijas Rūpniecības un enerģētikas attīstības pārvaldes (NUTEK) palīdzību.
3. *Ikgadējās kredīta atmaksas* - pēc projekta realizācijas (dažreiz jau tā veikšanas gaitā) jāatmaksā ne tikai kapitālieguldījumiem izlietotie līdzekļi, bet arī kredīta procenti.
4. *"Riskā" maksa* - vienmēr jārēķinās ar neprognozējamiem apstākļiem, kuri vai nu aizkavē kredīta atdošanu, vai arī padara to par neiespējamu.
5. *Novērstās izmaksas* - projekta realizācijas rezultātā izdodas samazināt (izvairīties no tiem) dažādus maksājumus, kas saistīti gan ar siltuma enerģijas ražošanas izmaksu samazināšanos, gan ar atteikšanos no jaunu iekārtu uzstādīšanas. Pēdējā gadījumā, uzlabojot energoefektivitāti, nav jāuzstāda papildus enerģiju ģenerējošas jaudas. Savukārt, siltuma

enerģijas ražošanas izmaksas kļūst mazākas kurināmā patēriņa, kā arī iekārtu darbības un apkalpošanas izdevumu samazinājuma dēļ.

3.2.1.1. Izmaksu efektivitātes vērtējums

Ieguldījumu efektivitāti izmērit ir grūti. Izmaksu efektivitāte jāaplūko dažādos līmeņos, kuri attiecas gan uz cilvēces izdzīvošanu, gan guvumu vienas valsts robežās, gan arī uz pasākuma realizētāja tiešo peļņu. Kritēriji, kuri ļautu spriest par tiem, varētu būt vairāki:

- atmaksāšanās laiks;
- ieguldījumi, kas attiecināti uz ogļskābās gāzes izmešu samazinājumu, Ls / t CO₂ vai Ls / t CO₂ / gadā;
- finansiālā rentabilitāte - ietaupījums, kuru gūst īpašnieks;
- ekonomiskā rentabilitāte - ietaupījums valsts līmenī.

Piemēram, "Videi piemērotas energosistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā" programmas ietvaros Baltijas valstīs realizētie kurināmā nomaņas projekti ietekmē siltumnīcas efektu izraisošās ogļskābās gāzes izmešu līmeņa izmaiņas. Kapitālieguldījumu efektivitāte šajā gadījumā jānosaka, attiecinot kopējās izmaksas pret CO₂ izmešu samazinājumu gadā. Šajos projektos vidējais rādītājs ir 7 ASV \$ / t CO₂ / gadā. Tas liecina, ka no šī viedokļa kurināmā nomaņas projekti ir efektīvi, jo enerģētikas un vides speciālisti vērtē pozitīvi visus tos projektus, kuriem šis rādītājs nepārsniedz 10 ASV \$ / t CO₂ / gadā [3.9.].

Savukārt, finansiālo rentabilitāti var noteikt, pētot kredīta ietekmi uz saražotās enerģijas izmaksām. Kredīta izmantošana energoefektivitātes paaugstināšanas pasākuma realizācijai energoavotā izmaina saražotās enerģijas izmaksas struktūru. Šīs izmaksas tāpat ir atkarīgas no visiem iepriekšminētajiem faktoriem, tikai izmainās komponentu īpatsvars:

- pastāvīgo izmaksu komponents pieaug par lielumu, kas vienāds ar aizdevuma nomaksu un procentu likmi,
- samazinās mainīgā izmaksu sastāvdaļa, kas vienāda ar iekonomētajām kurināmā un elektroenerģijas izmaksām.

3.2.1.2. Izmaksu efektivitātes nenoteiktība

Izmaksu efektivitātes prognozēšana saistīta ar grūtībām, kuras izraisa apstākļu nenoteiktība gan projekta realizācijas brīdī, gan pēc tam. Kurš uzņemsies prognozēt aizdevuma procentus nākotnē? Latvijā pēdējo gadu laikā tas bijis plašā diapazonā no 7 ... 120%. Neskaidri ir arī ieguldījumi CO₂ izmešu līmeņa samazināšanā nākotnē. Katra projekta realizācija atspoguļo konkrētas izmaksu efektivitātes nenoteiktības.

Piemēram, kurināmā nomaiņas projektos nezināmie vai arī grūti nosakāmie lielumi ir vairāki:

- katla un katlu mājas slodze nākotnē;
- cenu izmaiņas kurināmajam nākotnē;
- katla vai katlu mājas dzīves ilgums;
- biomasas iegūšanas noturīga attīstība;
- katlu darbības efektivitātes rādītāji un kurināmā patēriņš pirms projekta realizācijas.

Pirmais un pēdējais rādītājs ir savstarpēji saistīti. Patiesās slodzes parasti cenšas izvērtēt pēc izlietotā kurināmā un pieslēgto patērētāju aprēķinātām slodzēm. Tā iemesla dēļ rodas lielas neprecizitātes, kas saistītas ar nepareizu jaudu izvēli jaunajai vai pārbūvējamajai iekārtai. Balstoties uz iepriekšējo gadu pieredzi, nav iespējams ņemt vērā psiholoģiskos momentus un dažreiz arī ekonomiskos apsvērumus, kuru rezultātā dažreiz tiek izmantoti kļūdaini sākuma dati.

Atšķirīgi ir izmaksu efektivitātes nenoteiktības rādītāji māju siltināšanas projektos:

- projekta tehniskā realizācija garam laika periodam (piemēram, dzīvojamās ēkas visam mūžam);
- ēkas enerģijas patēriņš pirms siltināšanas;
- uzlabots komforts ir svarīgāks nekā kurināmā ietaupījums;
- siltumapgādei izmantotā kurināmā nomaiņa vai dažādošana nākotnē;
- iekārtu darbināšanas izdevumu ietaupījumi siltuma avotā;
- siltumapgādes sistēmas nepieciešamās slodzes nākotnē.

3.5. piemērs

Pilsētā darbojas vairākas katlu mājas. Iekārtas tajās ir novecojušas. Lai paaugstinātu siltumapgādes sistēmas energoefektivitāti, nepieciešams veikt rekonstrukciju. Izvēlēti pieci varianti, kuri tālāk tiek analizēti. Pirmie četri varianti paredz divas katlu mājas pilsētā, bet pēdējais - vienu. Aprēķināts, ka gadā būs nepieciešams saražot jaunajā katlu mājā 46 120 MWh, bet apvienotajā - 67 450 MWh (5. variants). Kurināmie varētu būt divu veidu. To cenas ir:

- | | |
|-----------|----------------|
| • mazutam | 8,85 US\$/MWh; |
| • šķeldai | 6,00 US\$/MW. |

Variantu risinājumi atšķiras gan ar siltuma avota izvēli, gan siltuma tīklu rekonstrukcijas priekšlikumiem. Variantu vispārējs raksturojums:

1. variants

Pilsētai ir divas katlu mājas.

1. Tās ziemeļu daļu ar siltumu apgādā esošā katlu māja.
2. Pilsētas dienvidaustrumu nomalē tiek celta jauna katlu māja, kurā tiek uzstādīti:

1 ūdenssildāmais katls ar šķeldas apkuri - 8 MW

un

1 ūdenssildāmais katls ar mazuta apkuri - 8 MW.

3. Nepieciešams papildus uzstādīt siltuma trases cauruļvadu (2 km garumā), lai savienotu jauno katlu māju ar esošo centrālo siltuma mezglu.

2. variants

Pilsētai ir divas katlu mājas.

1. Tās ziemeļu daļu ar siltumu apgādā esošā katlu māja.

2. Pilsētas dienvidaustrumu nomalē tiek celta jauna katlu māja, kurā tiek uzstādīts:

1 ūdenssildāmais katls ar mazuta apkuri - 15 MW.

3. Nepieciešams papildus uzstādīt siltuma trases cauruļvadu (2 km garumā), lai savienotu jauno katlu māju ar esošo centrālo siltuma mezglu.

3. variants

Pilsētai ir divas katlu mājas.

1. Pilsētas ziemeļu daļu ar siltumu apgādā esošā katlu māja.

2. Esošajā centrālajā katlu mājā, kas atrodas pilsētas centrā un šobrīd apgādā ar siltumu dienvidu daļu, tiek uzstādīts:

1 ūdenssildāmais katls ar šķeldas apkuri - 15 MW.

3. Nepieciešams papildus uzstādīt siltuma trases cauruļvadu (1 km garumā), lai savienotu centrālo katlu māju ar esošo centrālo siltuma mezglu.

4. variants

Pilsētai ir divas katlu mājas.

1. Pilsētas ziemeļu daļu ar siltumu apgādā esošā katlu māja.

2. Esošajā centrālajā katlu mājā, kas atrodas pilsētas centrā un šobrīd apgādā ar siltumu dienvidu daļu, tiek uzstādīts:

1 ūdenssildāmais katls ar mazuta apkuri - 15 MW.

3. Nepieciešams papildus uzstādīt siltuma trases cauruļvadu (1 km garumā), lai savienotu centrālo katlu māju ar esošo centrālo siltuma mezglu.

5. variants

1. Pilsētai ir viena katlu māja - ar siltumu apgādā esošā, ziemeļu daļā izvietotā katlu māja, kurā papildus tiek uzstādīti:

ūdenssildāmais katls ar šķeldas apkuri - 8 MW

un

ūdenssildāmais katls ar mazuta apkuri - 10 MW.

2. Nepieciešams papildus uzstādīt siltuma trases cauruļvadus (4 km garumā), kas savieno pilsētas dienvidaustrumu daļu ar esošo centrālo siltuma mezglu, kā arī caurules, kas savieno pilsētas ziemeļu un dienvidu daļu.

Aprēķinu dati doti 3.3. tabulā.

3.3. tabula

Izmaksu analīze.

Izmaksas	Varianti				
	1	2	3	4	5
Kapitālieguldījumi, milj. ASV \$	4,4	1,9	4,3	1,4	4,9
Ikgadējā kapitālieguldījumu efektivitāte, ASV\$/MWh/gadā	95,4	41,2	93,2	30,3	73,1
Katlu mājas dzīves ilgums, gadi	15	15	15	15	15
Kapitālieguldījumu efektivitāte, ASV\$/MWh	6,36	2,75	6,21	2,02	4,87
Kredīta procenti, %/gadā	10	10	10	10	10

Kredīta izmaksas, ASV\$/MWh	9,54	4,12	9,32	3,04	7,31
Kurināmā izmaksas, ASV \$/MWh	6,5	8,85	6,5	8,85	7,08
Elektroenerģijas patēriņš, kWh/ MWh	11,14	10,4	11,14	10,4	11,1
Elektroenerģijas izmaksas, ASV\$/MWh	0,6	0,56	0,6	0,56	0,6
Nodarbināto skaits	8	4	8	4	8
Algas un sociālais nodoklis, ASV\$	28800	14400	28800	14400	28800
Algu efektivitāte, ASV\$/MWh	0,62	0,31	0,62	0,31	0,43
Nodokļi un citi izdevumi ASV\$/MWh	0,23	0,29	0,23	0,29	0,23
Katlu mājas darbināšanas izmaksas, ASV\$/MWh	7,72	9,72	7,72	9,72	8,11
Kopējās izmaksas, ASV\$/MWh	23,84	16,88	23,48	15,07	20,52

Aprēķni veikti pirmajam kredīta atdošanas gadam. Katrā nākošajā gadā kopējās izmaksas samazināsies, jo samazināsies kredīta atmaksas summa.

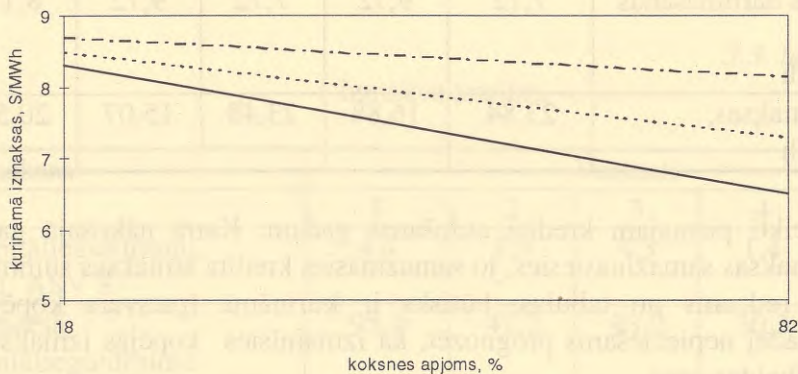
Kā redzams no tabulas, būtisks ir kurināmā īpatsvars kopējās izmaksās, tādēļ nepieciešams prognozēt, kā izmainīsies kopējās izmaksas, ja pieaugs šķeldas cena.

Katlu mājas nepārtrauktas darbības nodrošināšanai jāparedz divu veidu kurināmie: pamatkurināmais un rezerves. Katra kurināmā izmantošanas īpatsvars katlu mājas bilancē ir atkarīgs no dažādiem faktoriem, bet viens no būtiskākajiem ir kurināmā cena. Koksnes sastāvdaļas lieluma ietekme uz kurināmā izmaksas komponentu grafiski atspoguļota 3.6. attēlā. Šajā gadījumā paredzēts, ka kurināmā izmantošana varētu mainīties diapazonā:

no 18% koksnes šķeldas un 82% mazuta
līdz 82% koksnes šķeldas un 18% mazuta.

Kā redzams no liknēm 3.6. attēlā, šajā noteiktajā situācijā kurināmā izmaksu īpatsvars katlu mājas kopējās izmaksās pieaug līdz ar šķeldas cenas pieaugumu, pie kam tas kļūst minimāli atkarīgs no koksnes apjoma kurināmajā, ja šķeldas cena pieaug līdz 8 ASV\$/MWh. Tomēr nedrīkst aizmirst, ka, samazinoties koksnes daļai kurināmajā, pieaug vides piesārņojums ar kaitīgiem izmešiem.

Šeit parādītais grafiks (skat. 3.8.attēlu) un tā analīze attiecas uz noteiktām kurināmā cenu vērtībām un tas jāvērtē kā priekšlikums un rosinājums katrā konkrētajā gadījumā censties meklēt ekonomiski izdevīgāko dažādo kurināmo īpatsvaru kopējā katlu mājas bilancē. Atšķirīgu mazuta (ogļu) un koksnes cenu, kā arī to izmantošanas apjomu gadījumā jākonstruē jauns grafiks.



3.8. att. Kurināmā izmaksu atkarība no koksnes cenas un tās apjoma kurināmā bilancē:

- - koksnes cena 6,00 ASV\$/MWh;
- - koksnes cena 7,00 ASV\$/MWh;
- - - - - koksnes cena 8,00 ASV\$/MWh.

Mazuta cena paliek nemainīga - 8,85 ASV\$/MWh.

Sakarā ar to, ka iespējami dažādi aprēķinu varianti, kuri ļautu veikt pilnvērtīgu analīzi, nepieciešams turpināt izmaksu noteikšanu. Lai varētu tālāk analizēt ieguldījumu efektivitāti, kā arī izvērtēt kurināmo cenu, kredīta procentu un aizdošanas termiņu ietekmi, autore un radošais kolektīvs izstrādājuši katlu māju izmaksu analīzes datorprogrammu[3.10.].

Tas dod iespēju izvērtēt projektus, izmantojot netradicionālāku pieeju, un vispusīgāk analizēt kapitālieguldījumu, kurināmā, elektroenerģijas un algu īpatsvaru energoefektivitātes uzlabošanas pasākumos.

3.2.2. Izvērtēšanas metodes

Ekonomiskie novērtējumi ļauj finansiāli salīdzināt iespējamus ieguldījumus, kurus varētu izmantot uzņēmums vai pašvaldība energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu realizācijai.

Ekonomiskā vērtējuma uzdevums ir parādīt projekta ienākumus, salīdzinot ar kapitālieguldījumiem. Analizējot projektus, var lietot dažādus kritērijus, kurus ir lietderīgi izmantot konkrētos gadījumos, ievērojot katra priekšrocības un trūkumus. Energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumu realizācijas izmaksu finansiālo rentabilitāti var noteikt, izmantojot dažādas metodes:

- *Neto rentabilitāte jeb atmaksāšanās likme* (ARR - account rate of return). Ļoti vienkārša metode, bet tajā nav ietverts laika faktors.
- *Atmaksāšanās laiks* (Payback). Vienkārša metode, kuru parasti lieto kā kvalitatīvo rādītāju. Tajā mazliet pieskaras laika faktoram. Lietojama gadījumos, kad projekts atmaksājas īsā laikā (< 2,5 gadi).

- *Diskontētās naudas plūsma* (DCF - Discounted Cash Flow). Diskontēšanu lieto, lai aprēķinātu ieguldījumu peļņu.
- *Neto pašreizējā vērtība* (NPV - Net Present Value). Sarezģītāka metode, kura ļauj aplūkot energoekonomijas projektu ienākumus ilgākā laika periodā.
- *Iekšējā peļņa jeb iekšējā atmaksāšanās likme* (IRR - Internal Rate of Return). Sarezģīta metode, kura dod iespēju salīdzināt projektus, nosakot kādus aizņēmuma procentus ir lietderīgi izmantot.

3.2.2.1. Neto rentabilitāte (ARR)

Jebkura ekonomiskā vērtējuma pirmais solis ir noteikt projekta izmaksas un ieņēmumus, lai aprēķinātu naudas līdzekļu plūsmu, lai iegūtu informāciju par iztērēto un nopelnīto naudu katrā projekta īstenošanas gadā.

Naudas plūsmu aprēķina no datiem (izmaksu ekonomijas un iekārtas izmaksas), kuri mainās, ieviešot jauno projektu.

Skaidrās naudas plūsmas finansiālajai analīzei parasti lieto divus kritērijus:

- ieguldījumu neto ienākumi;
- gada vidējā neto rentabilitāte.

Dažreiz kā finansiālos kritērijus izmanto arī bruto ienākumus un rentabilitāti.

Gada vidējā neto rentabilitāte (pēc vērtības krišanās atskaitīšanas) ir gada vidējo neto ienākumu attiecība pret kapitālieguldījumiem. Tai vajadzētu uzņēmuma energosaimniecības vadītājam parādīt, kāds peļņas līmenis būtu panākams, ja ieguldītu līdzekļus energoefektivitātes uzlabošanas pasākumu realizācijā.

3.6. piemērs

Stikla šķiedras rūpnīcā nolemts ieguldīt energoefektivitātes paaugstināšanas pasākumos 36 000 Ls. Rūpnīcas energosaimniecības vadītājs sagatavojis trīs dažādus priekšlikumus, kuriem nepieciešami 36 000 Ls.

Noteikt gada vidējo neto rentabilitāti sešu gadu laikā.

1. Gada vidējie neto ienākumi 3000 Ls.

2. Kopējie ienākumi 18000Ls.

3. Ieguldījumu neto ienākumi
 $18000 \times 100 / 36000 = 50\%$.

4. Gada vidējā neto rentabilitāte
 $3000 \times 100 / 36000 = 8,3\%$.

Gada vidējās neto rentabilitātes aprēķini apkopoti 3.4. tabulā.

3.4.tabula

Naudas plūsma un rentabilitātes aprēķini.

Gads	Izmaksas	Projekts N°1	Projekts N°2	Projekts N°3
0	Kapitālieguldījumi,Ls	36000	36000	36000
1.	Neto ienākumi, Ls	3000	4800	1200
2.	Neto ienākumi, Ls	3000	4200	1800
3.	Neto ienākumi, Ls	3000	3600	2400
4.	Neto ienākumi, Ls	3000	2400	3600
5.	Neto ienākumi, Ls	3000	1800	4200
6.	Neto ienākumi, Ls	3000	1200	4800
Kopējais neto ienākums, Ls		18000	18000	18000
Gada vidējais neto ienākums, Ls		3000	3000	3000
Gada vidējā neto rentabilitāte, a, %		8,3	8,3	8,3

Šinī gadījumā nebūtu jādiskutē par to, vai 8,3% ir pieņemama peļņa. Piemērs detalizēti parāda metodes būtību, tās priekšrocības un trūkumus:

1. Tā ir vienkārši lietojama un dod ātru atbildi par rentabilitātes lielumu.
2. Redzams, ka visi trīs varianti dod vienu un to pašu vērtību, kaut arī laikā dažādu. Projekts N^o2 agrākos gados dod lielāku izmaksu ekonomiju. Tā varētu būt priekšrocība, ja tālākie ieguldījumi nepieciešami energoefektivitātes uzlabošanas pasākumiem.
3. Neto rentabilitātes metodē tiek ignorēts laika faktors. Tas ir metodes trūkums un rosina lietot šo metodi tikai kā kvalitatīvu indikatoru, pēc kura jāturpina detalizētāka izvērtēšana.

3.2.2.2. Atmaksāšanās laiks

Atmaksāšanās laiks - ir laika periods, kas nepieciešams, lai ekonomija, kas uzkrājas, kļūtu vienāda ar kapitālieguldījumiem. Tas palīdz atbildēt uz jautājumu par līdzekļu ieguldīšanas efektivitāti dažādos projektos un salīdzināt to savā starpā: jo īsāks ir atmaksāšanās laiks, jo labāks energoekonomijas projekta risinājums.

Atmaksāšanās laika izvērtēšanas metode šobrīd Latvijā tiek plaši lietota energoekonomijas programmās, kuras realizē USAID, NUTEK, ERAB, u.c. Piemēram, NUTEK katlu rekonstrukcijas projektos aprēķinātie atmaksāšanās laiki apkopoti 3.5. tabulā.

Šie dati ļauj spriest par katra risinājuma ekonomiskajām priekšrocībām. Tas ir kvalitatīvs rādītājs, un pēc aprēķinātā atmaksāšanās laika ilguma tiek spriests par projekta perspektīvām:

- ar īsu atmaksāšanās laiku (dažu mēnešu garumā) - priekšlikums jāturpina analizēt, izmantojot papildu informāciju;

3.5. tabula

Aprēķinātie atmaksāšanās laiki šķeldas projektiem Latvijā [3.3.].

Nr. p. k.	Katlu mājas īpašnieks	Katla jauda, MW	Atmaksāšanās laiks, gadi	Projekta apraksts
1.	Balvu "Enerģija"	2,4	4,5 ... 5,5	Tvaika katla priekškurtuve, kurināmā noliktava, dūmgāzu attīrīšanas iekārtas un dūmsūcēji, kurināmā padeves iekārtas
2.	Slampes pašvaldības katlu māja	3,0	5,0 ... 6,0	Tvaika katla priekškurtuve, kurināmā noliktava, dūmgāzu attīrīšanas iekārtas un dūmsūcēji, kurināmā padeves iekārtas un šķeldotājs
3.	Alūksnes pašvaldības katlu māja	5,0	4,5 ... 5,5	Jauns ūdenssildāmais katls, kurināmā noliktava, dūmgāzu attīrīšanas iekārtas un dūmsūcēji, kurināmā padeves iekārtas, šķeldotājs, ūdens sagatavošanas iekārtas, siltuma mezgls
4.	Jāņmuižas lauksaimniecības skola	3,0	5,0 ... 6,0	Jauns ūdenssildāmais katls, kurināmā diennakts noliktava, dūmgāzu attīrīšanas iekārtas un dūmsūcēji, kurināmā padeves iekārtas, šķeldotājs, ūdens sagatavošanas iekārtas, siltuma mezgls

5.	Ugāles pašvaldības katlu māja	3,0	1,5 ... 2,0	Esošās priekškurtuves rekonstrukcija, kurināmā noliktava, dūmgāzu attīrīšanas iekārtas un dūmsūcējs, šķeldas padeves iekārta, šķeldotājs.
----	-------------------------------	-----	----------------	---

- ar garu atmaksāšanās laiku (virs 8 ... 10 gadiem) - projekts jāuzskata par neveiksmīgu, un parasti tas tiek vai nu pārstrādāts vai atlikts.

Atmaksāšanās laiks dod atbildi kredīta ņēmējam uz diviem svarīgiem jautājumiem:

1. parāda, cik ilgi tīrā naudas plūsma būs negatīva - cik ilgi vajadzēs tērēt, vajadzēs meklēt līdzekļus pašā uzņēmumā;
2. palīdz novērtēt finansiālo risku; tie saistīti ar tirgus pieprasījumu un aizdevuma procentiem, - jo īsāks atmaksāšanās laiks, jo mazāks finansiālais risks.

Atmaksāšanās laiku parasti aprēķina ar attiecību:

$$\text{kapitālieguldījumi} / \text{gada vidējie neto ienākumi.}$$

Ja ikgadējie neto ienākumi ir atšķirīgi, tad precīzāks aprēķins būtu šāds:

$$\text{pilni gadi} + \text{kapitālieguldījumu izmaksu atlikums iepriekšējā gadā} / \text{pēdējā gada neto ienākumi.}$$

3.6. piemērs

Piena kombināts nolēmis izdalīt līdzekļus energoefektivitātes uzlabošanas pasākumu realizācijai 24 000 Ls apmērā. Izstrādāti trīs projekti šī mērķa īstenošanai.

Salīdzināt atmaksāšanās laiku visiem trim projektiem.

Neto ienākumi doti 3.6. tabulā.

3.6. tabula.

Naudas plūsmas aprēķini.

	Projekts N°1		Projekts N°2		Projekts N°3	
Kapitāl-ieguldījumi, Ls	24000		24000		24000	
Gadi	Neto ienākumi Ls	Tekošais kots, Ls	Neto ienākumi Ls	Tekošais kots, Ls	Neto ienākumi Ls	Tekošais kots, Ls
0	-24000	-24000	-24000	-24000	-24000	-24000
1.	+6000	-18000	+7200	-16800	+4800	-19200
2.	+6000	-12000	+6800	-10000	+5200	-14000
3.	+6000	-6000	+6400	-3600	+5600	-8400
4.	+6000	0	+5600	+2000	+6400	-2000
5.	+6000	+6000	+5200	+7200	+6800	+4800

Atmaksāšanās laiks katram projektam ir atšķirīgs.

1. Projektam N°1

$$24\ 000 / 6\ 000 = 4 \text{ gadi.}$$

2. Projektam N°2

$$3 \text{ gadi} + 3600 / 5600 = 3,6 \text{ gadi.}$$

3. Projektam N°3

$$4 \text{ gadi} + 2000 / 6800 = 4,3 \text{ gadi.}$$

Atmaksāšanās laika metodei ir dažas priekšrocības:

1. Metode ir ļoti vienkārša un ērti lietojama.
2. Tā izceļ projektus ar īsu atmaksāšanās laiku.

3. Nav nepieciešami papildu dati par projekta darbības (darba mūža) ilgumu, tā realizācijas laiku, kā arī aizdevuma procentiem.
4. Atšķirībā no neto rentabilitātes metodes, atmaksāšanās laika metode nedaudz pieskaras neto ienākumu sadalei laikā. Tomēr tas ir nepilnīgi.

Būtiskākie trūkumi šai metodei:

1. Projekta vērtība tiek novērtēta kopumā. Netiek aplūkota peļņa pēc atmaksāšanās laika beigām.
2. Neņem vērā naudas vērtības laika ietekmi.

3.2.2.3. Diskontētā naudas plūsma (DCF)

Atmaksāšanās metožu novērtējuma specifika ir tā, ka neviena no tām neļauj iegūt precīzu ienākumu sadalījumu laikā. Projekts, kurš dod lielāku izmaksu ekonomiju pirmajos gados, sekmē tālākus ieguldījumus citās shēmās.

Diskontētās naudas plūsmas metodē tiek mēģināts izsvērt ienākumu vērtības tieši no šī viedokļa. Tā balstās uz to, ka tiek ņemtas vērā procentu likmes.

Lai izvērtētu energoefektivitātes uzlabošanas projektu, jāņem vērā naudas vērtības izmaiņa laika gaitā. To izvērtē, lietojot diskonta faktoru, kas apraksta naudas samazināto vērtību gadu gaitā attiecībā pret pašreizējo vērtību. Diskontēšanā neņem vērā inflāciju. Diskonta faktoru izvērtē ar sakarību

$$DF = 1 / (1 + R/100)^N, \quad (3.2.)$$

kur R - diskonta procenti, %;

N - gadu skaits.

Diskonta faktora nozīme ir izvērtēt ienākuma vērtības samazināšanos projekta dzīves vēlākajos gados.

Diskontētās naudas plūsmas aprēķinos DF formulas vietā ērtāk izmantot tabulu datus. Diskonta faktors dažādām procentu likmēm 10 gadu laikā dots 3.7. tabulā.

Diskontēto naudas plūsmu, projektu realizējot, aprēķina, reizinot katra gada neto naudas ieņēmumus (izdevumus) ar diskonta faktoru šajā gadā. Tādējādi pašreizējā vērtība PV ienākumam N gados būs:

$$PV = S / (1 + R/100)^N, \quad (3.3.)$$

kur S - sākotnējais naudas sadalījums.

3.7. tabula

Diskonta faktora vērtība.

Gadi	Procenti							
	8%	10%	12%	14%	16%	18%	20%	22%
0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1.	0,926	0,909	0,893	0,877	0,862	0,847	0,833	0,820
2.	0,857	0,826	0,797	0,769	0,743	0,718	0,694	0,672
3.	0,794	0,751	0,712	0,675	0,641	0,609	0,576	0,551
4.	0,735	0,683	0,636	0,592	0,552	0,516	0,482	0,451
5.	0,681	0,623	0,567	0,519	0,476	0,437	0,402	0,370
6.	0,630	0,564	0,507	0,456	0,410	0,370	0,335	0,303
7.	0,583	0,513	0,452	0,400	0,354	0,314	0,279	0,249
8.	0,540	0,467	0,404	0,351	0,305	0,266	0,233	0,204
9.	0,500	0,424	0,361	0,308	0,263	0,225	0,194	0,167
10.	0,463	0,386	0,322	0,270	0,227	0,191	0,162	0,137

Diskontēšanu var piemērot arī iepriekš aplūkotajām metodēm: neto rentabilitātes un atmaksāšanās laika aprēķinos.

3.7. piemērs

Projekta realizācija gan 2., gan 5.gadā dod gada ietaupījumu 1500Ls.

Aprēķināt pašreizējo vērtību šiem ietaupījumiem pa gadiem, ja diskonta procenti ir 15%.

Ienākumu pašreizējā vērtība:

2.gadā

$$PV = 1500 / (1 + 0,15)^2 = 1\,134,22 \text{ Ls};$$

5.gadā

$$PV = 1500 / (1 + 0,15)^5 = 745,77 \text{ Ls}.$$

Diskontētās naudas plūsmas metodei galvenā priekšrocība ir tā, ka tiek ņemts vērā naudas vērtības laika efekts.

3.2.2.4. Neto pašreizējā vērtība (NPV)

NPV ļauj aplūkot, kā mainās neto ienākumi projekta dzīves laikā. Realizēta projekta pašreizējā vērtība tā darbības laikā palielinās, jo pieaug ienākumi, kas saistīti ar izmaksu ekonomiju. Tā ir energoefektivitātes uzlabošanas pasākuma pašreizējā bruto vērtība (PBV). Ja no PBV atskaita kapitālieguldījumu izmaksas, tad iegūst neto pašreizējo vērtību (NPV), kuru sauc arī par projekta atlikušo vērtību.

NPV ir finansiāls kritērijs, kas parāda naudas daudzumu, ko projekts nopelnīs vai kādi zaudējumi radīsies tā darbības laikā. Neto pašreizējā vērtība var būt gan pozitīva, gan negatīva:

- ja NPV ir ar mīnus zīmi, tad projektu var uzskatīt par neveiksmīgu un tas nav dzīvotspējīgs;
- ja NPV ir ar plus zīmi, tad ir iemesls projektu analizēt tālāk (nav ieteicams automātiski pieņemt lēmumu pozitīva NPV gadījumā) un jāaplūko citi faktori.

Parasti ekonomiskajos aprēķinos lieto vienu diskonta likmi. Diemžēl dzīvē mēdz būt vairākas likmes, un projekta realizācijas gaitā tās var mainīties. Neto pašreizējās vērtības papildu analīzei aprēķinā labāk izvēlēties nedaudz pesimistisku diskonta likmi.

3.8. piemērs

Linu kombināts nolēmis izdalīt līdzekļus energoefektivitātes uzlabošanas pasākumu realizācijai 12 000 ... 16 000 Ls apmērā. Šī mērķa īstenošanai izstrādāti trīs projekti. Neto ienākumu vērtības dotas 3.8. tabulā.

Noteikt NPV katram no trīs projektiem, ja diskonta vērtība ir 12%.
Aprēķinu dati par projektiem apkopoti 3.9. tabulā.

3.8. tabula.

Neto gada ienākumi.

Gads	Izmaksas	Projekts №1	Projekts №2	Projekts №3
0.	Kapitālieguldījumi, Ls	12000	12000	16000
1.	Neto ienākumi, Ls	+3000	+3600	+3500
2.	Neto ienākumi, Ls	+3000	+3400	+3750
3.	Neto ienākumi, Ls	+3000	+3200	+4000
4.	Neto ienākumi, Ls	+3000	+2800	+4250
5.	Neto ienākumi, Ls	+3000	+2600	+4500
6.	Neto ienākumi, Ls	3000	2400	4750

Diskonta faktoru ņem no 3.7. tabulas.

3.9. tabula

Neto pašreizējās vērtības aprēķins.

		Projekts N°1		Projekts N°2		Projekts N°3	
Gadi	Dis- konta faktors 12%	Gada ienākumi, Ls	PV, Ls	Gada ienākumi, Ls	PV, Ls	Gada ienā- kumi, Ls	PV, Ls
	(A)	(B)	(A x B)	(C)	(A)x(C)	(D)	(A)x(D)
0	1,000	-12000	-12000	-12000	-12000	-	-16000
1	0,893	+3000	+2679	+3600	+3215	16000	+3126
2	0,797	+3000	+2391	+3400	+2710	+3500	+2989
3	0,712	+3000	+2136	+3200	+2278	+3750	+2848
4	0,636	+3000	+1908	+2800	+1781	+4000	+2703
5	0,567	+3000	+1701	+2600	+1474	+4250	+2552
6	0,507	+3000	+1521	+2400	+1217	+4500	+2408
Neto pašreizējā vērtība		NPV = +336 Ls		NPV = +675 Ls		NPV = +626 Ls	

NPV iegūst, summējot ikgadējās pašreizējās vērtības gadu gaitā.

Projektam N°2 ir visaugstākais NPV, un tāpēc būtu jāizvēlas šis projekts.

Peļņas indekss

Parasti projektiem atšķiras kapitālieguldījumi un NPV. Tādos gadījumos analīzei izmanto peļņas indeksu:

peļņas indekss = diskontēto neto ienākumu summa / kapitālieguldījumi.

Projekts N°1 - peļņas indekss = 12 336 / 12 000 = 1,028.

Projekts N°2 - peļņas indekss = 12 675 / 12 000 = 1,056.

Projekts N°3 - peļņas indekss = 16 626 / 16 000 = 1,039.

Labākais arī no šī viedokļa ir projekts N^o2, jo tam ir augstāks peļņas indekss.

3.2.2.5. Iekšējā peļņa (IRR)

Bieži veidojas tādas situācijas, ka nav zināms, kādu diskonta likmi lietot, un tādēļ nav iespējams izmantot NPV metodi. Tādā gadījumā, lai novērtētu energoefektivitātes uzlabošanas projektu, izmanto alternatīvu metodi, aprēķinot iekšējo peļņu jeb atmaksāšanās likmi. Tā ir diskonta likme, ar kuru vienreiz diskontējot projekta kopējos ienākumus tie kļūst vienādi ar sākotnējiem kapitālieguldījumiem.

Iekšējo peļņu nosaka ar diskonta likmi, kura NPV padara vienādu ar 0. Nav tieša paņēmiena, kā aprēķināt IRR. Tāpēc to nosaka ar pakāpenisku tuvinājumu metodi vai grafiski.

Visvieglāk to izskaidrot ar skaitlisku piemēru.

3.9. piemērs.

Naudas sadalījums ir tāds pats kā projektam N^o2 3.8.piemērā.

1. *Aprēķināt* NPV, ja diskonta procenti 10, 12 un 15%.

2. *Uzzīmēt* grafiku NPV atkarībā no diskonta vērtības.

Diskonta faktoru ņem no 3.7. tabulas. Pārējie aprēķini ir analogiski iepriekšējam piemēram un apkopoti 3.10. tabulā.

Var aprēķināt IRR vērtību, meklējot, kad $NPV = 0$ (tas ir starp 12 un 15%). Atliekot iegūtos punktus grafiski, iegūst diskonta procenta vērtību, ja $NPV=0$. Tas ir daudz vienkāršāk.

3.10. tabula

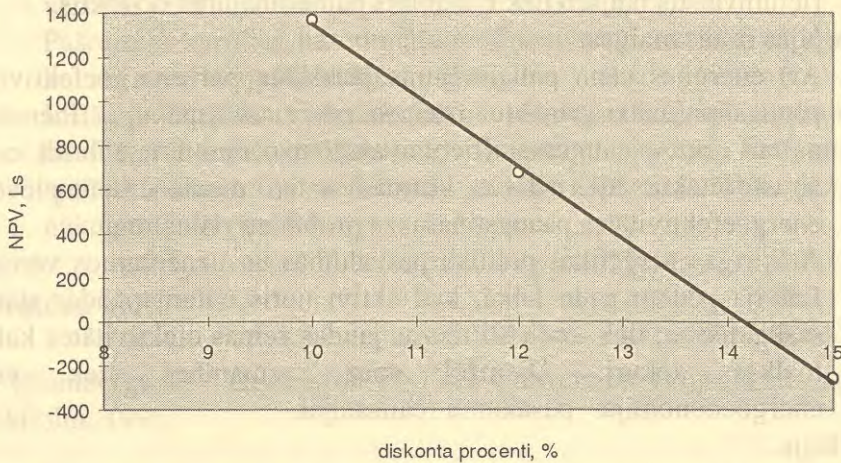
Pašreizējās vērtības aprēķini.

Gadi	Gada ienākumi, Ls	Diskonts 10%		Diskonts 12%		Diskonts 15%	
		Dis-konta faktors	PV, Ls	Dis-konta faktors	PV, Ls	Dis-konta faktors	PV, Ls
0	-12000	1,0	-12000	1,0	-12000	1,0	-12000
1	+3600	0,909	+3272	0,893	+3215	0,870	+3132
2	+3400	0,826	+2808	0,797	+2710	0,765	+2570
3	+3200	0,751	+2403	0,712	+2278	0,658	+2106
4	+2800	0,683	+1912	0,636	+1781	0,572	+1602
5	+2600	0,623	+1620	0,567	+1474	0,497	+1292
6	+2400	0,564	+1354	0,507	+1217	0,432	+1037
Neto pašreizējā vērtība, Ls		NPV = +1369		NPV = +675		NPV = - 261	

Salīdzinot dažādas metodes, IRR ir viena no pilnvērtīgākajām. Iekšējā peļņa atšķiras no neto rentabilitātes, jo pēdējā netiek ņemts vērā diskonta faktors. Vispārējos vilcienos gan NPV metode, gan IRR metode virza uz tiem pašiem pieņēmumiem vai lēmuma pārbaudi. Iekšējās peļņas metodei ir šādas priekšrocības:

- tā atspoguļo energoefektivitātes paaugstināšanas projekta spēju pelnīt naudu;
- parāda peļņas procentu no investētās naudas;
- dod iespēju salīdzināt, kurš investīciju izlietojums ir labākais, un palīdz novērtēt projekta finansēšanas veidus.

Projektā № 2 grafiski nosaka krustpunktu $NPV = 0$, un tātad $IRR = 14,1\%$.



3.9. att. IRR grafiskā noteikšana.

Ja diviem projektiem ir vienas un tās pašas vērtības, aplūkojot gan NPV, gan IRR, tad jāaprēķina peļņas indekss, kas nosaka labāko ieguldījumu.

3.2.2.6. Citi faktori projekta vērtēšanā

Dažreiz praktiski apsvērumi ietekmē ieguldījumus energoefektivitātes uzlabošanas projektos:

1. No uzņēmuma neatkarīgas aktivitātes.

Piemēram, valdības un reģionālās attīstības plāni. Šeit paredzētie ieguldījumi var nebūt tūlītēji (projekta sākuma stadijā), bet varētu būt kā darbības kapitāls projekta dzīves vēlākajos gados.

2. Nodokļu politika.

Tā varētu attiekties ne tikai uz enerģijas racionālu izmantošanu. Tai vajadzētu būt energoefektivitātes paaugstināšanas shēmu realizācijas

virzītājspēkam. Lai rosinātu samazināt enerģijas patēriņu, rietumvalstīs jau sen tiek izmantots pamudinājuma nodoklis.

3. Enerģijas cenas maiņas.

Arī enerģijas cenu palielinājums jāuzskata par energoefektivitātes paaugstināšanas projektu īstenošanas virzītājspēku. Piemēram, naftas cenu pieaugums. Rietumvalstu uzņēmumi tajā brīdī centās atrast lētākus alternatīvus kurināmos un paralēli tam pievērsās energoefektivitātes paaugstināšanas problēmu risināšanai.

Atšķirīga enerģētikas politika pašvaldībās un uzņēmumos vērojama Latvijā pēdējo gadu laikā, kad aktīvi noris siltumapgādes sistēmu saskaldīšana: tiek uzstādīti mazas jaudas zemas efektivitātes katli ar malkas apkuri. Diemžēl maz uzmanības tiek veltīts energoekonomijas pasākumu realizācijai.

4. Inflācija.

Cits faktors, kas tieši ietekmē projekta aprēķinus, ir inflācijas procenti. Enerģijas taupīšanas projektos inflāciju nosaka kā preču un pakalpojumu vidējo cenu pieaugumu. Šajā gadījumā tās ir kurināmā cenas, iekārtas un to uzstādīšanas maksas, kā arī ekspluatācijas izmaksas.

Inflāciju izraisa naudas vērtības krišanās. Reāli to var regulēt tikai ekonomiskā sistēma. Inflāciju precīzē Latvijas Statistikas komiteja.

Nav universālas metodes, kā precīzi izvērtēt inflācijas iespaidu uz energoekonomijas pasākumu realizāciju.

Reālo vērtību var aprēķināt:

$$\text{Reālā vērtība} = S / (1 + \text{INF})^N,$$

kur S - realizētās naudas summa;

N - gadu skaits;

INF - inflācijas līmenis.

Naudai, kuru izlieto energoefektivitātes uzlabošanas pasākumu realizācijai, ir noteikta vērtība (maksas vērtība), ja to pārrēķina,

lietojot vienādojumu, tad iegūstama naudas reālā vērtība. Reālās vērtības pazemināšana jāņem vērā ar diskonta faktoru.

Pašreizējā vērtības pazemināšana jāņem vērā ne tikai ar diskonta, bet arī ar inflācijas faktoru.

Inflācija ietekmē visus projektus vienādi, tādēļ tiek uzskatīts, ka naudas plūsmas aprēķinos to var neņemt vērā. Tas samazina aprēķinu nenoteiktības līmeni, jo nav nepieciešamības prognozēt nākotnes inflāciju [3.11.].

Literatūra

3.1. Blumberga D. Evaluation of Fuel Conversion Projects in Latvia. - Stockholm, 1995.

3.2. Blumberga D., Veidenbergs I. Energy Efficiency Improvement with Capital Investment Projects in Latvia // - Technologies for Energy Efficiency and Environmental Protection. Proceedings of the Conference, Cairo, Egypt, March 26- 30, 1995.

3.3. Blumberga D. Šķelda Balvu katlu mājā // Ekoloģiski tīras enerģētiskās sistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā.- Stokholma, 1994.

3.4. Blumberga D., Veidenbergs I. Short Description and Technical, Economical and Environmental Justification of Energy Saving Projects in Latvia // Report No 14. EBRD Energy Emergency Investment Programme in Latvia.-Rīga, 1993.

3.5. Eastop T.D., Croft D.R. Energy Efficiency.-London, 1990.

3.6. Basic Energy Efficiency.-Halden, Norway, 1993.

3.7. Koksnes izmantošana Latvijas enerģētikā. Kopsavilkums. // JAAKKO POYRY atskaite ERAB C4100/EC - 92- 12 -68, Rīga, 1995.

- 3.8. Blumberga D., Veidenbergs I., Jegers A. Metodikas izstrādāšana katlu mājas normatīvo rādītāju noteikšanai // Zinātniski pētnieciskā darba atskaite Rūpniecības un enerģētikas ministrijai.-Rīga, 1993.
- 3.9. Martinot E. Cost Effectiveness of Energy Efficiency Projects // Information material of NUTEK hearing. - Stockholm, October 5-6,1995.
- 3.10. Blumberga D., Pētersons G., Veidenbergs I. Gāzes mārketinga datorprogramma siltuma avota kurināmā salīdzinājumam // GM v1.01, Rīga, 1995.
- 3.11. Economic Evaluation of Energy Efficiency Projects. Oxford, United Kingdom, 1994.

4. ENERGOEFEKTIVITĀTES EKOLOĢISKIE ASPEKTI

Klimata un vides uzlabošanai paredzētie pasākumi ir tieši saistīti ar Apvienoto Nāciju konvenciju par klimata izmaiņām, kura kopā ar darbības plānu pieņemta 1992. gada jūnijā Riodežaneiro. Tur toreiz notika Apvienoto Nāciju vides un perspektīvās attīstības konference. Šī ANO konvencija un darbības plāns iesaka ceļus un metodes, kā panākt klimatam un videi kaitīgo izmešu samazinājuma problēmas stabilu risinājumu.

Konvencijas 4. pantā ieinteresētās valstis uzņemas sagatavot un īstenot nacionālās programmas. Tām jāsaturs to pasākumu izklāsts, kuri ļautu ierobežot klimatiskās izmaiņas un "veicinātu sadarbību attiecībā uz tehnoloģijas, prakses un procesu attīstīšanu, izmantošanu un izplatīšanu, ieskaitot tehnoloģiskās informācijas nodošanu, kas kontrolē, samazina vai aizkavē antropoģeniskās izcelsmes siltumnīcas efekta izraisītu gāzu izmeti" [4.1].

Šajā grāmatā atspoguļota daļa no zinātniski pētnieciskā un inženiertehniskā darba pieredzes, kura iegūta, analizējot un pilnveidojot atšķirīgu siltuma avotu un tehnoloģisko iekārtu darbību, kas saistīta ar gaisa piesārņojuma pieauguma likumsakarību izpēti un to iespējamo samazinājumu.

Siltuma avotu izmešu sastāvā ir gan gāzveida komponenti (oglekļa, slāpekļa, sēra oksīdi), gan cietās daļiņas (pelni un kurināmais). Enerģētiskā organiskā kurināmā dedzināšana ir arī viens no galvenajiem oglekļa dioksīda avotiem, ja neskaita oglekļa dabisko ciklu, pie kura pieder biokurināmā dedzināšana šī cikla ietvaros. Izmešu samazināšanai pievērsta īpaša uzmanība. Viens no visietekmīgākajiem līdzekļiem šo jautājumu risināšanā ir nodokļi.

Zviedrijā lieto nodokļu sistēmu pat CO₂ izmešiem atmosfērā. Tas ir arī enerģētiskās efektivitātes paaugstināšanas jautājums, jo ogļskābā gāze ir kurināmā pilnīgas degšanas rezultāts. Veicot kurināmā patēriņa uzskaiti, viegli izrēķināt šo izmešu daudzumu laika vienībā. Faktiski jebkura

neizdarība katlu mājā - darbība ar zemāku lietderības koeficientu - palielina nodokli par vides piesārņojumu.

Šajā materiālā meklētas kopsakarības iekārtu darbības enerģētiskajai efektivitātei un vides aizsardzībai. Šobrīd pasaules enerģētiķu domas dalās. Mēs kopā ar citu Eiropas valstu speciālistiem saistām iespēju paaugstināt iekārtu enerģētisko efektivitāti ar vides piesārņojuma samazinājumu. Liekas loģiski, ka, samazinot kurināmā patēriņu vienas enerģijas vienības ražošanai, vidē nonāk mazāk kaitīgo izmešu. Analogiski varētu skaidrot arī patērētāja enerģijas patēriņa samazinājumu lietotāja iekārtu darbināšanas energoefektivitātes paaugstināšanas dēļ. Visos gadījumos vide tiek aizsargāta no papildu piesārņojuma. Vēl vairāk - nav nepieciešamība būvēt papildus jaunas spēkstacijas enerģijas ražošanai, kaut arī enerģijas patērētāju skaits aug.

Amerikāņi uzskata, ka nav pareizi enerģētiskās efektivitātes uzlabošanu vērtēt kā ekoloģisku pasākumu vides piesārņojuma aizsardzībai. Šāds vērtējums tiek pamatots ar to, ka saražotās enerģijas kopapjoms pieaug gadu no gada un līdz ar to palielinās vidē nonākušo izmešu daudzums.

4.1. ENERĢĒTISKĀS UN EKOLOĢISKĀS SITUĀCIJAS RAKSTUROJUMS LATVIJĀ

4.1.1. Kurināmā kvalitātes izraisītās problēmas

Latvijā katlu kurtuvēs vēl joprojām dedzina kurināmo, pret kuru sagādnieki un patērētāji izvirza tikai vienu prasību, - lai tas būtu lētāks.

Tādēļ mūsu valstī ļoti bieži tiek ievesti un sadedzināti kurināmie, kuri ir dažādu tehnoloģisko procesu pārpalikumi un satur "kuplu kaitīgo piemaisījumu buķeti". Valstīs, kurās tie tiek pirkti, ir dubultizdevīgi tos pārdot:

- pirmkārt, nav jāmaksā par atkritumu glabāšanu;
- otrkārt, par atkritumiem tiek saņemta samaksa.

Tādā veidā esam nonākuši citu valstu atkritumu savācēju lomā un paradoksāli ir tas, ka maksājam lielu naudu, lai varētu tos iegūt un piesārņot vidi. Tas attiecas gan uz šķidro, gan uz cieto kurināmo.

Daudz sarežģījumu rada tas, ka Latvijā nav oficiālas kontroles laboratorijas kurināmā sastāva pilnai analīzei. Tas rada aptūkļus, ka ne tikai nav iespējams konstatēt gaisa piesārņojuma komponentus un to koncentrāciju, bet nav arī iespējams aizkavēt šādu izmešu esamību.

Šobrīd varētu aplūkot atšķirīgus priekšlikumus, kuri dotu iespēju samazināt izmešu līmeni apkārtējā vidē.

Pirmkārt, nepieciešams noteikt dažādus nodokļu lielumus kurināmajam atkarībā no sēra satura tajā.

Otrkārt, ekonomiski jāpamato sēra samazināšana kurināmajā.

Treškārt, uzstādīt jaunas iekārtas. Obligātai jābūt prasībai, kas noteiktu minimālu slāpekļa oksīdu un tvana gāzes veidošanās līmeni degšanas procesā.

Ceturtkārt, rūpīgi jāizvērtē dūmgāzu attīrīšanas iekārtu uzstādīšanas plusi un mīnusi.

Šie priekšlikumi liecina, ka vispirms būtu jāmeklē atbilde uz jautājumu: kā izveidot likumdošanu tādu, lai ekonomiski nebūtu izdevīgi pirkt un sadedzināt kurināmo ar augstu sēra saturu un citiem kaitīgiem piemaisījumiem. Pirmie mēģinājumi šajā jomā tika veikti 5.Saeimas laikā, pieņemot Vides likumu. Taču tie beidzās nesekmīgi.

Eiropas valstīs ir stingri noteikts sēra daudzums kurināmajā, kuru sadedzina katlu kurtuvēs. Piemēram, Zviedrijā tas nedrīkst pārsniegt 0,9%, bet Vācijā - 0,5%. Tātad siltuma avota īpašniekiem ir skaidrs: ja viņi sadedzinās kurināmo ar sēra saturu, augstāku par normatīvo, tad sēra oksīdu koncentrācija palielināsies un būs jāmaksā soda nauda par izmešu koncentrācijas pieaugumu, vai arī vēl ļaunāk - katlu māju var slēgt.

Mūsu nesakārtotajā energosaimniecībā šādi ekstremāli pasākumi nav iespējami, tādēļ pirmais solis vides piesārņojuma samazināšanā varētu būt nodoklis, kurš pieaug līdz ar sēra satura pieaugumu kurināmajā.

Dabas resursu nodokļu likmes ir izstrādātas, bet vēl joprojām nav apstiprinātas (skat. 4.1.tabulu). Tabula tika iekļauta likumprojektā "Par dabas resursu nodokli", kura trešajā lasījumā 5. Saeimā tā tika svītrotā.

4.1.tabula

Dabas resursu nodokļu likmes par videi kaitīgu preču un produktu patēriņu (tabulā parādīti tikai tie dati, kas attiecas uz kurināmo).

Nr.	Preces vai produkta veids	Mērvienība	Likme, Ls	Normatīvi atskaitījumiem, %		
				(1)	(2)	(3)
1.	Akmeņogles; un papildus par sēra saturu	tonna (tonna x sēra %)	2.00 0.50	0 80	0	100 20
2.	Kūdra - kurināmā (saussvarā)	tonna	0.50	0	0	100
3.	Mazuts; un papildus par sēra saturu	tonna (tonna x sēra %)	1.50 0.50	0 80	0	100 20
4.	Šķidrie kurināmie; un papildus par sēra saturu	tonna (tonna x sēra %)	2.50 0.50	0 80	0	100 20
5.	Gāze	tūkst. kub.m.	0.00	0	0	100
6.	Dīzeļdegviela	litrs	0.001	*	0	100
7.	Benzīns - bez svina satura, ar svina saturu	litrs	0.003 0.01	* 0	0	100 100

- * - transporta līdzekļiem ar uzstādītu katalīzes filtru, tos reģistrējot, pusi no reģistrācijas nodevas sedz no attiecīgā mērķfonda.
- (1) - minimālais nodokļa atmaksas normatīvs, precī vai produktu nododot utilizācijai vai atkārtotai izmantošanai;
- (2) - maksimālais atskaitījumu normatīvs (subsīdiju) uzņēmumiem, kas nodarbojas ar preču vai produktu utilizāciju vai atkārtotu izmantošanu;
- (3) - minimālais normatīvs atskaitījumiem mērķa fondos.

Tādā veidā varētu ekonomiski ietekmēt nekvalitatīva kurināmā iepirkšanu. Šeit vajadzētu arī atcerēties, ka sēra saturs mazutā ir saistīts arī ar vanādija daudzumu: jo vairāk sēra, jo vairāk arī vanādija būs pelnu sastāvā. Ievērojot šo apsvērumu, arī jāpalielina nodokļi.

Šādā veidā atmosfēras gaisa piesārņojuma kontrole būtu vienkāršāka, jo sākuma stadijā būtu pilnīgi pietiekami analizēt kurināmo un tikai vēlāk, valstij kļūstot bagātākai, varētu domāt par stacionāriem gāzes analizatoriem SO₂ izmešu noteikšanai.

To varētu uzskatīt par pirmo soli vides aizsardzības problēmu ekonomiskajā risinājumā. Ir iespējami arī pārējie iepriekšminētie varianti gaisa baseina piesārņojuma samazināšanā.

Piemēram, bieži gaisa baseina inspektori Latvijā pieprasa katlu mājām veikt pasākumus, lai samazinātu sēra dioksīda izmešu daudzumu, uzstādot dūmgāzu attīrīšanas iekārtas gāzveida izmešiem.

Inspekciju darbinieki ir labi informēti par ārzemju firmu sasniegumiem un iekārtām šādā piesārņojuma samazināšanā, un viņiem ir daļēja taisnība.

Tomēr, šo jautājumu aplūkojot, nedrīkst vadīties tikai no pasaules prakses, bet nepieciešams apskatīt šīs problēmas, neaizmirstot Latvijas specifiku.

Mūsu valstī ir vairāk nekā 5000 katlu, kuru jauda ir neliela (līdz 5 MW), un būs ļoti grūti ekonomiski pierādīt dūmgāzu attīrīšanas iekārtu (no gāzveida komponentiem) uzstādīšanas lietderību. Tās ir dārgas, metālietilpīgas, energoietilpīgas un ļoti bieži saistītas ar sekundāro vides piesārņojumu - piesārņotu notekūdeņu veidošanos. Pasaules praksē divdesmit gadus un vairāk plaši lietoja absorbcijas un nedaudz vēlāk sāka

izmantojot daudz dārgāku - katalītisko sēra dioksīda samazināšanas metodi. Pēdējā laikā aizvien biežāk tiek pievērsta uzmanība pussausajai vai sausajai SO₂ attīrīšanas metodei, kuru varētu aplūkot kā mazatlikuma tehnoloģiju un nebūtu jā rūpējas par ūdens baseina aizsardzību. Pēdējā - aplūkota vēlāk.

Speciālistu vidū Latvijā jau vairākus gadus tiek cilāts jautājums par kurināmā pārstrādes uzņēmuma būvi. Tajā galvenais uzdevums būtu sēra satura samazināšana kurināmajā.

Šādas rūpnīcas celtniecība Latvijā jā pamato gan ekonomiski, gan ekoloģiski, gan arī tehniski. Nedrīkst aizmirst arī par privātstruktūru veidošanas kurināmā apgādes sistēmā valstī, un tāpēc arī šis faktors ar laiku kļūs par galveno noteicošo kurināmā pārstrādes uzņēmuma izbūvē. Tātad tas ir arī valsts enerģētikas (arī vides aizsardzības) stratēģijas jautājums.

4.1.2. Siltuma avota darbības ekoloģiskais vērtējums

Pieredze pasaules attīstītākajās valstīs rāda, ka kaitīgo izmešu koncentrācija ir jāregulē ar degšanas tehnoloģiju.

Protams, ka šobrīd mēs nevaram pēkšņi nomainīt mūsu gadu desmitiem vecās tehnoloģiskās iekārtas un viena vai pāris gadu laikā sasniegt tādus gaisa piesārņojuma samazinājumus no katliem, kādi tie ir Rietumeiropā. Taču steidzami ir jārod ceļš, pa kuru ejams uz gaisa baseina piesārņojuma samazināšanu. Specifiska vides piesārņojuma problēma parādījās 1991./92. gada apkures sezonā. Latvijā notika un notiek siltumapgādes sistēmu decentralizācija un straujā tempā kā sēnes pēc lietus aug mazie siltuma avoti, kuros uzstādīts viens nelielas jaudas katls vienas vai pāris daudzstāvu dzīvojamo māju apsildei. Šo katlu lietderības koeficients parasti ir 30...40%, un līdz ar to pieaug kopējo izmešu daudzums attiecīgajā pilsētā. Taču tā ir tikai problēmas viena puse, kura risina iedzīvotāju lokālo enerģijas apgādi ar šķietami lētāku iekārtu darbināšanu. Diemžēl šādu pasākumu realizācijas pamatā nav ne tehniski ekonomiskais, ne ekoloģiskais pamatojums. Tādēļ tas ir jāvērtē ne tikai no enerģētiskās

efektivitātes pasliktināšanās viedokļa, bet arī kā gaisa baseina piesārņojuma palielināšanās pasākums.

Šķiet, ka arī šādas situācijas kontrolei un regulēšanai, vides piesārņojuma pieauguma prognozēšanai, nepieciešams ekonomiskais pamatojums. Absurdi ir pieņēmumi, ka ir izdevīgi sadedzināt vairāk nekvalitatīva kurināmā un tādā veidā tiek ekonomēta enerģija.

Daudzās katlu mājās siltumenerģijas augstā cena ir saistīta ar katlu darbības zemo efektivitāti. Tam ir vairāki iemesli.

Pirmkārt, katli ir maz noslogti (10...40% no nominālās slodzes). Tas saistīts ar siltumenerģijas patērētāju atdalīšanos no lielajiem siltuma avotiem, vai arī rūpniecisko patērētāju bankrotu un slēgšanu. Zemās katlu slodzes izraisa kurināmā neefektīvu degšanu un iekārtu lietderības koeficienta samazināšanos.

Otrkārt, katlu darbības organizēšana ļoti bieži norit neprofesionāli un bez jebkādam iespējam to regulēšanā un katlu lietderības koeficientu noteikšanā ekspluatācijas laikā. Šo iemeslu dēļ kurināmā pārtēriņš šādās katlu mājās var sasniegt 5...40%. Katla darbība ar zemu lietderības koeficientu, ar to saistītais kurināmā pārtēriņš un sēra dioksīda izmešu pieaugums aplūkots tālāk.

Šeit apstāsimies tikai pie viena energoefektivitātes rādītāja - siltuma zudumiem ar ķīmiski nepilnīgu sadegšanu, kas modernās katlu mājas pasaulē jau praktiski ir aizmirsta, un tvana gāzes izplūdi atmosfērā.

Šis jautājums jau tika aplūkots 2. nodaļā no kurināmā degšanas energoefektivitātes viedokļa. Tvana gāzes izplūdes prognozēšanai vienādojuma (2.7.) vietā aptuveni aprēķiniem var izmantot profesora S.Korņicka formulu

$$CO = q_3 / 3,25 \alpha, \% \quad (4.1.)$$

kur α - gaisa patēriņa koeficients,

q_3 - ķīmiski nepilnīgas degšanas siltuma zudumi.

4.1. piemērs

Katlu kurtuvē sadedzina mazutu. Gaisa patēriņa koeficients aiz katla $\alpha = 1,5$.

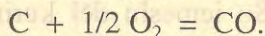
Noteikt pieļaujamās tvana gāzes izmešu koncentrāciju.

Normatīvie siltuma zudumi $q_3 = 0,5 \%$.

$$CO = 0,5 / 3,25 \cdot 1,5 = 0,103\% = 1030 \text{ ppm.}$$

Tas, protams, ir neattaisnojumi no vides piesārņojuma viedokļa. Nevienas Rietumeiropas un Skandināvijas valsts standarts neparedz tvana gāzes izplūdi no katlu mājas skursteņiem.

Tas ir arī enerģijas patēriņa samazināšanas jautājums, jo netiek pilnībā izmantota kurināmā enerģija. Šajā gadījumā oglekļa oksidēšanās reakcija norit tikai līdz CO līmenim:



Tātad vajadzīgs papildu kurināmais, lai iegūtu nepieciešamo siltuma enerģijas daudzumu.

4.2. IZMEŠU RAKSTUROJUMS

4.2.1. Slāpekļa oksīdu raksturojums

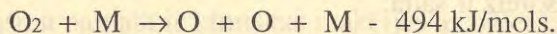
Slāpekļa oksīdu izmešu galvenais avots ir iekārtas, kurās deg organiskais kurināmais. Degšanas procesā slāpekļis, savienojoties ar skābekli, veido dažādus oksīdus - N_2O , NO , NO_2 , N_2O_4 , N_2O , u.c., kuru īpašības, kā arī ietekme uz apkārtējo vidi ir atšķirīga [4.2.]. Protams, ka grūti ir izvērtēt, kādi dūmgāzu komponenti ir kaitīgi, un vēl sarežģītāk ir noteikt to ietekmi nākotnē. Tomēr šādu salīdzinājumu pieņemts prognozēt ar kaitīguma koeficienta palīdzību, kas rekomendēts apkārtējai videi

nodarīto zaudējumu noteikšanai [4.3.]. Slāpekļa oksīdi ir 41 reizi kaitīgāki par tvana gāzi un 2,5 reizes - par sēra dioksīdu.

Slāpekļa oksīdu ietekme uz floru un faunu ir dažāda un šobrīd izzināta nepilnīgi. Par tās patieso iedarbību uz vidi droši vien spriedīs nākamās paaudzes. Dati, kas pieejami literatūrā, ir skopi un nereti pretrunīgi. Ir konstatēts, ka, nonākot atmosfērā, NO veido ne tikai NO₂, bet arī pārskābes, aldehīdus, skābes u.c.vielas, kas noteiktos meteoroloģiskos apstākļos veido tā sauktos fotoķīmiskos smogus. Šobrīd zinātnieki diskutē par N₂O negatīvo ietekmi uz ozona slāni un piedalīšanos "siltumnīcas efekta" radīšanā. NO₂ un N₂O₅ kopā ar ūdens pilieniem viegli veido slāpekļskābi, kas nokrišņu laikā augsni piesārņo ar nitrātiem. Slāpekļa oksīdi ir kaitīgi cilvēka veselībai: tie kairina acu gļotādu, izraisa hemoglobīna satura samazināšanos asinīs utt. Grūti prognozēt arī NO_x summāro ietekmi uz apkārtējo vidi perspektīvā, jo atšķirīgs ir dažādo komponentu eksistēšanas ilgums, piemēram, NO₂ sadalās 100 stundu, bet N₂O - 4,5 gadu laikā [4.4.].

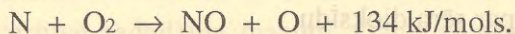
Visizplatītākie un biežāk sastopamie ir slāpekļa monooksīds NO un dioksīds NO₂. Pirmais ir bezkrāsains, vāji šķīstošas gāzes formā. Katlu kurtuvēs galvenokārt veidojas tieši slāpekļa monooksīds: konstatēts, ka no visiem slāpekļa oksīdiem 95...97% ir NO [4.2.].

Šobrīd sastopamas vairākas slāpekļa monooksīda veidošanās teorijas. Viena no tām orientēta uz to, ka slāpekļa oksidēšanās noris pēc ķēdes reakcijas [4.2.,4.5.]. Ķēdes reakciju iesāk aktivizēta skābekļa molekula pēc tam, kad kāda cita molekula (vai daļiņa) M to aktivizē, t.i., piešķir daļiņai nepieciešamo aktivizācijas enerģiju. Rezultātā skābekļa molekulas sadalās un tiek patērēts siltums:

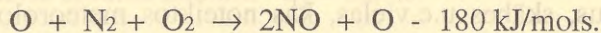


Skābekļa atoms tālāk reaģē ar slāpekli, reakcijā gan patērējot, gan izdalot siltumu:



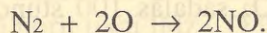


Šīs ķēdes reakcijas pirmā posma summu iegūst, saskaitot reakciju elementus:

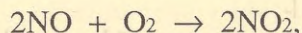


Tādējādi katrs aktivizētais skābekļa atoms atbrīvo jaunu skābekļa atomu un sākas jauns cikls.

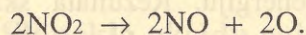
Cita teorētiskā koncepcija ir izklāstīta [4.6.] un piemērojama gadījumos, kad gāzes degšanas temperatūras ir zemākas par 1500°C. Slāpekļa monooksīda veidošanās reakcija ir šāda:



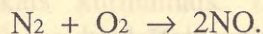
Tai seko atomārā skābekļa veidošanās no molekulārā skābekļa, pie tam sākumā rodas slāpekļa dioksīds:



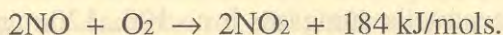
taču šajās temperatūrās tas sadalās, gala rezultātā iegūst atomāro skābekli un slāpekļa monooksīdu:



Summārā reakcija šoreiz ir šāda:



Slāpekļa dioksīds savukārt ir dzeltenī brūngana gāze ar specifisku smaku. NO₂ veidojas, dūmgāzēm, kuras satur NO, nonākot apkārtējā vidē. Izmantojot skābekli no gaisa, norit eksotermiskā reakcija:



Analoģiski būtu iespējams aprakstīt arī pārējo slāpekļa oksīdu N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5 veidošanās reakcijas. Taču jāatzīmē, ka šeit aprakstīto procesu norise neatspoguļo patieso ainu kopumā, jo reakcijas notiek vienlaicīgi ar degšanas elementu ķēžu reakcijām, kurās veidojās aktīvi reakcijas starpprodukti, kas savukārt gan kvalitatīvi, gan kvantitatīvi ietekmē slāpekļa oksīdu veidošanos. To visspilgtāk ilustrē daudzie degšanas procesu pētījumi dažādās pasaules valstīs. Piemēram, Dānijas Enerģētikas ministrija sponsorējusi zinātisko darbu [4.7.], kura autori slāpekļa oksīdu veidošanās kinētisko modeli apraksta ar 213 ķīmiskajām reakcijām.

Iepriekšminētais un arī tas, ka reakcijas norit ātri un ietekmē cita citu, liecina, ka nav iespējams precīzi noteikt atsevišķi katra slāpekļa oksīda komponenta saturu dūmgāzēs. Tādēļ tiek lietots reducētais NO_x jēdziens: visus slāpekļa oksīdus pārrēķina uz NO_2 .

Neraugoties uz to, ka slāpekļa oksīdu veidošanās mehānisms daudz pētīts, nav vienotas koncepcijas par NO_x koncentrāciju aprēķiniem dūmgāzēs, to kvalitatīvo sastāvu aiz reālām siltumenerģētiskām iekārtām ar mainīgām slodzēm.

Par vienas slāpekļa oksīda rašanās teorijas pamatlicēju jāuzskata J.Zeldovičs, kurš NO_x veidošanās avotus iedala trīs grupās: termiskajos (Zeldoviča mehānisms), ātrajos (Fenimora mehānisms) un kurināmā [4.5.].

Termiskie oksīdi veidojas liesmas augstas temperatūras zonā stehiometriskos un nabadzīgos maisījumos. Tiem raksturīga izteikta atkarība no temperatūras, kā arī no atrašanās laika augstas temperatūras zonā.

Ātrie slāpekļa oksīdi veidojas liesmas sākuma zonā, un šī mehānisma pamatā ir ķīmiskas reakcijas ar oglekļa un ogļūdeņražu radikāļu piedalīšanos. Šo oksīdu veidošanos vāji ietekmē temperatūras līmenis, taču būtiska ir ogļūdeņražu koncentrācija.

Šī koncepcija guvusi plašu atsaucību bijušās PSRS zinātnieku vidū un tiek pilnveidota [4.2.,4.6.]. Taču sakarā ar to, ka NO_x problēmas ir visas pasaules zinātnieku uzmanības centrā, literatūrā atrodami eksperimentu rezultāti norāda, ka iepriekšminētās teorijas lietojums ne vienmēr ir korekts

[4.7.,4.8.,4.9.]. Piemēram, tiek apgalvots [4.2.], ka, sadedzinot dabas gāzi, slāpekļa oksīdu minimālā koncentrācija dūmgāzēs ir no 100...120 mg/m³ (ja kurtuvēs padod aukstu gaisu) līdz 150...200 mg/m³ (ja degšanas kamerā nonāk silts gaiss). Tādas robežlielumu vērtības izskaidro [4.2.,4.6.] ar to, ka šīni gadījumā būtu vērā ņemami ātro termisko NO_x veidošanās mehānismi. Tā kā, iejaucoties degšanas procesā, iespējams iedarboties tikai uz otrajiem, tad norādītās minimālās robežkoncentrācijas vērtības atbilst ātro NO_x līmenim un saskaņā ar piedāvāto teoriju tos likvidēt kurtuvē nav iespējams. Savukārt citu autoru kurtuves procesu pētījumi liecina par iespējam panākt zemāku slāpekļa oksīdu koncentrāciju dūmgāzēs, piemēram, 60...80mg/m³ [4.10.], 40mg/m³ [4.11.] utt. Šīs nesakritības, kā arī J.Zeldoviča piedāvāta mehānisma un teorijas lietojuma diapazona un specifiku vērtējumi sastopami periodikā [4.7.].

Viedokļu dažādība un atšķirība ir ne tikai NO_x veidošanās mehānisma skaidrojumā, bet arī slāpekļa oksīdu samazināšanas metožu izvēlē. Neskatoties uz to, ka zināms liels skaits NO_x samazināšanas paņēmieni, tos varētu sadalīt divās lielās grupās: dūmgāzu ķīmiska, arī fizikāli ķīmiska tīrīšana un tehnoloģiska tīrīšana, iejaucoties degšanas procesā. Pirmās metodes pamatā ir seku likvidēšanas pasākumi, otrā paredz izvairīties no slāpekļa oksīdu veidošanās, t.i., izslēgt NO_x rašanās cēloņus. Vislabākos rezultātus, protams, iespējams gūt, kombinējot abas šeit minētās metodes, organizējot vairākstadiju dūmgāzu tīrīšanu no slāpekļa oksīdiem.

Slāpekļa oksīdu aprēķins katlu kurtuvēs rada nopietnas grūtības. Tās saistītas ar to, ka NO_x veidošanos ietekmē liels skaits faktoru. Ar zināmu nosacījumu starp tiem varētu minēt:

- kurtuvju un degļu konstrukcijas, kas nodrošina gaisa padeves veidu un degmaisījuma veidošanās procesu [4.12.];
- kurtuves termisko slodzi un gaisa patēriņa koeficientu [4.13.];
- radiācijas virsmu tīrību [4.14.,4.15.].

No tā izriet, ka, no vienas puses, slāpekļa oksīdu veidošanos ietekmē konstruktīvie parametri - katla un degļu konstrukcijas - un tie ir noteikti

katrai konkrētai iekārtai. No otras puses, daļa NO_x rašanās faktoru ir atkarīgi no darbības režīma. Jāatzīmē, ka konstrukcijas ietekme dažādos režīmos slāpekļa oksīdu veidošanās procesos var izpausties atšķirīgi, taču ir vērojamas kopējas tendences. Tādā veidā piedāvātās slāpekļa oksīdu noteikšanas metodes pamatā ir koncepcija, ka noteiktā katlu iekārtā ģenerējamo slāpekļa oksīdu līmeni nosaka tā darbības režīmu parametri.

Autores radošā kolektīva līdzšinējās praktiskās un pētnieciskās darbības gaitā novērojumi un mērījumi rūpniecības un siltumtīklu uzņēmumu katlu mājās rāda, ka katli faktiski strādā bez slodzes un ekonomiskas degšanas automātiskas regulēšanas. Tas ir saistīts ar būtiskām tvaika spiediena izmaiņām, kuras izraisa tehnoloģiskie patērētāji, un gaisa patēriņa koeficienta svārstībām. Savukārt, tvaika spiediena izmaiņu rezultātā pieaug vai samazinās piesātinājuma temperatūras katla cirkulācijas kontūrā. Tādēļ katla darbības režīma rādītāji ir sadedzināmā kurināmā daudzums, gaisa patēriņa koeficients un tvaika spiediens katla boilerā.

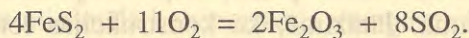
4.2.2. Kurināmā degšana un sēra oksīdu veidošanās teorētiskie aspekti

Sērs cietajā kurināmajā S_{kop} sastāv no sulfātu S_{st} , sulfīdu S_{sd} un organiskā S_0 , pie kam katra komponenta īpatsvaru iespējams noteikt ar vienādojumu:

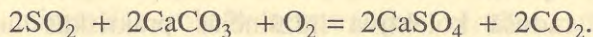
$$S_{st}/S_{kop} + S_{sd}/S_{kop} + S_0/S_{kop} = 1 \quad (4.2.)$$

Sēra komponenti, kuri veido gāzveida sēra oksīdus degšanas procesā, ir organiskais un sulfīdu sērs. Tiek pieņemts, ka pārējais sērs apkārtējā vidē nonāk ar izdedžiem. Šāda koncepcija praksē var realizēties, ja tiek nodrošināti nepieciešamie nosacījumi ķīmisko reakciju norisei. Lai ilustrētu iepriekšsacīto, jāaplūko ogļu sastāvā esošo minerālo piemaisījumu piedalīšanās degšanas procesos.

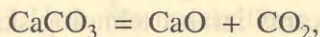
Temperatūru diapazonā 400...600°C dzelzs sulfīds oksidējas:



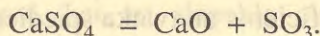
Sēra dioksīds reaģē ar kurināmā sastāvā esošo kalcija karbonātu, no kura karsēšanas procesā aizvadīts kristāliskais mitrums:



Ja temperatūra pieaug virs 600°C, tad sadalās karbonāti:



bet virs 1000°C - sulfāti:



Vienlaicīgi norit citu kurināmā sastāvā esošo minerālo piemaisījumu ķīmiskās pārveidošanās reakcijas, kuras būtiski ietekmē ne tikai temperatūru līmeņi, bet arī skābekļa (gaisa) klātbūtne attiecīgajās degšanas zonās. Tas attiecas gan uz silīcija oksīdiem un dzelzs oksīdiem, gan uz citiem savienojumiem (arī sēra savienojumiem), kuri no kurtuves tiek aizvadīti izdedžu veidā.

Ja kurināmā kvalitāte pasliktinās, mainās kopējais sēra saturs, pie kam īpatnējais sēra saturs gaisā un pelnos var gan pieaugt, gan samazināties. Taču tādā gadījumā gandrīz vienmēr kopējā sēra masa cietajā kurināmajā, rēķinot uz vienu saražotās enerģijas vienību, pieaug.

Sērs mazuta sastāvā atkarībā no kurināmā kvalitātes var būt gan nelielā koncentrācijā 0,5% (mazuts ar zemu sēra saturu), gan lielos daudzumos 2,5...3,5% (mazuts ar augstu sēra saturu). Sēra saturs mazutā dažreiz sasniedz 6...7%, un šādam kurināmajam bijušās Padomju Savienības valsts standartā nebija nosaukuma.

Mazuts kurtuvē sadeg mazu pilienu veidā. No sēra veidojas ne tikai labi zināmie sēra oksīdi SO_2 (līdz 99%) un SO_3 (līdz 3%), bet arī citi sēra

savienojumi H_2S , S_2 , brīvie radikāļi: SO , S , SH . Tas, kādi savienojumi radīsies, ir atkarīgs no dažādiem liesmas veidošanās apstākļiem katlu kurtuvē:

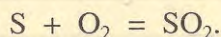
- gaisa patēriņa koeficienta un temperatūru līmeņiem;
- oksidētāja pievadīšanas vietas, t.i., sprauslu konstruktīvajiem parametriem.

Viss iepriekšteiktais liecina par to, ka dūmgāzu sastāvā bez sēra dioksīda un trioksīda iespējams konstatēt arī citus sēra savienojumus. Protams, to koncentrācija ir neliela, tādēļ šobrīd, rēķinot sēra izmešus atmosfērā, par galveno komponentu jāuzskata sēra dioksīds SO_2 , bet iepriekš minēto nevajadzētu aizmirst, ja tiks turpināta dažādu tehnoloģisko atkritumu dedzināšana.

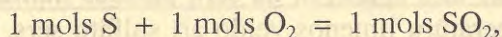
4.3. IZMEŠU NOTEIKŠANA

4.3.1. Teorētiskā sēra oksīdu izmešu noteikšanas metode

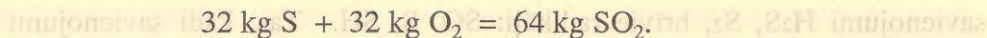
Sēra degšanas stehiometriskais vienādojums ir



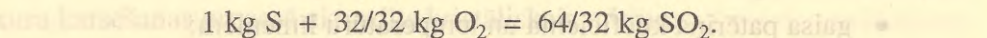
Tas nozīmē, ka, sadegot vienam molam sēra, veidojas viens mols sēra dioksīda:



vai pārrēķinot kilogramos, tas ir

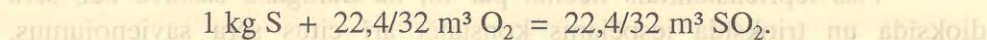


Attiecinot uz 1 kg sēra,

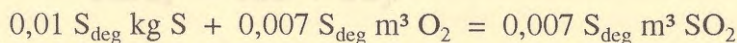


Vienādojums rāda, ka, sadegot 1 kg sēra, veidojas 2 kg sēra dioksīda.

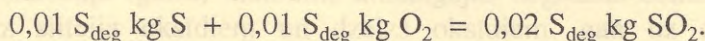
Tā kā gāzes 1 mola tilpums normālos apstākļos ir 22,4 m³, tad



Sakarā ar to, ka sēra saturs kurināmā pasēs uzrādīts procentos, tad nepieciešams veikt pārrēķinu. Bez tam jāņem vērā, ka sēra oksīdus veido tikai degošais sērs



vai



Tas nozīmē, - ja kurināmā sastāvā ir x% sēra, tad, sadedzinot 1 kg kurināmā, veidojas (0,007 · x) m³ SO₂ vai (0,02 · x) kg SO₂. Tātad sēra dioksīda izmešu daudzums attiecināts uz 1 kg kurināmā aprēķināms:

$$K_{\text{SO}_2} = 20 \cdot S_{\text{deg}}, \text{ g/kg},$$

kur S_{deg} - degošā sēra saturs kurināmajā, %.

Kaut arī iepriekš tika aplūkots, ka sēra oksīdus dūmgāzēs noteiktos gaisa padeves un temperatūru līmeņos veido arī sulfātu sērs, šeit izmantots tikai degošais sērs kurināmā sastāvā S_{deg}, kura komponenti ir atkarīgi no tā agregātstāvokļa.

- Cietajam kurināmajam $S_{deg} = S_O + S_{sd}$.
- Mazutam $S_{deg} = S_O$.

Sēra dioksīda izmešu daudzumu, kas attiecināts uz sadedzinātā kurināmā siltuma daudzuma vienību, nosaka, izmantojot kurināmā sadegšanas siltumu:

$$K_{SO_2}^a = K_{SO_2} / Q_Z^d = 20 \cdot S_{deg} / Q_Z^d, \text{ g/MJ}, \quad (4.3.)$$

kur Q_Z^d - kurināmā zemākais sadegšanas siltums, MJ/kg.

Šāds pārrēķins mazutam, ja tā zemākais sadegšanas siltums ir 40 MJ/kg, ir apkopots 4.2. tabulā.

4.2. tabula

Teorētiskais sēra dioksīda izmešu daudzums.

Sēra saturs mazutā S_{deg} , %	K_{SO_2} , g/kg	Sēra dioksīda daudzums	
		K_{SO_2} , g/MJ mazutam	K_{SO_2} , g/MJ akmeņoglēm
		$Q_Z^d = 40\text{MJ/kg}$	$Q_Z^d = 40\text{MJ/kg}$
0,5	10	0,25	0,50
1,0	20	0,50	1,00
1,5	30	0,75	1,5
2,0	40	1,00	2,00
2,5	50	1,25	2,50
3,0	60	1,50	3,00
3,5	70	1,75	

Kurināmā sadegšanas siltums mainās, un tādēļ atšķirīgs ir arī sēra dioksīda izmešu daudzums uz siltuma enerģijas vienību. Lai vienkāršotu teorētisko sēra dioksīda izmešu daudzuma noteikšanu, izstrādāta nomogramma, kas parādīta 4.1. attēlā. Ar tās palīdzību iespējams noteikt

maksimāli iespējamo sēra dioksīda koncentrāciju dūmgāzēs, sadedzinot jebkuru sēru saturošu kurināmo.

Svarīgi atzīmēt, ka šīnī gadījumā tiek uzskatīts, ka viss degošais sērs veido tikai sēra dioksīdu. Patiesais sēra dioksīda daudzums būs mazāks, un tā aprēķināšanas vienādojumā jāizdara korekcijas, kuras pamatojas uz eksperimentāliem datiem; tās aplūkotas tālāk.

4.3.2. Izmešu eksperimentālā noteikšana

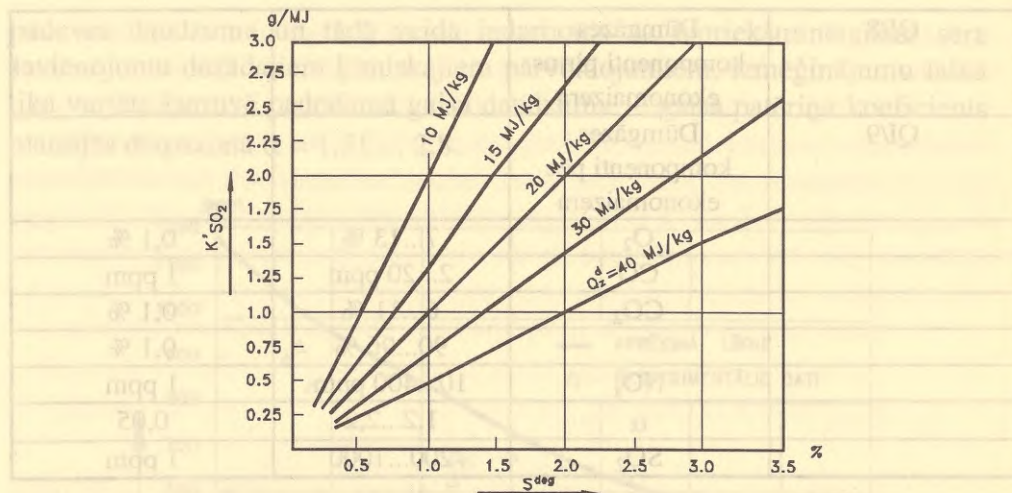
Eksperimentālie pētījumi veikti ar gāzu analizatora MSI - 2000P (Vācija) un *Bacharach* modeļa 3000 M NSX (ASV) palīdzību. Mēraparāti dod iespēju noteikt skābekļa O₂, tvana gāzes CO, slāpekļa oksīdu NO_x, un sēra dioksīda SO₂ koncentrācijas dūmgāzēs. Pamatojoties uz mērījumu rezultātiem, gāzes analizatora skaitļotājs aprēķina ogļskābās gāzes CO₂ saturu dūmgāzēs un gaisa patēriņa koeficienta α vērtības. Aparātam pieslēgtā termoprestestība nosaka āra gaisa temperatūru. Šie mērījumi ļauj noteikt siltuma zudumus ar aizplūstošām dūmgāzēm un ķīmiski nepilnīgu sadegšanu katla kurtuvē, un gala rezultātā iespējams izskaitļot kurināmā degšanas efektivitāti, kas šīnī gadījumā ir lielāka par patieso katla lietderības koeficienta vērtību, jo neņem vērā siltuma zudumus apkārtējā vidē. Abu gāzu analizatoru datorā ievadītā programma ļauj noteikt degšanas efektivitātes koeficienta vērtības ar Sigerta vienādojumu palīdzību. Tās var nolasīt uz displeja.

Lai varētu analizēt iegūtos rezultātus, jāaplūko sakarība starp mērītajiem un aprēķinātajiem lielumiem. SO₂ komponentu vērtības noteiktas mērvienībā - ppm. Tāpēc, lai iegūtu koncentrāciju mg/m³, nepieciešams pārrēķins, lietojot vienādojumu

$$C_{\text{SO}_2} = 2,86 \cdot \text{SO}_2, \text{ mg/m}^3,$$

kur SO₂ - sēra dioksīda koncentrācija, ppm.

Gaisa patēriņa koeficientu α nosaka pēc vienādojumiem (2.4.) un (2.5.).



4.1. att. Teorētiskā sēra dioksīda izmešu daudzuma noteikšana.

4.3.tabula

Mērījumu diapazons un precizitāte.

Apzīmējumi 1.10.att.	Mērāmā parametra nosaukums	Izmaiņu diapazons	Noteikšanas precizitāte
FI/1	Mazuta patēriņš	700...1100 kg/h	20 kg/h
PI/2	Tvaika spiediens	7,7...11 bar	0,25 bar
FI/3	Tvaika ražība	16...25 t/h	500 kg/h
TI/4	Dūmgāzes temperatūra pirms ekonomaizera	270...320 °C	1,0 °C
TI/5	Tas pats pēc ekonomaizera	160...180 °C	0,5 °C
TI/6	Barošanas ūdens temperatūra pirms ekonomaizera	60...100 °C	1,0 °C
TI/7	Tas pats pēc ekonomaizera	104...140 °C	1,0 °C

QI/8	Dūmgāzes komponenti pirms ekonomaizera		
QI/9	Dūmgāzes komponenti pēc ekonomaizera		
	O ₂	7...13 %	0,1 %
	CO	2...20 ppm	1 ppm
	CO ₂	6...11 %	0,1 %
		90...96 %	0,1 %
	NO _x	10...400 ppm	1 ppm
	α	1,2...2,2	0,05
	SO ₂	200...1000	1 ppm

Gaisa patēriņa koeficienta α vērtības var aprēķināt arī ar formulu

$$\alpha = \text{CO}_{2\text{max}}/\text{CO}_2,$$

kur $\text{CO}_{2\text{max}}$ - teorētiski iespējamais maksimālais komponentu daudzums, %;
 CO_2 - mērījumu brīdī iegūtais lielums.

Maksimālais $\text{CO}_{2\text{max}}$ daudzums ir aprēķināts dažāda veida kurināmiem atkarībā no oglekļa satura, un dati ievadīti gāzes analizatora atmiņā.

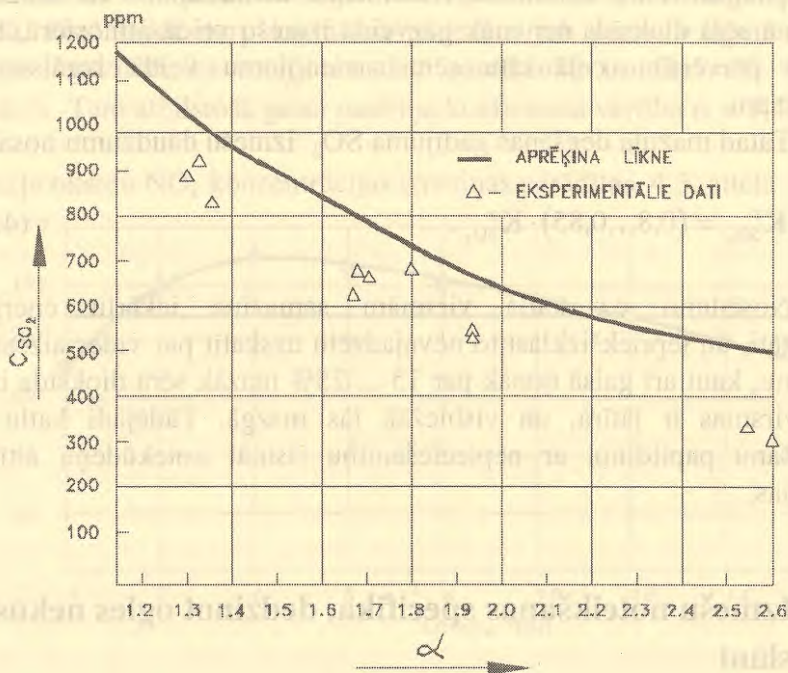
Ogļskabās gāzes daudzumu aprēķina, pielīdzinot abas pēdējās izteiksmes. Tā rezultātā iegūts CO_2 aprēķina vienādojums

$$\text{CO}_2 = \text{CO}_{2\text{max}} (1 - \text{O}_2/21), \% \quad (4.4.)$$

Enerģētiskās iekārtas shēma, mērāmie parametri, kā arī vieta, kur šie parametri noteikti, parādīta 1.11.attēlā (atšķiras vienīgi kurināmais). Savukārt, mērāmo lielumu raksturojumi katliem DE 25/14 doti 4.3.tabulā.

Eksperimentālo pētījumu laikā katls strādāja ar nemainīgu slodzi un kurināmā patēriņu. Lai atrastu sēra dioksīda izmaiņas atkarībā no gaisa

padeves daudzuma un tādā veidā iedarbotos uz iepriekšminētajiem sēra savienojumu dažādajiem ķīmiskajiem pārveidojumiem, izmēģinājumu laikā tika variēts kurtuvē padodamā gaisa daudzums - gaisa patēriņa koeficients mainījās diapazonā $\alpha = 1,31 \dots 2,8$.



4.2. att. Sēra dioksīda izmaiņas atkarībā no gaisa patēriņa koeficienta.

Sēra dioksīda izmaiņas atkarībā no gaisa patēriņa koeficienta, izmantojot eksperimentu datus un aprēķinus, ilustrētas 4.2. attēlā. Eksperimentālie punkti atrodas zem teorētiskās līknes un visos gadījumos patiesie izmeši atšķiras no teorētiskajiem par 15 ... 25%.

Tas izskaidrojams ar to, ka, analizējot sēra dioksīdu dūmgāzēs, netiek pievērsta uzmanība SO₃ un citu sēra savienojumu noteikšanai. Būtiskāk patieso sēra saturu dūmgāzēs ietekmē tas, ka sēra savienojumu oksidēšanās un reducēšanās reakcijas norit ne tikai kurtuvē, bet arī katla

konvektīvajā daļā un it sevišķi ekonomazerā. Parasti tas izgatavots no ribotām caurulēm, kurām pielīp pelnu un kvēpu cietās daļiņas, kuru sastāvā galvenokārt ir vanādijs savienojumi. Sakarā ar to, ka vanādijs ir aktīvs oksidēšanās - reducēšanās reakciju veicinātājs un dūmgāzu attīrīšanas praksē pazīstams kā katalītiskais elements, acīmredzot 15 ... 25% no iespējamā sēra dioksīda nenonāk gāzveida izmešu veidā atmosfērā, bet gan ķīmisko pārvērtību ceļā citu sēra savienojumu veidā izgulsnējas uz sildvirsmām.

Tātad mazuta degšanas gadījumā SO_2 izmešu daudzumu nosaka:

$$K_{\text{SO}_2}^r = (0,8 \dots 0,85) \cdot K_{\text{SO}_2}^a \cdot \quad (4.5.)$$

Nosēdumi uz katla virsmām samazina iekārtu enerģētisko efektivitāti, un iepriekšizklāstīto nevajadzētu uzskatīt par vides aizsardzības pasākumu, kaut arī gaisā nonāk par 15 ... 25% mazāk sēra dioksīda izmešu. Katlu virsmas ir jātīra, un visbiežāk tās mazgā. Tādējādi katlu mājas darbināšanu papildinot ar nepieciešamību risināt notekūdeņu attīrīšanas problēmas.

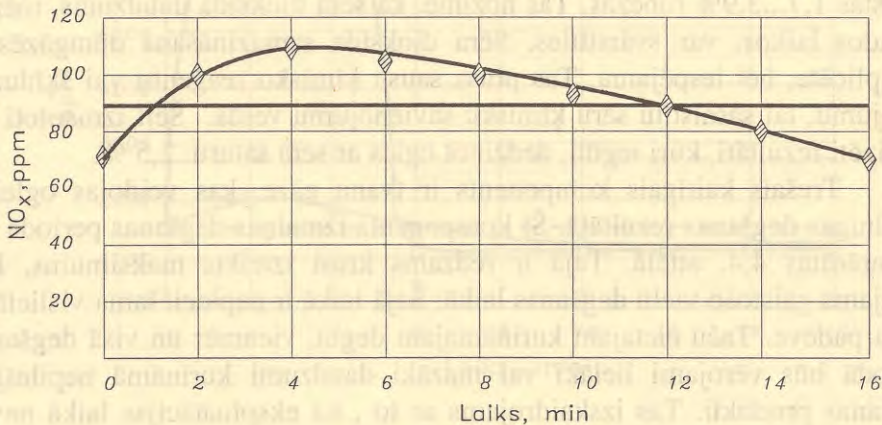
4.3.3. Izmešu noteikšanas specifika, dedzinot ogles nekustīgā slānī

Ogļu degšanas tehnoloģija nekustīgā slānī, tās specifika sīkāk aprakstīta 2.1. apakšnodaļā. Tajā aplūkoti eksperimentālo pētījumu [4.16.] rezultāti, vadoties no degšanas procesa inženiertehniskā aspekta un enerģētiskās efektivitātes viedokļa. Šajā nodaļā vairāk uzmanības pievērsts vides piesārņojuma izmaiņām ogļu degšanas procesa laikā.

Kurtuvju izmēģinājumu laikā tika noteikts tvana gāzes CO , arī slāpekļa oksīdu NO_x un sēra dioksīda SO_2 saturs dūmgāzēs [4.16.]. Šo komponentu koncentrācijas izmaiņas ir būtiskas, jo tie ir toksiski un par izmešiem ir jāmaksā nodoklis. Eksperimentālie dati grafiski parādīti 4.3. un 4.4. attēlā. Aplūkojot iegūtos komponentu izmaiņu datus, jāatzīmē, ka

vērojams krasi izteikts degšanas procesa periodiskums no vienas kurināmā padeves kurtuvē līdz nākamajai. Šī perioda laikā izpaužas agrāk aplūkotās degšanas procesa īpatnības. Gāzes sastāva izmaiņās tas izpaužas kā komponenta koncentrācijas pieaugums līdz maksimumam un tālākā samazināšanās līdz procesa beigām. Šeit parādīti dati, kuri iegūti degšanas procesā, kurā laiks starp kurināmā padevēm jeb perioda ilgums bija 16 minūtes. Jāatzīmē, ka mērījumu dati pārrēķināti uz $O_2 = 6\%$ saturu dūmgāzēs. Tam atbilstošā gaisa patēriņa koeficienta vērtība $\alpha = 1,4$.

Slāpekļa oksīdu NO_x koncentrācijas izmaiņas parādītas 4.3. attēlā



4.3. att. Slāpekļa oksīdu koncentrācijas izmaiņas degšanas procesa laikā.

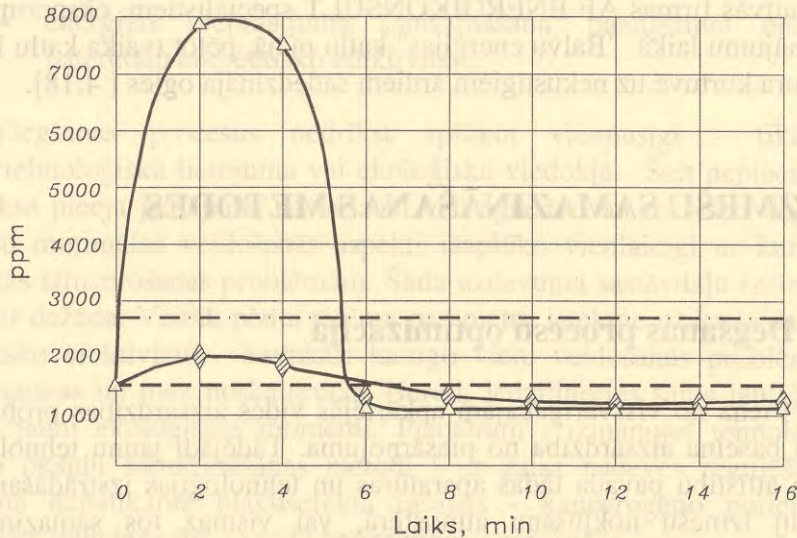
Kā redzams, komponentu izmaiņās strikti parādās degšanas procesa periodiskums, kas raksturīgs kurināmā degšanai slānī. Attēlā nav parādīts, bet mērījumos konstatēts, ka analogisks raksturs ir arī dūmgāzu temperatūras izmaiņām. Tās vērtība no 1. līdz 4. min. ir visaugstākā. Šajā laikā visintensīvāk notiek gaistošo vielu degšana. Sakarā ar to, ka temperatūra ir augsta, šajā laikā visintensīvāk veidojas slāpekļa oksīdi. Taču slāpekļa oksīdu samazināšanos pēc 4 minūtēm nevar izskaidrot vienīgi ar temperatūras pazemināšanos [4.17.]. Šķiet, šeit nozīmīgs ir arī tas apstāklis,

ka samazinās slāpekļa daudzums kurināmajā, jo daļa no tā ir jau oksidējusies.

Sēra dioksīda un tvana gāzes izmaiņas parādītas 4.4. attēlā. Tāpat kā slāpekļa oksīdu gadījumā arī sēra dioksīda daudzums vislielākais ir gaistošo vielu izdalīšanās laikā degšanas procesa sākumā. Turpinoties degšanai, sēra dioksīda daudzums samazinās. Rezultātā izdeg viss gaistošais sērs. Pirmajā fāzē īsā laikā sadeg vieglāk gaistošā organiskā sēra daļa. Slāpekļa oksīdu koncentrāciju ietekmē degšanas apstākļi, sevišķi temperatūra (termiskie oksīdi), bet sēra dioksīda daudzumu nosaka sēra saturs kurināmajā. Latvijā izmantojamās oglēs (galvenokārt no Doņeckas baseina) gaistošā sēra saturs svārstās 1,7...3,9% robežās. Tas nozīmē, ka sēra dioksīda daudzums, mērīts dažādos laikos, var svārstīties. Sēra dioksīda samazināšana dūmgāzēs ir komplicēta, bet iespējama. Tas prasa sausu ķīmisko reaģentu vai šķīdumu lietojumu, lai sasaistītu sēru ķīmisku savienojumu veidā. Šeit izmantoti un analizēti rezultāti, kuri iegūti, dedzinot ogles ar sēra saturu 2,5 %.

Trešais kaitīgais komponents ir tvana gāze, kas veidojas oglekļa nepilnīgas degšanas rezultātā. Šī komponenta izmaiņas degšanas periodā arī ir parādītas 4.4. attēlā. Tajā ir redzams krasi izteikts maksimums, kas vērojams gaistošo vielu degšanas laikā. Šajā laikā ir nepieciešama vislielākā gaisa padeve. Taču cietajam kurināmajam degot, vienmēr un visā degšanas periodā būs vērojami lielāki vai mazāki daudzumi kurināmā nepilnīgas degšanas produkti. Tas izskaidrojams ar to, ka ekspluatācijas laikā nevar nodrošināt vienādu izdedžu un kurināmā slāņa biezumu visā ārdu virsmā. Kurināmā gabali arī nav vienāda lieluma. Tā rezultātā gaiss, kas plūst caur slāni, tiek nevienmērīgi izmantots. Daļa skābekļa iziet cauri slānim, neiesaistoties degšanas reakcijās, jo kurināmā un gaisa saskares laiks, sevišķi slāņa plānākajās vietās, ir par mazu. Virs kurināmā, kurtuves tilpumā daļa tvana gāzes sadeg, izmantojot skābekli, kurš izgājis cauri kurināmā slānim. Taču arī šeit ir nepilnīgas degšanas produkti un brīvs skābeklis. Tas liecina par nepilnībām gaisa un degšanas produktu sajaukšanās procesā. No sacītā izriet, ka tvana gāze vienmēr būs cietā kurināmā degšanas produktos, ja šo kurināmo dedzinās slānī un netiks realizēta gaisa padeve kurtuves dažādās vietās. Šo produktu daudzumu, ja neregulē velkmi, ietekmē kurināmā slāņa biezums. Ja kurināmo dedzina

pārāk biežā slānī, tad nepilnīgas degšanas produktu daudzums pieaug un robežgadījumā process tuvojas gāzu ģeneratora procesam. Dedzinot pārāk plānā slānī, degšanas produktu daudzums samazinās, taču gāzēs vērojams liels neizmantojama gaisa daudzums. Šāda režīma gadījumā kurināmais biežāk jāpadod kurtuvē un degšanas periods var būtiski samazināties.



4.4. att. Sēra dioksīda un oglekļa monoksīda koncentrācijas izmaiņas degšanas procesā.

Nosakot komponentu koncentrāciju vērtības, ir jāņem vērā ļoti būtisks apstāklis - degšanas procesam ir izteikti periodisks raksturs un šo periodu nosaka kurināmā padeve kurtuvē. Sakarā ar minēto izmaiņu raksturu komponentu koncentrāciju nevar noteikt degšanas perioda sākumā, jo tad tā būs neatbilstoši liela, kā arī to nedrīkst darīt perioda beigās, jo tad tā būs pārāk maza. Par atskaites vērtību jāpieņem vidējās vērtības perioda laikā.

Noteiktās vidējās koncentrāciju vērtības, ja skābekļa saturs dūmgāzēs ir $O_2 = 6\%$ un atbilstošs gaisa patēriņa koeficients $\alpha = 1,4$:

- slāpekļa oksīdiem NO_x 90 ppm;
- sēra oksīdiem SO₂ 1460 ppm;
- tvana gāzei CO 2650 ppm.

Šīs vērtības horizontālu līniju veidā parādītas 4.3. un 4.4. attēlā.

Šajā nodaļā izklāstītais apstiprinājās, strādājot kopā ar zviedru konsultatīvās firmas AF ENERGIKONSULT speciālistiem, eksperimentālo izmēģinājumu laikā "Balvu enerģijas" katlu mājā, pētot tvaika katlu DKVR 4/13, kura kurtuvē uz nekustīgiem ārdiem sadedzināja ogles [4.18].

4.4. IZMEŠU SAMAZINĀŠANAS METODEDES

4.4.1. Degšanas procesu optimizācija

Viena no vissvarīgākajām apkārtējās vides aizsardzības problēmām ir gaisa baseina aizsardzība no piesārņojuma. Tādējādi jaunu tehnoloģisko procesu attīstību pavada tādas aparatūras un tehnoloģijas izstrādāšana, kas nepieļauj izmešu nokļūšanu atmosfērā, vai vismaz tos samazina līdz pieļaujamiem līmeņiem.

Vides aizsardzība no piesārņojuma ir viens no svarīgākajiem argumentiem enerģētiskās efektivitātes uzlabošanā un zemāko izmaksu plānošanas metodes realizācijā. SO₂, NO_x un citi kaitīgie izmeši var tikt samazināti un iekļauti izmaksās, turpretī CO₂ samazināšanai šobrīd nav tehnoloģijas. Ogļskābās gāzes minimizāciju iespējams sasniegt ar šādiem līdzekļiem:

- organiskā kurināmā patēriņa samazināšana, uzlabojot enerģijas ražotāja enerģētisko efektivitāti (esošo katlu māju darbības efektivitātes paaugstināšana, koģenerācijas energoavotu veidošana, kombinēto ciklu realizēšana, izmantojot gāzes turbīnas);

- organiskā kurināmā lietojuma minimizācija, aizvietojot to ar atjaunojamiem energoresursiem;
- organiskā kurināmā ar augstu oglekļa saturu (ogles) aizvietošana ar kurināmo, kurā oglekļa saturs ir zems (dabas gāze);
- organiskā kurināmā aizvietošana ar enerģētisko koksni (koksnes atkritumiem, speciāli audzētiem krūmiem);
- enerģijas pieprasījuma samazināšana, paaugstinot enerģijas patērētāju enerģētisko efektivitāti.

Degšanas procesus nedrīkst aplūkot vienpusīgi - tikai no inženiertehnoloģiskā lietojuma vai ekoloģiskā viedokļa. Šeit nepieciešama kompleksa pieeja jautājuma risināšanā: visi agresīvo un toksisko degšanas produktu minimālas veidošanās aspekti jāaplūko vienlaicīgi ar kurināmā racionālas izmantošanas problēmām. Šāda uzdevuma sastāvdaļu izzinātības pakāpe ir dažāda. Vairāk pētīta režīma parametru ietekme uz katla darbības enerģētisko efektivitāti. Savukārt kaitīgo vielu veidošanās problēmas ir samērā jaunas un maz noskaidrotas. Nereti, iedziļinoties šajos jautājumos, atklājas jauni ekoloģiskie momenti. Piemēram, izmantojot tehnoloģisko slāpekļa oksīdu samazināšanas metodi (ar gaisa padeves regulēšanu), iespējama nepatīkama blakusefekta rašanās - kancerogēno policiklisko aromātisko ogļūdeņražu, to vidū benzpirēna, veidošanās.

4.4.2. Slāpekļa oksīdu samazināšanas izpēte

Kā jau iepriekš minēts, kurināmā degšanu pavada dažādu toksisku gāzveida komponentu rašanās, to vidū slāpekļa monooksīdu NO, dioksīdu NO₂ un citu slāpekļa savienojumu veidā, summāri apzīmējamu ar NO_x. NO_x emisija liesmā vistiešākajā veidā ir saistīta ar slāpekļa oksidēšanās kinētisko mehānismu, kurināmajam sadegot. Jāatzīmē, ka, neskatoties uz vairākiem sasniegumiem (skat. 2. nodaļu), vēl joprojām slāpekļa oksīdu veidošanās kinētikas pilnvērtīga modeļa izveidē nav iegūts galīgais rezultāts. Tādēļ, lai izstrādātu modeļus, kuru lietojums ir iespējams noteiktā

parametru diapazonā, tika veikti izmēģinājumi, kuru dati tika statistiski apstrādāti [4.19].

Slāpekļa oksīdu samazināšanas tehnoloģisko metožu būtība slēpjas NO_x veidošanās mehānisma traucēšanā, lai degšanas procesā slāpekļa oksīdu rastos pēc iespējas mazāk. To var realizēt dažādi, jo slāpekļa oksidēšanās ir atkarīga no daudziem priekšnosacījumiem. Kurtuves konstrukcija, ekranēšanas pakāpe, degļu uzbūve, to novietojums, katla slodze, kurināmā veids un sastāvs, katla ekspluatācijas parametri veido kopējos apstākļus, lai noritētu iepriekš aplūkotās slāpekļa oksīdu veidošanās reakcijas.

4.4.2.1. Slāpekļa oksīdu tehnoloģiskā samazināšana

Slāpekļa oksīdu samazināšanas tehnoloģisko metožu izvēle ir atkarīga gan no katlu slodzes, gan kurtuves konstrukcijas, kurināmā veida un citiem faktoriem. Protams, ka tas, kas ir pieņemams jaunam katlam, nav realizējams vecajos, tādēļ prasību līmenim jābūt atšķirīgam. Jaunām iekārtām parasti tiek uzstādīti zema satura slāpekļa oksīda (*LOW NOX*) degļi un sprauslas.

Cita pieeja ir ekspluatācijā esoša katla slāpekļa oksīdu līmeņa minimizācijas paņēmiena meklēšanā. Viena no vienkāršākajām metodēm ir slāpekļa oksīdu samazināšana, kurtuvē iesmidzinot ūdeni. Tās izpētei dabas gāzes degšanas procesā vēltīta šī nodaļa, kurā apkopoti rezultāti, kas iegūti autores un RTU radošās grupas kopīgajā darbā.

Vadoties no iepriekš aplūkotajiem slāpekļa oksīdu veidošanās mehānismiem, tiek uzskatīts, ka gāzveida kurināmajam kurināmā slāpekļa oksīdu daudzums ir nesalīdzināmi mazs un tāpēc summāro daudzumu sastāda ātrie un termiskie NO_x .

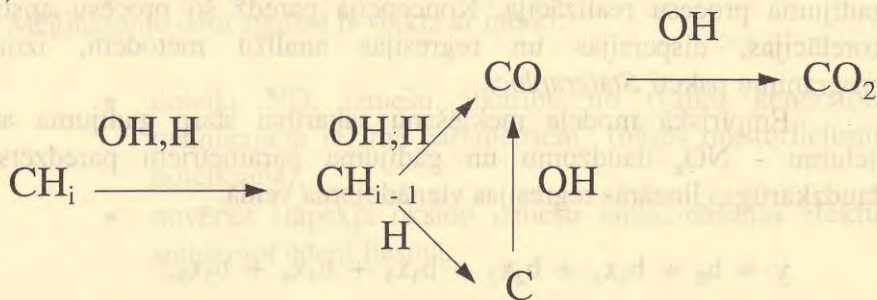
Starp daudzajiem faktoriem, kuri ietekmē slāpekļa oksīdu ģenerāciju katlu kurtuvēs, var izdalīt šādus [4.19.]:

- komponentu koncentrācija liesmā notiekošajās termoķīmiskajās reakcijās;
- sadegšanas produktu uzturēšanās laiks liesmas augsto temperatūru zonā;
- temperatūru līmenis reakciju zonā.

Slāpekļa oksīdu veidošanās minimizēšanu degšanas procesos ar ūdens lokālās iesmidzināšanas metodi liesmas augsto temperatūru zonā tiek veikta, iedarbojoties uz augstākminētajiem faktoriem [4.20.].

Gāzes deglis pirmajā tuvinājumā, īpaši sākuma iecirknī, var tikt uzstādīts kā daudzu gāzes elementārstrūkliņu kopums gaisa plūsmā. Strūklas degšanu raksturo ievērojams struktūras nevienadīgums liesmas šķērsgrīzumā. Šajā iecirknī veidojas ātrie slāpekļa oksīdi. Iesmidzināmais ūdens veicina degošās gāzes, gaisa un sadegšanas produktu plūsmu intensīvāku sajaukšanos, kas vājina maisījumu un samazina NO_x izplūdi. Attālinoties no degļa, plūsmu strūkliņas sajaucas un ūdens padeve uz tām no liesmas struktūras izlīdzināšanās un ogļūdeņražu oksidēšanās reakcijas intensifikācijas viedokļa nav efektīva.

Ūdens padeve degošo gāzu maisījumā izraisa aktīvu O un OH radikāļu rašanos. Ātro NO_x rašanos izskaidro ar slāpekļa molekulu saistīšanos ar ogļūdeņražu radikāļiem, turpretī ūdens izsmidzināšana noteiktā liesmas vietā ļauj novirzīt ķīmiskās reakcijas norises mehānismu ogļūdeņraža oksidēšanās procesu virzienā:



Ogļūdeņraži, kuri saistīti ar O un OH radikāļiem, nereaģē ar slāpekļa molekulām, un tādējādi samazinās slāpekļa oksīdu rašanās iespējas. Lokālā ūdens pievadišana palielina gāzu tilpumu padeves zonā. Tas noved pie tā, ka samazinās gāzu klātbūtnes laiks augsto temperatūru zonā un attiecīgi samazinās termisko NO_x skaits. Gāzes klātbūtnes laika samazināšanu veicina arī degšanas reakcijas intensifikācija uz hidroksilradikāļu OH papildu daudzuma rēķina.

Ūdens padeve liesmā samazina maksimālās temperatūras līmeni vairāku iemeslu dēļ. Tas, pirmkārt, notiek ūdens iztvaicēšanai nepieciešamā siltuma patēriņa dēļ un izveidojušos tvaiku pārkarsēšanai līdz liesmas temperatūrai. Otrs temperatūras samazināšanās iemesls ir tas, ka pārkarsēto tvaiku klātbūtne liesmā palielina trīsatomu gāzu daudzumu, kuri ir galvenā starojošā vide. Tādējādi tvaika klātbūtne liesmā palielina radiācijas siltumatdevi. Starošanas siltumatdeves palielināšanās notiek arī tāpēc, ka ūdens padošanas rezultātā, īpaši liesmas sākuma zonā, tā kļūst tumšāka, kas liecina par brīva oglekļa klātbūtni un attiecīgi palielina tās melnuma pakāpi. Darbā [4.21.] veiktie aprēķinu rezultāti apstiprina mēģinājumos novērotās parādības.

Faktoru, kas ietekmē NO_x rašanos, nosaka siltumģenerējošās iekārtas darba režīms un konstrukcija, bet konkrētai iekārtai - darba režīms. Darbā [4.19.] dota informatīvo parametru analīze, kuri raksturo darba režīmu, un izvēlēts minimāli nepieciešamais to kopums, kas nosaka slāpekļa oksīdu veidošanos. NO_x emisija, kā parādīts [4.19.], ir stacionāru ergodisku gadījuma procesu realizācija. koncepcija paredz šo procesu apstrādi ar korelācijas, dispersijas un regresijas analīžu metodēm, izmantojot programmu paketi *Statgraphic*.

Empīriskā modeļa meklēšanu sakarībai starp gadījuma atkarīgo lielumu - NO_x daudzumu un gadījuma parametriem paredzēts veikt daudzkārtīgas lineārās regresijas vienādojuma veidā:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5,$$

kur y - regresijas vienādojuma novērtējums, aprēķinātā NO_x emisija;

$b_{0...5}$ - vienādojuma koeficienti;

$x_1 = q_V$ - kurtuves tilpuma termiskā slodze;

$x_2 = \theta$ - temperatūras faktors;

$x_3 = \alpha$ - gaisa patēriņa koeficients;

$x_4 = q_V \cdot \theta$ - pāru efekts;

$x_5 = q_V \cdot \alpha$ - pāru efekts.

Piedāvātais empīriskais modelis ļauj novērtēt NO_x izmešu daudzumu pēc mēraparātiem, kuri novietoti kaltu mājā un lietojami siltumenerģētisko iekārtu darba kontrolei ekspluatācijas gaitā.

4.4.2.2. Slāpekļa oksīdu samazināšanas eksperimentālā pārbaude

Eksperimentālie pētījumi, lai noteiktu slāpekļa oksīdu daudzumu un novērtētu to minimizācijas efektivitāti kurtuvē, lietojot lokālo ūdens iesmidzināšanas metodi liesmas augsto temperatūru zonā, tika veikti tvaika ģeneratoros DE-16/14 (ražoti Krievijā), ar tvaika ražību 16 t/h; DCL 2 (ražoti Itālijā), ar tvaika ražību 20 t/h; ūdens sildāmajos katlos, kas darbojas ar gāzveida kurināmo, RK-1,6 (ražoti Latvijā), PRK-650 (ražoti Itālijā) un PR-265 (ražoti Itālijā), ar siltuma ražību attiecīgi 2,1, 0.85 un 0.35 MW. Rūpniecisko tvaiku ģenerējošo iekārtu pētījumu shēma, mērījumi, parametru mērījumu precizitāte un to sākotnējā apstrāde dota [4.19.].

Mēģinājumu datu analīze ir veikta ar mērķi:

- noteikt NO_x izmešu atkarību no tvaiku ģeneratora mainīgajiem režīma parametriem (bāzes raksturlielumu noteikšana);
- novērtēt slāpekļa oksīdu izmešu samazināšanās efektu, smidzinot ūdeni liesmā.

Pirmo jautājumu risina ar daudzfaktoru regresīvās analīzes metodi, atrodot empīrisku modeli regresijas vienādojuma veidā. Tvaika ģeneratoru

bāzes raksturlielumu aprēķināšanai vienādojuma koeficientu novērtējums iegūts ar izlases metodi no 80 novērojumiem. Analīzes gaitā tika aplūkoti arī citi vairākkārtējās regresijas vienādojumu veidi, to skaitā arī tādi, kuri ievēro neatkarīgo mainīgo trīskāršos mijiedarbības efektus. Tomēr tālākajā gaitā no tiem vajadzēja atteikties, jo tie nedeva būtisku uzlabojumu sakritībai starp aprēķinātajiem (paredzētajiem) un izmērītajiem slāpekļa oksīdu izmešu lielumiem.

Datu apstrādē pieņemts ticamības intervāls, kas atbilst 95% varbūtībai, un zīmīguma līmenis $\alpha_v = 0,05$. Vienādojuma koeficientu aprēķinu rezultāti, to noteikšanas standarta kļūdas, Stjudenta kritērija t un to nozīmīguma līmeņa p vērtības dotas 4.4. tabulā.

4.4. tabula

Vienādojuma elementu aprēķins.

Neatkarīgie mainīgie	Koeficients	Standarta kļūda	Vērtība p	α_v
b_0	1440.475648	455.264538	3.1640	0.0023
$x_1 = q_v$	-3.513595	1.025063	-3.4277	0.0010
$x_2 = \theta$	-2487.894834	582.095668	-4.2740	0.0001
$x_3 = \alpha$	537.394195	158.772251	3.3847	0.0011
$x_4 = q_v \cdot \theta$	6.118723	1.296704	4.7187	0.0000
$x_5 = q_v \cdot \alpha$	-1.122077	0.368244	-3.0471	0.0032

Veicot regresijas analīzi, jāmeklē atbilde vismaz uz diviem jautājumiem:

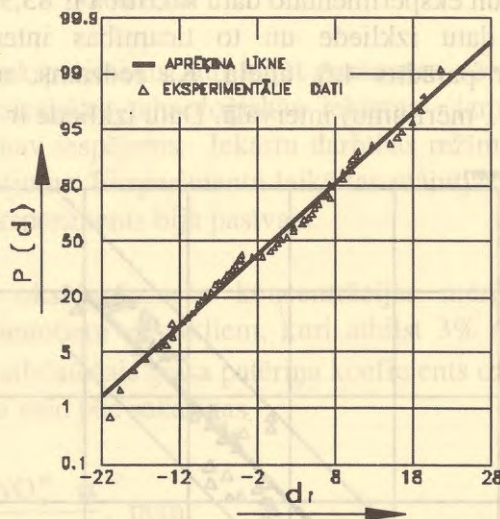
- vai aplūkojamie mainīgie ir gadījuma lielumi;
- vai atkarīgā gadījuma mainīgā lieluma sadalījums atbilst normālajam sadalījuma likumam.

Ja tiek ievēroti minētie noteikumi, tad regresijas analīzes lietojums ir pamatots. Atbildi uz jautājumiem var iegūt, analizējot starpības

$$d_i = y - u, \quad (4.6.)$$

kur y - aprēķina rezultāts pēc vienādojuma;
 u - mērītais lielums.

Starpību d_i sadalījums ir dots 4.5. attēlā.



4.5. att. NO_x izmešu daudzuma sadalījums.

Kā redzams attēlā, starpību sadalījums atbilst normālajam sadalījuma likumam un regresijas analīzes lietojums ir pamatots.

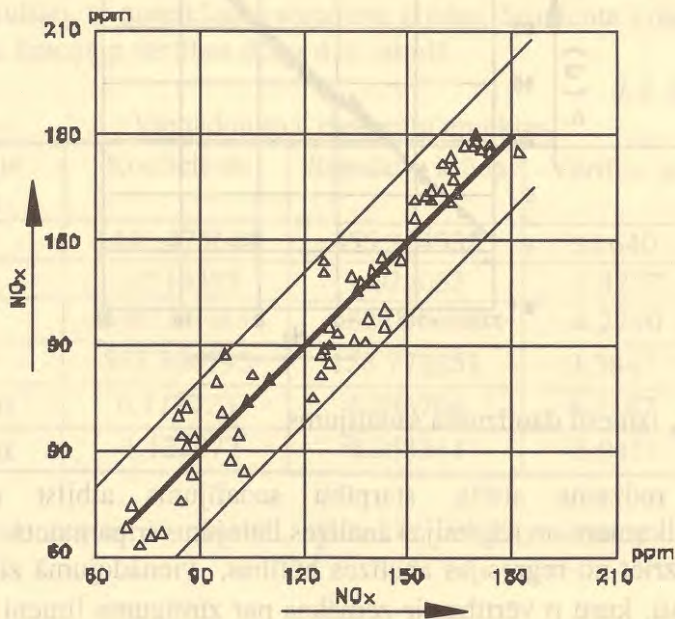
Kā izriet no regresijas analīzes būtības, vienādojumā zīmīgi ir visi tie koeficienti, kuru p vērtības ir zemākas par zīmīguma līmeni $\alpha_v = 0,05$. No matemātiskās statistikas analīzes viedokļa izriet, ka vienādojumā jāpatur visi elementi. Tādā gadījumā, pamatojoties uz tvaika ģeneratoru DE-16/14 un DCL-2 mēģinājumu datiem, slāpekļa oksīdu izmešu daudzuma noteikšanu apraksta empīriskā sakarība:

$$\text{NO}_x = 1440,5 - 3,514q_v - 2487,9\theta + 537,4\alpha + 6,12q_v\theta - 1,112q_v\alpha, \quad \text{ppm.} \quad (4.7.)$$

Šis vienādojums noteikts, visus datus pārrēķinot vienādiem apstākļiem:
 $O_2 = 3\%$.

Regresijas analīzes rezultātā iegūtā korelācijas koeficienta kvadrāta vērtība $R^2 = 0,839$ (R - squared) liecina par to, ka, lietojot vienādojumu, aprēķinu rezultātu un eksperimentālo datu sakritība ir 83,9%.

Mērījumu datu izkliede un to ticamības intervāls, kas atbilst varbūtībai 0,95, ir parādīts 4.6. attēlā. Kā redzams, mērījumu rezultāti iekļaujas (izņemot 1 mērījumu) intervālā. Datu izkliede ir ± 24 ppm.



4.6. att. Slāpekļa oksīdu izmešu eksperimentālo datu un aprēķinu lielumu salīdzinājums:

— - aprēķini; Δ - eksperimentu dati.

Veiktais pasīvais eksperiments ļāva fiksēt atkarīgā mainīgā slāpekļa oksīdu NO_x emisiju un tai atbilstīgi neatkarīgo mainīgo - kurināmā daudzuma, gaisa patēriņa koeficienta un tvaika spiediena lielumu vērtības.

Vispārējā gadījumā eksistē iespējas veikt divējādus siltumtehnikos eksperimentus:

- pasīvo,
- aktīvo.

Aktīvais eksperiments ļauj iegūt parametru vērtības nepieciešamajā diapazonā. Rūpnieciskas tehnoloģiskās iekārtas izmēģinājumu laikā to faktiski realizēt nav iespējams. Iekārtu darbības režimusi nosaka patērētāja enerģijas pieprasījums. Eksperimentu laikā tas mainījās. Tādēļ jāuzskata, ka šeit aplūkotais eksperiments bija pasīvais.

Slāpekļa oksīdu izmešu koncentrācijas mērījumu rezultāti tika pārreķināti uz vienotiem apstākļiem, kuri atbilst 3% skābekļa O_2 saturam dūmgāzēs. Tam atbilstošais gaisa patēriņa koeficients $\alpha = 1,17$.

Pārreķinu veic pēc sakarības

$$NO_x = \frac{NO_x^m \cdot \alpha}{1,17}, \text{ ppm}, \quad (4.8.)$$

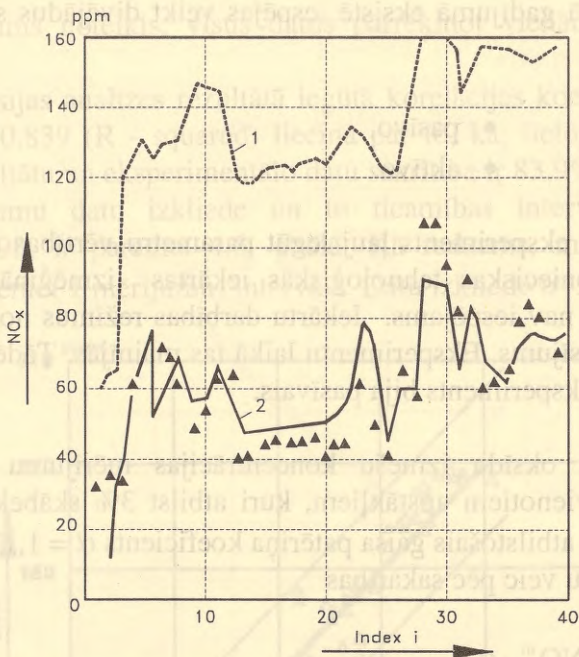
kur NO_x^m - mērītā slāpekļa oksīdu koncentrācija, ppm.

Kurtuves termisko slodzi aprēķina kā

$$q_v = \frac{B \cdot Q_z^d}{V}, \text{ kW/m}^3, \quad (4.9.)$$

kur B - kurināmā patēriņš, kg/s;

V - kurtuves tilpums, m^3 .



4.7. att. Slāpekļa oksīdu izmešu lielumi.

Δ - eksperimentu rezultāti.

Reģresijas modeļu aprēķins: 1 - bez un 2 - ar smidzināšanu.

Šis lielums mērījumu laikā mainījās no 320...500 kW/m³. Spiediena svārstību izraisītās temperatūras izmaiņas 160...185°C. Šīs izmaiņas tika ņemtas vērā ar temperatūras faktora palīdzību

$$\Theta = \frac{t}{t_s},$$

kur t - spiedienam atbilstošā piesātinājuma temperatūra, °C;

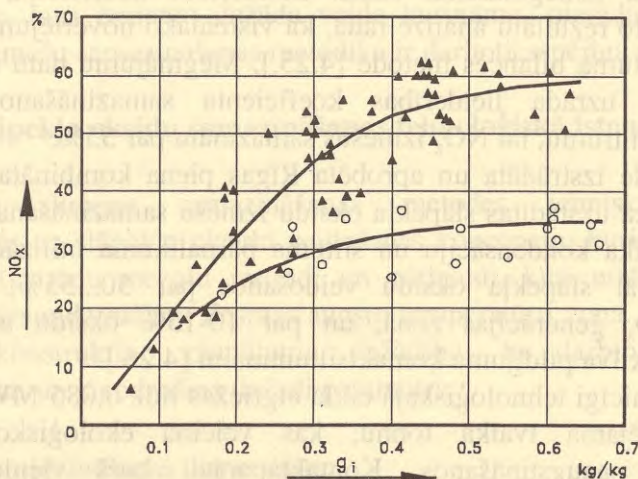
t_s - nominālam spiedienam atbilstošā piesātinājuma temperatūra, °C.

Šis parametrs mainījās no 0,85...0,93.

Gaisa patēriņa koeficients α noteikts pirms ekonomaižera, un tā vērtības svārstījās no 1,17...1,42.

Empīriskais modelis, kurā ņem vērā ūdens iesmidzināšanas ietekmi uz NO_x koncentrāciju izmaiņām liesmas augsto temperatūru zonā, iegūts, pamatojoties uz eksperimenta rezultātu 39 datu kopu apstrādi, un sīkāk apskatīts darbā [4.22.]. 4.7. attēlā atspoguļoti pēc piedāvātajiem regresijas modeļiem veikto aprēķinu rezultāti, kā arī aplūkojamo izlases mēģinājumu dati.

Empīriskie modeļi vienādojuma veidā ir slāpekļa oksīdu izmešu kvantitatīvā novērtējuma, kā arī to samazināšanas metožu efektivitātes pamatā un ļauj prognozēt NO_x līmeni mērķtiecīgu darba režīmu izmaiņu gadījumā. Radītais modelis ļauj arī veikt siltumenerģētisko iekārtu integrālo diagnostiku pēc NO_x izmešu normēto robežu novērtējuma pie fiksētiem informatīvajiem režīmu parametriem.



4.8. att. Slāpekļa oksīdu izmešu minimizācija atkarībā no smidzinātā ūdens un kurināmā attiecības:

Δ - tvaika ģeneratori; o - ūdenssildāmie katli.

Eksperimentu rezultāti slāpekļa oksīdu veidošanās samazināšanai (ģenerācijas nospiešanai) ar mitruma iesmidzināšanu liesmas augsto temperatūru zonā parādīti 4.8. attēlā.

Rūpnieciskie pētījumi katlos ar mitruma iesmidzināšanu NO_x aktīvās veidošanās zonā deva iespēju samazināt izmešu daudzumu tvaika katlu agregātos par 50 ... 55%, bet ūdenssildāmajos - 30 ... 35% [4.22. ... 4.24.].

Ekoloģiskais uzdevums - NO_x izmešu līmeņa samazināšana - ir cieši saistīts ar katlu iekārtu enerģētisko efektivitāti. Optimālākā risinājuma varianta izvēlei jānotiek, ievērojot inženiertehniskos un ekonomiskos parametrus (katla aprīkojuma izmaksas un ekspluatācijas izdevumu gaidāmo palielināšanos). Ekspluatācijas izdevumi palielinās iekārtas lietderības koeficienta samazināšanās gadījumā un pieaugot elektroenerģijas patēriņam.

Lietderības koeficientu novērtē pēc tiešās un apgrieztās siltuma bilances katla izmēģināšanas laikā. Lietderības koeficienta noteikšanas eksperimentālo rezultātu analīze rāda, ka visreālāko novērtējumu nodrošina apgrieztās siltuma bilances metode [4.25.]. Mēģinājumu datu apstrāde pēc šīs metodes uzrāda lietderības koeficienta samazināšanos par 1%, iesmidzinot mitrumu, lai NO_x izmešus samazinātu par 55%.

Metode izstrādāta un aprobēta Rīgas piena kombināta katlos DE-16/14, kur tika uzstādītas slāpekļa oksīdu izmešu samazināšanas iekārtas ar dūmgāzu tvaika kondensāciju un siltuma pārpalikuma utilizāciju. Metode ļauj samazināt slāpekļa oksīdu veidošanos par 50...55%, iesmidzinot mitrumu NO_x ģenerācijas zonā, un par 10-15% oksīdu absorbcijā ar kondensātu aktīva pildījuma kontaktsiltummainī [4.26.].

Vienlaicīgi tehnoloģiskajā ciklā atgriežas līdz 0,085 MW siltuma uz vienu ģenerējamā tvaika tonnu, kas veicina ekoloģisko pasākumu efektivitātes paaugstināšanos. Kontaktparāta, kurš vienlaicīgi pilda vairākas funkcijas, lietošana palielina siltumenerģētiskās iekārtas lietderības koeficientu par 2% un saglabā to nemainīgu, palielinot kurtuvē padodamā ūdens daudzumu. Eksperimentāli apstiprinātā parādība izskaidrojama ar kontaktierīces darbības enerģētiskās efektivitātes paaugstināšanos gāzu

mitrināšanas gadījumā, kas kompensē tvaika ģeneratora lietderības koeficienta samazināšanos, iesmidzinot mitrumu [4.20.].

Decentralizētās siltumapgādes sistēmās plaši lieto siltuma ģeneratorus ar cieto kurināmo un degšanu nekustīgā slānī. Ogļu degšanas fizikāli ķīmisko procesu specifika aplūkota 2. nodaļā. Ar laikā mainīgu oksidēšanās reducēšanās zonu veidošanos, kā arī ar radiācijas siltumapmaiņas īpatnībām kurtuvē, nosaka gāzveida komponentu CO, SO₂ un NO_x koncentrāciju dinamiku dūmgāzēs degšanas laikā un kaitīgo izmešu samazināšanas iespējas ar piedāvāto mitruma ievadīšanas metodi kurtuvē.

Izmēģinājumi tvaika katlos "Minsk" (ar nekustīgo ārdū ogļu kurtuvēm) rūpnīcas "ETMA" (Madona, Latvija) katlu mājā rāda, ka ar piedāvāto metodi izdodas samazināt NO_x izmešus par 15%, bet oglekļa monooksīda izmešus par 48% [4.27.]. Pēdējais skaidrojams ar to, ka ievadītā ūdens strūkļa veicina oglekļa monooksīda sajaukšanos ar neizmantoto skābekli kurtuves telpā.

Ekspimentālie pētījumi dažādu nozīmju un tipu siltuma ģeneratoros, kuri izmanto dažāda veida kurināmo, pierāda, ka piedāvātā gāzveida izmešu samazināšanas metodika ir darbotiespējīga un pamatota.

4.4.2.3. Slāpekļa oksīdu samazināšanas tehnoloģiskā īstenošana

NO_x līmeņa samazināšanas metodes tehniskā realizācija, pamatojoties uz slāpekļa oksīdu veidošanās koncepciju kurināmā degšanas laikā, prasīja tādu mezglu izstrādi un pārbaudi, kuri nodrošinātu ūdens padevi un izsmidzināšanu liesmas augsto temperatūru zonā. Neskatoties uz sprauslu konstruktīvo risinājumu dažādību, to darbībai ir jābūt nepārtrauktai un jānodrošina dažādi parametri:

- smidzināšanas dispersitāte;
- strūkļa garums;
- liesmas atvēruma pamata leņķis un tā potenciālā izmaiņa;
- ūdens patēriņa regulēšanas iespējas un tā atkarība no spiediena;
- caurplūdes izmaiņas iespējas.

Noskaidrots, ka šīm prasībām atbilst centrālās mehāniskās sprauslas ar kanāla garumu, ne mazāku par trim tās diametriem, un liesmas pamata atvērumsa leņķi, ne lielāku par 40° , kas nodrošina sīkas dispersitātes ūdens izsmidzināšanas raksturu rotācijas paraboloida veidā. Atrisināts sprauslas un katla degļa savietošanas uzdevums ar nosacījumu nodrošināt ūdens pilienu padeves leņķa izmaiņu attiecībā pret gāzes liesmas asi $25...80^\circ$ robežās. Katlu iekārtu izmēģinājuma rezultātā atklāta iespēja padot daļu izsmidzinātā mitruma liesmas saknē, bet pamatplūsmu liesmas augsto temperatūru zonā. Tā rezultātā izdevās iedarboties uz slāpekļa oksīdu (kuri veidojas pēc Fenimora un Zeldoviča mehānismiem) ģenerāciju liesmā. Piedāvātais risinājums ir aizsargāts ar patentu [4.28.].

Kurtuvē notiekošo nitrītu un nitrātu atjaunošanās reakciju gala produkts ir molekulārais slāpeklis. Piedāvāts un eksperimentāli pārbaudīts informatīvais optimizācijas parametrs ūdens iesmidzināšanai kurtuvē:

d/p - sprauslas diametra attiecības pret spiedienu pirms tās.

Tā vērtībai vajadzētu būt diapazonā $0.05...0.2$.

Slāpekļa oksīdu veidošanās samazināšanas metodes realizācijai ir izstrādāti un izpētīti dažādi mezgli un tehniskie risinājumi, kas nodrošina nepieciešamos apstākļus ūdens pilienu ievadīšanai liesmā un optimālo apstākļu izveidi. Sasniegta NO_x veidošanās samazināšana:

- ūdenscauruļu tvaika ģeneratoros - par $50...55\%$, ja ūdens un kurināmā attiecība ir 0.5 ;
- ūdenssildāmajos dūmcauruļu katlos - par $30...35\%$, ja ūdens un kurināmā attiecība ir 0.3 .

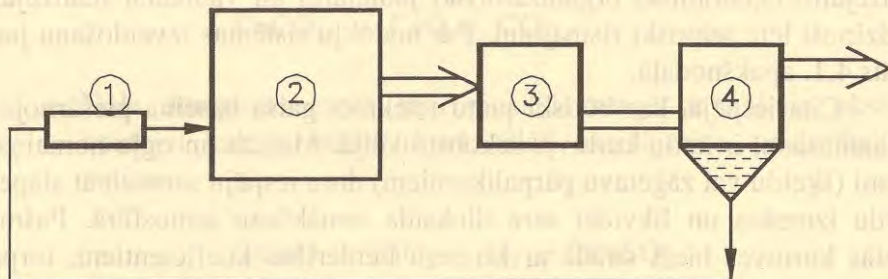
Noskaidrots, kā un vai kvalitatīvi iespējams samazināt slāpekļa oksīdu daudzumu mazas jaudas katlos ar ogļu sadedzināšanu slānī uz nekustīgiem ārdiem. Čuguna sekciju katlu nekustīgo ārdū kurtuvē ūdens tika iesmidzināts karstajās gāzēs virs degošā slāņa. Ūdeni izsmidzināja ar centrālās sprauslas palīdzību, veidojot smalki dispersu pilienu konusus ar tukšu centrālo daļu. Izsmidzināmā ūdens daudzums bija $21 \dots 24 \text{ kg/h}$. Šie

mēģinājumi apstiprināja iespēju ietekmēt slāpekļa oksīdu veidošanās procesu.

Tehnoloģiskā NO_x veidošanās samazināšanas metode ar ūdens iesmidzināšanu liesmā realizēta tvaika katlā DE16/14 Rīgas piena kombinātā (Latvija), tvaika katlā DCL-2 termoelektrostacijā "Cassano" (Itālija) un ūdenssildāmajos katlos PRN-650 un PR-285 Milānas enerģētiskā uzņēmuma AEM (Itālija) Ziemeļu dispečeru stacijas katlu mājā.

Ūdens iztvaikošanai kurtuvē patērē siltumu, kurš zūd, aizvadot skurstenī tvaikus kopā ar dūmgāzu plūsmu. Lai atgūtu tvaika veidošanās siltumu, kā arī labāk attīrītu dūmgāzes un paaugstinātu ekoloģisko pasākumu ekonomiskumu, izstrādāta divpakāpju slāpekļa oksīdu samazināšanas shēma, kura patentēta [4.29.]:

- pirmajā pakāpē tiek realizēta tehnoloģiskā NO_x samazināšana, kondensātu smidzinot kurtuvē,
- otrajā pakāpē tiek veikta slāpekļa oksīdu absorbcija, tvaikam kondensējoties aktīva pildījuma siltummainī.



4.9 att. Divpakāpju slāpekļa oksīdu samazināšana.

1 - sprausla; 2 - katls; 3 - ekonomaizers; 4 - kondensators - absorbers.

Lietots un izpētīts divfunkciju kontaktparāts - absorbers, kas ļauj samazināt NO_x izmešu daudzumu par 10...15%. Kondensāts, kas satur nitrītus un nitrātus, tiek padots iesmidzināšanai liesmā. Tajā notiekošo

atjaunošanas reakciju rezultāts ir molekulārais slāpekļis. Gāzu kompleksās attīrīšanas un dzesēšanas shēma ļauj palielināt siltumenerģētiskās iekārtas

katls \Rightarrow ekonomizers \Rightarrow kondensators - absorbers

lietderības koeficientu kopumā par 2% un saglabāt konstantu efektivitāti, ūdens un kurināmā attiecībai palielinoties (skat. 4.9. attēlu).

Kondensāta izmantošana izsmidzināšanai kurtuvē ļauj izvairīties no otrreizējā apkārtējās vides piesārņojuma ar notekūdeņiem, kuri satur nitrātus un nitrītus.

4.4.3. Sēra oksīdu izmešu samazināšanas iespējas

Sēra oksīdu izmešu samazināšanas klasiskās metodes ir ļoti dārgas un sarežģītas, un, kā jau iepriekš minēts, Latvijas apstākļiem šobrīd nepiemērotas. Tādēļ pirmām kārtām šībrīža situācijā mūsu valstī būtu realizējami ekonomiski organizatoriski jautājumi un vienkārši realizējami, salīdzinoši lēti, tehniski risinājumi. Par nodokļu sistēmas izveidošanu jau ir runāts 4.1. apakšnodaļā.

Cita iespēja, kas būtiski ļautu ietekmēt gaisa baseina piesārņojuma samazināšanu, ir katlu kurtuvju rekonstrukcija. Mazuta un ogļu nomaīņa ar koksnī (šķeldu vai zāģētavu pārpalikumiem) dotu iespēju samazināt slāpekļa oksīdu izmešus un likvidēt sēra dioksīda nonākšanu atmosfērā. Pašmāju ražotās kurtuves bieži strādā ar zemiem lietderības koeficientiem, turpretī Skandināvijas valstu gadu desmitiem ilgā pieredze liecina, ka šādu kurtuvju ekonomiskie rādītāji ir ļoti augsti (katlu lietderības koeficienta vērtība ir diapazonā 80...85%). Šobrīd kurināmā nomaīņas projektu realizācija varētu būt viens no galvenajiem vides aizsardzības pasākumiem nelielas jaudas katlu mājās Latvijā. Tikai vēlreiz jāuzsver tas, ka lietderības koeficienti, zemāki par 70...75%, sadedzinot koksnī, nav pieļaujami. Koksnes dedzināšanas projektu realizācijas priekšrocības un arī ēnas puses aplūkotas 2. nodaļā.

Sarežģītāka ir sēra oksīdu sasaistīšanas metode. Lai to realizētu, nepieciešams kurtuvē ievadīt kaļķakmeni, dolomītu vai citas vielas, kas satur CaO. Atkarībā no katla jaudas ģipša veidošanās reakcijas tehniskā realizācija ir atšķirīga. Jo lielākas jaudas katli, jo tā ir sarežģītāka un efektīvāka.

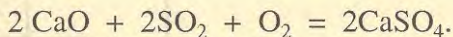
Vismodernākais sēra sasaistīšanas paņēmiens tiek realizēts kurtuvēs, kurās zemas kvalitātes ogles sadedzina verdošā slānī ar virsspiedienu virs 13 bāriem (Carbon AB, Zviedrija). Taču tas realizējams tikai termoelektrostaciju lielo katlu kurtuvēs.

Šobrīd pasaules praksē plaši tiek lietota sēra oksīdu sasaistīšana degšanas procesa laikā kurtuvē. Pilnīgāku sēra oksīda uztveršanu iegūst otrajā attīrīšanas pakāpē - aktivācijas reaktorā. Šādas metodes principiālā shēma parādīta 4.10. attēlā. Tehnoloģiskā sēra oksīdu samazināšanas metode darbojas pēc šādas shēmas:

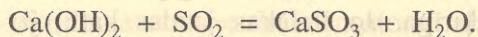
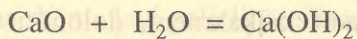
- Sasmalcinātu kaļķakmeni ievada katla kurtuvē, lai termiski sadalītu un iegūtu kalcija oksīdu



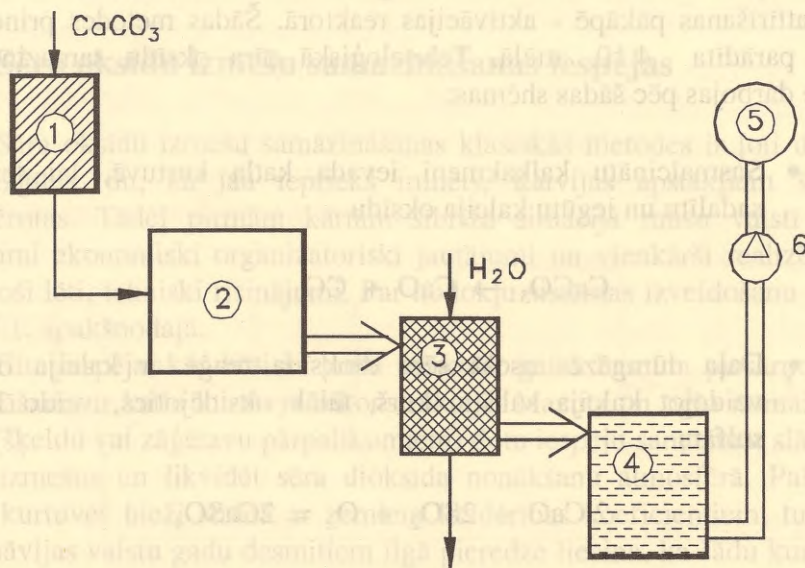
- Daļa dūmgāzēs esošā sēra dioksīda reaģē ar kalcija oksīdu, veidojot kalcija sulfītu, kurš, tālāk oksidējoties, veido kalcija sulfātu



- SO₂ uztveršanas pakāpe kurtuvē nepārsniedz 30...35%. Kaļķakmeni kurtuvē var ievadīt vairākos līmeņos, lai optimizētu kalcinēšanas procesu, katla slodzei mainoties.
- Tā kā daļa kalcija oksīda kurtuvē nereaģē, tad dūmgāzu ceļā uzstādīts aktivācijas reaktors, kurā, lai reakcija noritētu līdz galam, iesmidzina ūdeni:



- Reakcija ir atkarīga no temperatūras: jo tā ir tuvāka mitrā termometra temperatūrai, jo labāka ir SO_2 uztveršana. Reāli aktivācijas reaktorā temperatūra ir par $10...15^\circ\text{C}$ augstāka nekā mitrā termometra temperatūra. Tas nepieciešams, lai dūmgāzes un reakcijas produkti būtu pēc iespējas sausāki.



4.10. att. Tehnoloģiskā sēra oksīdu samazināšanas metode.

1 - kaļķakmens bunkurs; 2 - katls; 3 - aktivācijas reaktors; 4 - elektrofiltrs; 5 - skurstenis; 6 - dūmsūcējs.

Tehnoloģiskajai sēra oksīdu samazināšanas metodei ir vairākas priekšrocības: mazi kapitālieguldījumi un ekspluatācijas izdevumi,

vienkārša ekspluatācija, nav notekūdeņu, sauso pārpalikumu iespējams izmantot tautsaimniecībā, piemēram, ceļu un ielu būvē, aizsargbūvēs, utt.

Mazas jaudas katliem šo shēmu iespējams vienkāršot, piemēram, atsakoties no aktivācijas reaktora.

Līdz šim apskatītās izmešu samazināšanas metodes ir selektīvas. Tās domātas galvenokārt viena gāzveida komponenta samazināšanai dūmgāzēs. Biežāk dūmgāzu attīrīšanas tehnoloģijā tiek izmantotas kompleksās metodes. Dūmgāzu attīrīšana vienlaicīgi no vairākiem gāzveida komponentiem aplūkota nedaudz vēlāk.

4.4.4. Putekļu un pelnu uztveršana

4.4.4.1. Cieto daļiņu uztveršanas mehānismi

Jebkura putekļu uztveršanas aparāta darbības pamatā ir viens vai vairāki mehānismi cieto daļiņu izgulsnēšanai no gāzes plūsmas. Vērā ņemami ir tikai daži - paši būtiskākie. Mehānisma ietekmi vērtē ar uztveršanas efektivitāti, kuru kvalitatīvi nosaka ar līdzības kritēriju palīdzību. No tiem būtiskākie ir cieto daļiņu Reinoldsa Re_d , Stoksa Stk , Frūda Fr , Šmita Sc līdzības skaitļi un citi putekļainu plūsmu raksturojumi.

Putekļu uztveršanas aparātu darbībā jāpievērš uzmanība šādiem putekļu daļiņu izgulsnēšanās mehānismiem [4.31.]:

- gravitācijas;
- centrālās;
- inerces;
- satveršanas (aizķeršanās);
- elektriskā;
- difūzā;
- difūzās forēzes;
- termoforēzes.

Pazīstami ir vēl arī citi mehānismi, piemēram, fotoforēze, magnētiskā lauka ietekme u.c., taču to lietojums putekļu uztveršanas aparātos šobrīd šķiet neperspektīvs. Atbilstoši mehānismam, kura iedarbības rezultātā notiek cieto daļiņu uztveršana, nosaukta attiecīgā izgulsnēšanās.

Gravitācijas izgulsnēšana notiek, smaguma spēkam F_{sm} iedarbojoties uz suspensētajām daļiņām, pie kam novērojama to vertikālā nosēšanās. Savukārt vides pretestība F_v , kuru izjūt daļiņa, traucē tās nosēšanos. Abu šo spēku mijiedarbību nosaka gravitācijas izgulsnēšanās parametrs

$$G_{gr} = \frac{F_{sm}}{F_v} = \frac{d_a^2 \cdot \rho_{dg}}{18 \cdot \mu_g \cdot \omega_g} = \frac{Stk}{Fr}. \quad (4.10.)$$

Ņemot vērā šo vienādojumu, vispārējā gadījumā gravitācijas uztveršanas efektivitāte būs atkarīga no

$$\eta_G = f(Re, Stk/Fr).$$

Vienādojuma konkrēta izteiksme ir atkarīga no putekļu daļiņu formas, izmēriem un kustības režīma, kā arī no aparāta konstrukcijas, kurš darbojas, izmantojot gravitācijas principu. Sakarā ar to, ka gravitācijas izgulsnēšanas parametrs G_{gr} ir apgriezti proporcionāls gāzes dinamiskajai viskozitātei μ_g , kuras vērtība samazinās, temperatūrai krītoties, var droši apgalvot, ka, gāzi dzesējot, paaugstinās gravitācijas uztveršanas efektivitāte.

Centrbēdzes izgulsnēšana notiek centrālās spēku iedarbības rezultātā un novērojama plūsmu rotācijas kustības gadījumos.

Centrbēdzes spēka iedarbības rezultātā daļiņas piespiež izgulsnēšanās virsmai. Centrbēdzes spēka F_c attiecība pret vides pretestību F_v nosaka centrālās izgulsnēšanas parametru

$$G_w = \frac{F_c}{F_v} = \frac{d_d^2 \cdot \rho_d \cdot \omega_w}{18 \cdot \mu_g \cdot r_w}. \quad (4.11.)$$

Centrbēdzes izgulsnēšanas efektivitāte aparātos vispārējā gadījumā ir atkarīga no šādiem kritērijiem:

$$\eta_w = f(\text{Re}, \text{Stk}_w, \text{Fr}).$$

Piemēram, precizēts vienādojums ciklonu aprēķinos [4.30.] ir uzrakstāms šādā formā:

$$\eta_w = 1 - \exp[-2(c \cdot \psi)^{1/(2n+2)}]. \quad (4.12.)$$

Šeit koeficientu nosaka ciklona ģeometriskie parametri, bet lielumu ψ ar izteiksmi

$$\psi = \frac{d_d^2 \cdot \rho_d \cdot \omega_g}{18 \cdot \mu_g \cdot D_c} \cdot (n+1) = \text{Stk}_{w(n+1)}. \quad (4.13.)$$

Lielumu n var atrast ar vienādojumu:

$$n = 1 - \left(1 - 0,0165 \cdot D_c^{0,14}\right) \cdot \left(\frac{T_g}{283}\right)^{0,3}. \quad (4.14.)$$

No tā izriet, ka, gāzes dzesējot, putekļu uztveršanas efektivitāte centrālās aparātos nedaudz pieaug.

Inerces izgulsnēšanās norit gadījumos, kad putekļu daļiņas kustības kinētiskā enerģija ir tik liela, ka, gāzes plūsmā apskalojot šķērsli, daļiņa inerces dēļ turpina kustību tajā pašā virzienā, atsitās pret šķērsli un nosēžas uz tā.

Inerces izgulsnēšanas parametrs ir vienāds ar Stoksa līdzības skaitli Stk un to nosaka inerces spēki F_i , kas darbojas uz daļiņu, un vides aerodinamiskās pretestības spēka F_v attiecību

$$G_i = \text{Stk} = \frac{F_i}{F_v} = \frac{d_d^2 \cdot \rho_d \cdot \omega_g \cdot C_k}{18 \cdot \mu_g \cdot l_i} \quad (4.15.)$$

Šeit Kaningema-Milikena labojums sīkām cietajām daļiņām ($d_d < 20$ mkm) C_k ir atkarīgs no daļiņu izmēra d_d un gāzes molekulu brīvā ceļa vidējā garuma l_i , un to aprēķina izteiksmes dotas grāmātā [4.31.].

Inerces izgulsnēšanas efektivitāti vispārējā gadījumā raksturo divi līdzības skaitļi

$$\eta_{\text{Stk}} = f(\text{Re}, \text{Stk}).$$

Samazinot gāzu plūsmas temperatūru, inerces uztveršanas efektivitāte paaugstinās. Šī tendence pastiprinās, arī samazinoties putekļu daļiņu vidējam izmēram.

Satveršanas jeb aizķeršanās mehānisms ir viens no tiem, kurš ir filtru darbības pamatā. Tas novērojams aparātos, kuros daļiņu kustības trajektorija atrodas virs virsmas, pie kam attālumā, kas ir mazāks vai vienāds ar daļiņas rādiusu. Šķērsienas poraino virsmu veido no šķiedraina vai graudaina materiāla vai citiem filtru elementiem. Ja daļiņu diametrs ir lielāks par filtra porām, tad notiek sijāšana, kas jāuzskata par satveršanas mehānisma atsevišķu gadījumu.

Aizķeršanās izgulsnēšanās procesu raksturo parametrs, kuru nosaka ar daļiņu un šķiedru izmēru attiecību $d_d/d_{\text{šķ}}$.

Daļiņu satveršanas izgulsnēšanas efektivitāti cilindra apskalošanas gadījumā nosaka ar vienādojumu

$$\eta_R = \left(\frac{d_d}{d_c} \right)^2 \cdot \text{Re}^{0,063} \quad (4.16.)$$

Šeit Reinoldsa līdzības skaitli apskalojamam ķermenim aprēķina ar izteiksmi

$$\text{Re} = \frac{d_c \cdot \rho_d \cdot \omega_g}{\mu_g} \quad (4.17.)$$

Samazinot plūsmas temperatūru, pieaug aizķeršanās izgulsnēšanas efektivitāte.

Elektrofiltru gāzu attīrīšana no plūsmā suspendētām daļiņām notiek *elektriskās* izgulsnēšanas rezultātā. Daļiņas koronējošais elektrods laukā iegūst elektrisko lādiņu. Elektriskā lauka iedarbības rezultātā uzlādētās daļiņas izgulsnējas no attīrāmās gāzes plūsmas un nosēžas uz nosēdelektrodu virsmas. Lai iegūtu koronējošo lādiņu, nepieciešams radīt elektriskā lauka kritisko intensitāti. To rūpnieciskos elektrofiltrus sasniedz spriegumu diapazonā 20...40 kV.

Izgulsnēšanas procesu efektivitāti elektrofiltru nosaka ar komplikētiem aprēķiniem, kuros ietverts liels skaits parametru. Tādēļ izveidotas aprēķina nomogrammas [4.32.], kuras šeit nav aplūkotas.

Difūzās izgulsnēšanas gadījumā uz sīkajām daļiņām iedarbojas molekulu Brauna (siltuma) kustība. Molekulu iedarbības rezultātā daļiņas pārvietojas to koncentrācijas samazināšanās virzienā un, saskaroties ar apskalojamiem ķermeņiem vai aparāta sienām, nosēžas uz virsmām.

Difūzijas ātrumu nosaka difūzijas koeficienta vērtība, kura pieaug, palielinoties gāzu temperatūrai, molekulu brīvā ceļa vidējam garumam un samazinoties daļiņu izmēriem. Taču difūzijas ātrums pat sevišķi sīkām daļiņām ir visumā neliels, salīdzinot ar gāzu molekulu difūzijas ātrumu, jo daļiņu difūzijas koeficients ir par vairākām kārtām mazāks lielums. Difūzijas izgulsnēšanas aprēķinos drīkst izmantot molekulārās difūzijas procesu izteiksmes.

Difūzās izgulsnēšanas parametrs G_D ir apgriezti proporcionāls Peklē līdzības skaitlim.

$$G_D = \frac{1}{\text{Pe}} = \frac{D_d}{1 \cdot \omega_g} \quad (4.18.)$$

Difūzijas koeficients D_d ir atkarīgs no daļiņu izmēriem, gāzu fizikālajām īpašībām un parametriem.

Difūzijas izgulsnēšanas efektivitāti cilindra apskalošanas gadījumā nosaka ar vienādojumu

$$\eta_D = 3,19 \cdot Pe^{-0,5}. \quad (4.19.)$$

Samazinoties plūsmas temperatūrai, difūzijas izgulsnēšanas efektivitāte atšķirībā no agrāk apskatītajiem mehānismiem samazinās.

Difūzā forēze ir daļiņu kustība, kuru izraisa gāzes maisījuma komponentu koncentrācijas gradients. Ja gāze ir mitra, dzinējspēks ir tvaiku koncentrācijas gradients. Difūzās forēzes parādība novērojama iztvaikošanas un kondensācijas procesos, tātad aparātos, kuros realizē šos procesus, piemēram, aktīva pildījuma kontaktaparātos.

Uz aukstajām, rasiņtajām pildījuma cauruļu sienām šajos kontaktaparātos notiek kondensācijas process. Tā rezultātā cauruļu virsma pārklājas ar šķidruma plēvīti. Piesātināto tvaiku parciālais spiediens uz šķidruma plēvītes virsmas ir mazāks nekā tvaiku parciālais spiediens gāzes maisījuma plūsmas kodolā, un tvaiks no plūsmas kodola difundē uz plēvītes virsmu. Šis process norit saskaņā ar Fika likumu. Pārvietojoties tvaiks pārnes arī cietās daļiņas, kas gāzes plūsmā atrodas suspendētā stāvoklī. Uz plēvītes virsmas notiek tvaika kondensācija, bet gāze uzkrājas pie virsmas. Plēvītes virsma laiž cauri tvaiku, turpretī nelaiž gāzi. Stacionāra režīma gadījumā koncentrāciju sadalījums laikā mainās, tādēļ gāzes pārvietošanās no plēvītes uz plūsmas kodolu jākompensē ar tvaika cieto daļiņu un gāzu maisījuma konvektīvo plūsmu, kas virzīta uz šķidruma plēvīti. Šo plūsmu sauc par Stefana plūsmu. Tādā veidā kondensācijas gadījumā Stefana plūsmas klātbūtne sekmē, bet iztvaikošanas gadījumā - traucē daļiņu izgulsnēšanos uz plēvītes.

Iepriekš teiktais attiecas tikai uz kondensācijas procesa norisi uz virsmas, nepievēršoties kondensācijai tilpumā. Pēdējā iespējama, gāzes dzesējot līdz temperatūrai, kas zemāka par gāzes plūsmā palikušo tvaiku piesātinājuma temperatūru. Tvaiku kondensācija tilpumā notiek uz

smidzināšanas šķidrums un kondensāta pilienu, kā arī gāzu plūsmā esošo cieta daļiņu virsmām. Iespējama arī miglas veidošanās.

Kondensācijas ietekme uz putekļu uztveršanu aparātos izpaužas divējādi:

- tvaika plūsma, kas difundē uz kondensācijas centriem vai dzesēšanas virsmām, pārvieto putekļu daļiņas [4.30.];
- daļiņas kļūst rupjākas un mītrākas, ja to virsmas rasina kondensācijas produkts [4.33., 4.34.] un uz tām var kondensēties tvaiks.

Parasti iedarbīgāks ir pirmais mehānisms. Taču speciālos gadījumos, piemēram, tehniskā oglekļa (kvēpu) uztveršanā, būtiska kļūst arī otrā mehānisma ietekme. Tehniskā oglekļa uztveršanas specifika aplūkota 4.4.4.3. apakšnodaļā.

Difūzās forēzes izgulsnēšanas parametru, ņemot vērā Stefana plūsmu, aprēķina ar vienādojumu

$$G_{Df} = \frac{\sqrt{\mu_{tv}}}{\frac{p_{tv}}{p} \cdot \sqrt{\mu_{tv}} + \frac{p - p_{tv}}{p}} \cdot \frac{D_{tv}}{(p - p_{tv}) \cdot \omega_g} \cdot \Delta p_{tv} \quad (4.20.)$$

Difūzās forēzes daļiņu izgulsnēšanas efektivitāti, tvaikam kondensējoties uz pilieniem, nosaka ar izteiksmi

$$\eta_{Df} = \frac{144 \cdot \pi \cdot \mu_g \cdot D_{tv} \cdot (y_{tv} - y_{tvr})}{g \cdot \rho_d \cdot y_g^3 \cdot d_{pil} \cdot (d_{pil}^2 - d_d^2)} \quad (4.21.)$$

Cieto daļiņu uztveršana uz pilieniem vērojama tukšos gāzes skalotņos, kā arī aktīva pildījuma kontaktsiltumapmaiņas aparātos smidzināšanas sprauslu izvietouma zonā.

Pētot pelnu uztveršanas efektivitāti, aktuāla ir arī izgulsnēšana uz šķidruma plēvītes (pildījumi kontaktaparātos) un gāzes pūslīša (putu aparāti).

Termoforēze ir parādība, kad sīkas daļiņas, kas gāzes plūsmā atrodas suspendētā stāvoklī, pārvietojas termodifūzijas procesa rezultātā (Sores efekts). Termodifūzijas būtību var izskaidrot ar temperatūras gradienta izraisīto slāņošanos pa koncentrācijām gāzes maisījumā. Smagākās un rupjākās molekulas pārvietojas temperatūras gradienta virzienā, tas savukārt izraisa koncentrācijas gradienta veidošanos. Pēdējam procesam pretojas koncentrāciju difūzijas process, kas virzīts uz gāzu sastāva izlīdzināšanos. Tātad termodifūzija un koncentrāciju difūzija ir pretēji vērstas.

Termodifūzijas izgulsnēšana ir atkarīga no temperatūras gradienta. Šo procesu var novērot, putekļainām gāzēm plūstot caur šauriem dzesētiem kanāliem vai arī dzesējot šādas karstas gāzes ar ūdeni. Jāpiebilst, ka arī šajos gadījumos termoforēzes izgulsnēšanas procesa ietekme ir niecīga. Piemēram, aparātos ar caurplūdes režģiem, dzesējot gāzes, kuru temperatūra ir 250°C, ar 20°C siltu ūdeni, termoforēzes izgulsnēšanas efektivitāte nepārsniedz 4%.

Termoforēzes uztveršanas parametru nosaka ar vienādojumu

$$G_T = \frac{\mu_g}{3 \cdot \rho_g \cdot T_g \cdot \omega_g} \cdot \Delta T. \quad (4.22.)$$

Termoforēzes daļiņu izgulsnēšanas efektivitāti aparātos ar caurplūdes režģiem uz pūslīšu virsmas putu slānī nosaka ar izteiksmi

$$\eta_T = 1 - \exp\left(-\frac{3\sqrt{2} \cdot \lambda_g \cdot \mu_g \cdot c_g}{(2 \cdot \lambda_g + \lambda_d) \cdot \alpha_T \cdot d_p} \cdot \frac{T_g - T_{s\check{k}}}{T_g + T_{s\check{k}}}\right). \quad (4.23.)$$

Šeit koeficients α_T raksturo siltumatdevi no gāzes uz puslīša virsmu. Mitrās pūslīšu uztveršanas procesos viens no vissvarīgākajiem jautājumiem ir daļiņu koagulācija. Rupjāku un smagāku daļiņu veidojumu

rašanās būtiski uzlabo mitro attīrīšanas iekārtu darbības efektivitātes rādītāju. Putekļainās gāzes plūsmām daļiņu koagulācija norit Brauna (siltuma) kustības dēļ vai arī iedarbojoties hidrodinamiskajiem, elektriskajiem, gravitācijas un citiem spēkiem. Koagulācijas procesu būtiski ietekmē mitruma kondensācija uz daļiņu virsmām [4.35.], pie kam tas vienādi attiecas gan uz hidrofobām, gan hidrofilām daļiņām.

Daļiņu koagulācijas ātrumu iespējams izteikt ar vienādojumu

$$\frac{1}{n} - \frac{1}{n_0} = k \cdot \tau, \quad (4.24.)$$

kur n_0 , n - daļiņu koncentrācija attiecīgi sākuma un tālākajos laika momentos, $1/m^3$;

k - koagulācijas konstante, m^3/s ;

τ - laiks no procesa sākuma, s .

Sākuma momentā, kad daļiņu koncentrācija ir liela, koagulācija norit ar lielu ātrumu, kas pēc tam kritas. Koagulācijas konstantes vērtības nosaka katram koagulācijas veidam atsevišķi ar vienādojumu vai nomogrammu palīdzību [4.31.]. Koagulācijas ātrumu ietekmē arī rupju daļiņu klātbūtne gāzēs. Plūsmas polidispersija sekmē koagulāciju: rupjās daļiņas intensīvi absorbē sīkās un koagulācijas ātrums palielinās (līdz 10%).

Kā redzams, cieto daļiņu izgulsnēšanās norit daudzveidīgi, dažādu mehānismu darbības rezultātā. Katrā konkrētā aparātā darbojošos mehānismu skaits būs mazāks. To nosaka aparāta darbības princips un konstrukcija. Taču arī šajā gadījumā jānoskaidro, kā noteikt kopējo uztveršanas efektivitāti. Šeit lietderīga var būt šāda pieeja: katrs nākamais mehānisms uztver to, ko nav uztvēris iepriekšējais. Tad kopējo uztveršanas efektivitāti var noteikt kā

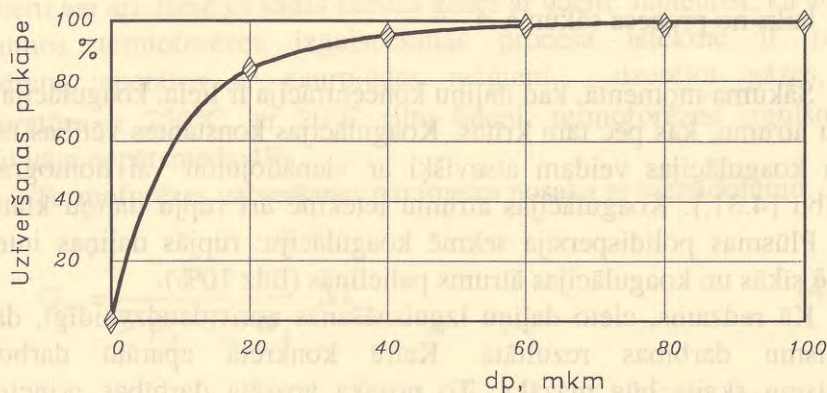
$$\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2), \quad (4.25.)$$

kur η_1 , η_2 - uztveršanas efektivitātes, kuras nodrošina atsevišķu mehānismu darbības rezultātus.

Lai gan ir iespējams aprēķināt atsevišķu vienkāršu cieto daļiņu uztveršanas gadījumus, tomēr pamatinformāciju par uztveršanas aparāta darbības efektivitāti nodrošina to eksperimentālā izpēte.

4.4.4.2. Pelnu uztveršanas efektivitāte ciklonos

Viens no visplašāk lietojamiem paņēmieniem gaisa baseina piesārņojuma ar cietajām daļiņām samazināšanā nelielas jaudas katlu mājās ir ciklonu uzstādīšana dūmejās. Tie tiek plaši lietoti un tādēļ to darbība ir vispusīgi izpētīta. Noskaidrots, ka ciklona darbības efektivitāte ir atkarīga no pelnu daļiņu lieluma [4.38.]. Šī sakarība ir parādīta 4.11. attēlā.



4.11. att. Ciklona uztveršanas pakāpes atkarība no cieto daļiņu izmēriem.

Ciklonu uztveršanas pakāpe ir atkarīga no ātruma tajos. Lai centrālās spēku radītais efekts būtu maksimāls, ātrumiem aparātā jābūt

$$\omega = 2,2 \dots 5,0 \text{ m / s.}$$

Šis lielums ir atkarīgs no cieto daļiņu izmēriem. Jo smalkākas daļiņas, jo vēlamais ātrums ir lielāks. Ir zināms, ka cikloni slikti uztver daļiņas, kuras ir mazākas par 10 mkm. Tādu daļiņu daudzums kurināmā pelnos parasti ir

liels (līdz 25 %). Tādēļ, uzstādot ciklonus aiz nekustīgo ārdū oģļu kurtuvēm, nevajadzētu cerēt, ka uztveršanas pakāpe varētu būt daudz lielāka par 75 %. Vēl mazāka tā būs, izmantojot ciklonus mazuta pelnu uztveršanai.

Lieli gāzu ātrumi ciklonā veicina tā elementu, to starpā arī korpusa, eroziju. Pēdējā ir viens no būtiskākajiem faktoriem, kas tāpat kā korozija samazina ciklona kalpošanas laiku. Ir eksperimentāli iegūti dati, kuri liecina par to, ka centrālās ciklonā ar gāzu ātrumu 5 ... 6 m/s mēneša laikā erozijas dēļ uztveršanas pakāpe samazinājusies par 6 ... 7 %.

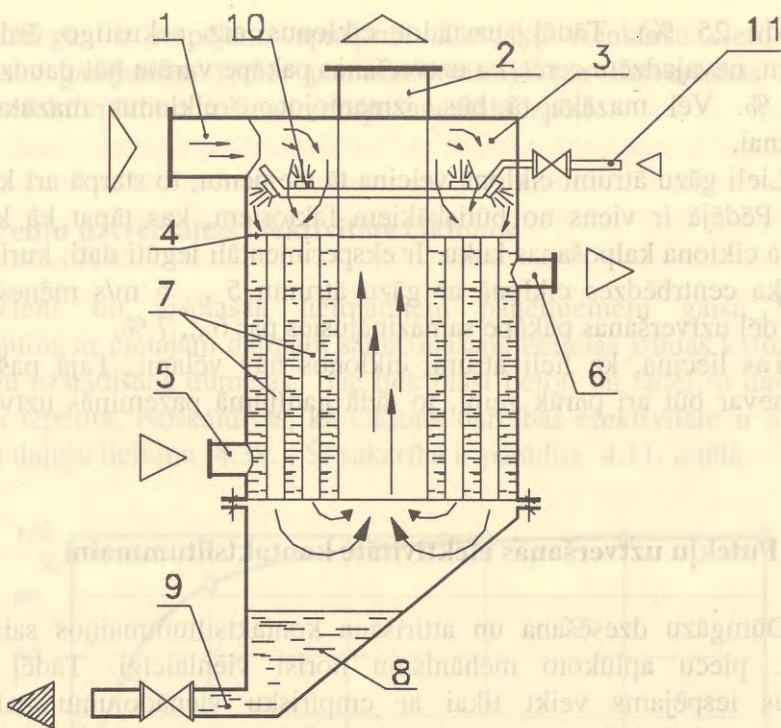
Tas liecina, ka lieli ātrumi ciklonos nav vēlami. Tajā pašā laikā ātrumi nevar būt arī pārāk zemi, jo tādā gadījumā pazeminās uztveršanas pakāpe.

4.4.4.3. Putekļu uztveršanas efektivitāte kontaktsiltummaiņā

Dūmgāzu dzesēšana un attīrīšana kontaktsiltummaiņos saistīta ar četrus ... piecus aplūkoto mehānismu norisi vienlaicīgi. Tādēļ šobrīd aprēķinus iespējams veikt tikai ar empīrisku vienādojumu palīdzību. Autores un radošā kolektīva ilggadējs darbs šajā jomā ļāvis dziļāk ielūkoties cieto daļiņu izgulsnēšanas procesa būtībā mitrajos pelnu uztvērējos. Kontaktparātos veiktie pētījumi un iegūtie rezultāti izklāstīti šajā nodaļā, bet sīkāka informācija par datiem, kas izmantojami putu aparātu aprēķinos, atrodama grāmatā [4.36.].

Smalku cieto daļiņu izgulsnēšanai no tehnoloģiskās gāzes plūsmas, piemēram, kvēpu daļiņu uztveršanai tehniskā oģleģļa ražotnēs, nepieciešams uzstādīt divpakāpju attīrīšanas shēmas, jo šīs plūsmas raksturīgas ar augstu putekļu koncentrāciju. Pirmajā pakāpē parasti izmanto sausos inerces vai centrālās tipa putekļu uztvērējus ar uztveršanas efektivitāti līdz 80%, bet otrajā - viens variants ir mitrie gāzu attīrīšanas aparāti.

Volgogradas tehniskā oģleģļa rūpnīcā tika uzstādīta eksperimentāla iekārta, lai izpētītu mitrā putekļu uztvērēja - aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņa (skat. 4.12. attēlu) darbības efektivitāti [4.37.].



4.12. att. Eksperimentālās iekārtas principiālā shēma:

1,2 - (attiecīgi) gāzes maisījuma ievads un izvads; 3 - sajaukšanās kamera; 4 - cauruļu režģis; 5,6 - (attiecīgi) ūdens ieplūde un izplūde pildījumā; 7 - cauruļu kūlis; 8 - tvertnes dibens; 9 - kondensāta un smidzināšanas šķidruma izvads; 10 - smidzināšanas sprauslas; 11 - smidzināšanas šķidruma pievads.

Aktīva pildījuma kontaktsiltummainī putekļainas gāzes ievada augšējā daļā tangenciāli un to plūsmā izsmidzina ūdeni, kas, saņemot gāzu siltumu, daļēji iztvaiko. Tvaika, ūdens, cieto daļiņu un gāzes maisījumu, kurš ievadīts aktīvā pildījuma vertikālajās caurulēs, dzesē ar ūdeni, kas plūst starpcauruļu telpā. Siltumnesēju plūsmas virzieni aparātā veido pretplūsmu.

Putekļu uztveršanas mehānismu caurulēs šajā gadījumā galvenokārt nosaka gravitācijas, inerces un difūzās forēzes efekti. Uz šķidruma - kondensāta plēvītes un pilieniem uztvertās cietās daļiņas nonāk aparāta apakšējā daļā, no kurienes piesārņoto šķidrumu aizvada uz nosēdbaseinu. Gāzu plūsma savukārt tiek pagriezta par 180° un aizvadīta no aparāta pa centrālo cauruli.

Nosakot putekļu uztveršanas efektivitāti atkarībā no procesa parametriem, eksperimenta režīmu skaita un raksturīgo parametru vērtību izvēle veikta, pamatojoties uz eksperimenta plānošanu [4.37.]. Šādu režīmu skaits ir 8. Lai būtu iespējams salīdzināt iegūtā lineārā regresijas vienādojuma rezultātu sakritību ar brīvi izvēlētiem eksperimenta parametriem, režīmu skaits tika palielināts.

Putekļu uztveršanu ietekmē šādi faktori: kvēpu un gāzes maisījuma caurplūde V_g , ūdens caurplūde gan pildījumā $G_{\bar{u}}$, gan izsmidzināšanai $G_{\bar{sk}}$. Tātad tika organizēts trīsfaktoru eksperiments, kura plāns un faktoru vērtības dotas 4.5. tabulā.

4.5. tabula

Faktoru patiesās vērtības.

Izmēģinājuma N ^o	Gāzu caurplūde $V_g, m^3/h$	Ūdens caurplūde pildījumā $G_{\bar{u}}, m^3/h$	Ūdens caurplūde smidzināšanai $G_{\bar{sk}}, m^3/h$
1	511	550	42
2	511	900	42
3	511	550	720
4	511	900	720
5	415	550	42
6	415	900	42
7	415	550	720
8	415	900	720
9	460	720	380
10	460	720	380
11	460	720	380

Apstrādājot izmēģinājumu rezultātus, kuri iegūti pēc šī eksperimenta plāna, tika atrasti parametri, no kuriem ir atkarīgs eksperimenta rezultāts - putekļu uztveršanas pakāpe η_{uztv} . Šeit raksturīgie lielumi ir gāzu ātrums ω_g , ūdens ātrums pildījumā $\omega_{\bar{u}}$ un smidzināšanas blīvums H_{ω} .

Gāzu ātrumu pildījumā nosaka ar vienādojumu

$$\omega_g = \frac{V_g}{3600 \cdot f_g}, \text{ m/s}. \quad (4.26.)$$

Ūdens ātrumu pildījumā aprēķina ar formulu

$$\omega_{\bar{u}} = \frac{G_{\bar{u}}}{3600 \cdot f_{\bar{u}}}, \text{ m/s}. \quad (4.27.)$$

Smidzināšanas blīvumu atrod ar izteiksmi

$$H_{\omega} = \frac{G_{sk} \cdot \rho_{\bar{u}}}{3600 \cdot f_1}, \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}. \quad (4.28.)$$

Eksperimenta plāns atspoguļots 4.6. tabulā.

4.6. tabula

Eksperimenta plāns.

Izmēģinājuma N ^o	Faktori			Eksperimenta rezultāts, %
	ω_g , m/s	$\omega_{\bar{u}} \cdot 10^3$, m/s	H_{ω} , kg/m ² ·s	
1	8,35	2,9	0,15	67
2	8,35	4,75	0,15	39
3	8,35	2,9	2,61	35
4	8,35	4,75	2,61	86

5	6,8	2,9	0,15	88
6	6,8	4,75	0,15	91
7	6,8	2,9	2,61	68
8	6,8	4,75	2,61	95
9	7,6	3,83	1,38	71
10	7,6	3,83	1,38	67
11	7,6	3,83	1,38	75

Veicot eksperimenta rezultātu matemātisko apstrādi, iegūts regresijas vienādojums cieto daļiņu uztveršanas pakāpes noteikšanai, kas atkarīgs no ūdens un gāzu ātrumiem pildījumā un ūdens smidzināšanas blīvuma. Rezultātā iegūts šāds regresijas vienādojums:

$$\eta_{\text{uztv}} = -37,8 + 19,3\omega_g + 6,7 \cdot 10^3\omega_{\text{ū}} + 167,2H_{\omega} - 10,1 \cdot 10^3\omega_g \cdot \omega_{\text{ū}} - 28\omega_g \cdot H_{\omega} - 43,7 \cdot 10^3 \omega_{\text{ū}} \cdot H_{\omega} + 7,3 \cdot 10^3\omega_g \cdot \omega_{\text{ū}} \cdot H_{\omega}, \% \quad (4.29.)$$

Šīs formulas lietojumu ierobežo parametru vērtības, kuru maiņu diapazonā iegūts vienādojums, un tās ir šādas:

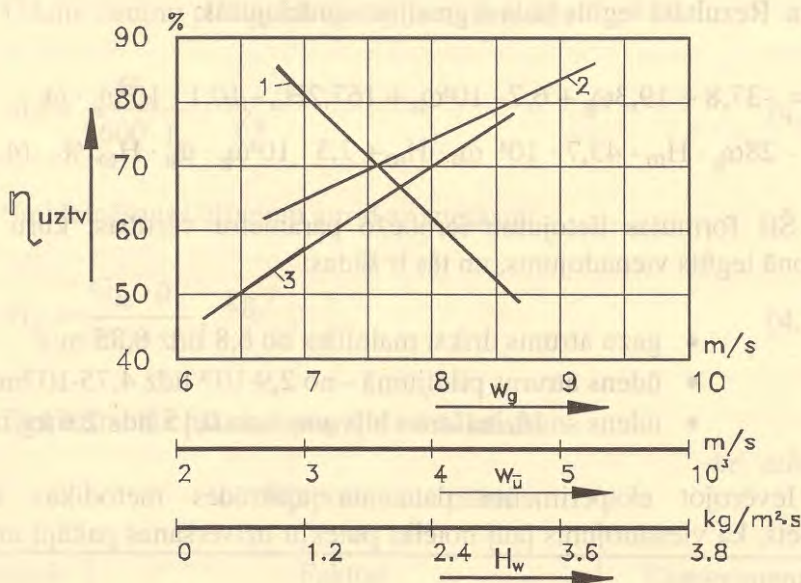
- gāzu ātrums drīkst mainīties no 6,8 līdz 8,35 m/s,
- ūdens ātrums pildījumā - no $2,9 \cdot 10^{-3}$ līdz $4,75 \cdot 10^{-3}$ m/s,
- ūdens smidzināšanas blīvums - no 0,15 līdz 2,6 kg/m²·s.

Ievērojot eksperimentu datu un apstrādes metodikas kļūdas, konstatēts, ka vienādojums ļauj noteikt putekļu uztveršanas pakāpi ar kļūdu $\pm 20\%$.

Eksperimentu rezultāti attēloti 4.13. attēlā.

Kā redzams no 4.13. attēla, uztveršanas pakāpe pieaug, samazinot gāzu caurplūdi un palielinot ūdens caurplūdi pildījumā, kā arī smidzināšanas blīvumu. Savukārt regresijas vienādojums liecina, ka bez minētajiem faktoriem uztveršanas pakāpi ietekmē arī parametru divkārsās un trīskārsās mijiedarbības efekti, arī tādi, kuros viens parametrs ir ūdens ātrums

pildījuma caurulēs. Apstākļi, ka uztveršanas pakāpi ietekmē ūdens ātrums caurulēs, liecina par aparāta siltuma režīmu būtisku ietekmi uz cieto daļiņu uztveršanas procesiem. Dzesējot mitro kvēpu un gāzu maisījumu, ūdens tvaiki tajā sasniedz piesātinājuma stāvokli. Tālāk novadot siltumu, sākas tvaiku kondensācija kā uz pildījuma virsmas, tā arī uz cieto daļiņu virsmas un to porās. Šādā veidā neslapināmas daļiņas var kļūt par slapināmām. Tas daļēji vērojams tehniskā oglekļa uztveršanas gadījumā. Mitrās daļiņas saskares rezultātā koagulējas un veido lielāka izmēra smagākus un labāk uztveramus irdenus savienojumus. Sakarā ar to, ka šādi savienojumi kļūst slapināmi un līdz ar to ciešāk saistīti šķīdumā, tiek novērsta otrreizēja putekļu nokļūšana gāzu plūsmā.



4.13. att. Faktoru ietekme uz putekļu uztveršanas efektivitāti:

- 1 - gāzes ātruma ietekme; 2 - ūdens ātruma ietekme; 3 - smidzināšanas blīvuma ietekme.

Iepriekš teiktais norāda uz to, ka, veicot aparātu siltuma režīmu optimizāciju, bez pilnīgākas gāzu siltuma utilizācijas iespējams arī paaugstināt putekļu uztveršanas efektivitāti.

4.4.4.4. Aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu konstrukcijas

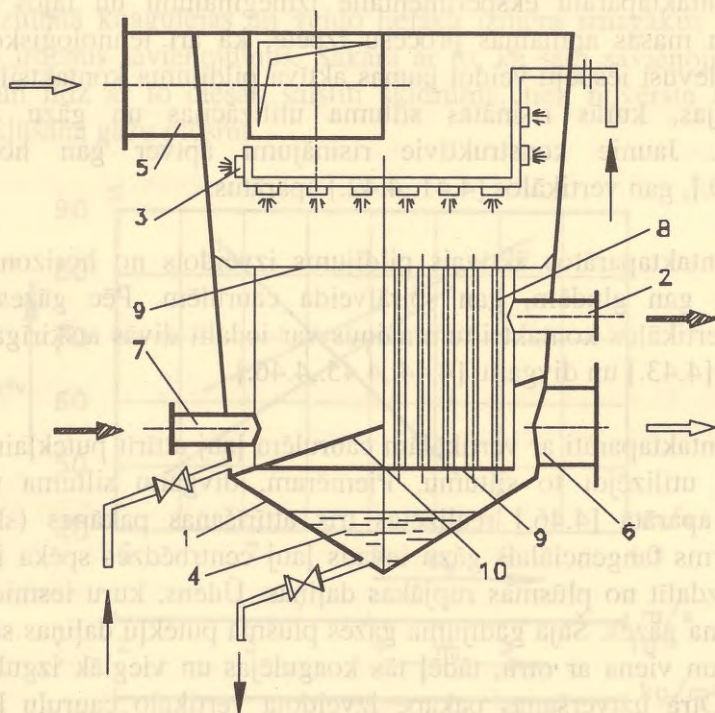
Kontaktpaparātu eksperimentālie izmēģinājumi un tajos notiekošo siltuma un masas apmaiņas procesu izpēte, kā arī tehnoloģisko procesu specifika devusi iespēju veidot jaunas aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņu konstrukcijas, kurās risinātas siltuma utilizācijas un gāzu attīrīšanas problēmas. Jaunie konstruktīvie risinājumi aptver gan horizontālos [4.39.,4.40.], gan vertikālos [4.41.,4.42.] aparātus.

Kontaktpaparātos aktīvais pildījums izveidots no horizontālām vai vertikālām gan gludām, gan spirālveida caurulēm. Pēc gāzes plūsmas virziena vertikālos kontaktsiltummaiņus var iedalīt divās atšķirīgās grupās: viengaitas [4.43.] un divgaitu [4.44.,4.45.,4.46.].

Kontaktpaparāti ar vertikālām caurulēm ļauj attīrīt putekļainas gāzes, vienlaicīgi utilizējot to siltumu. Piemēram, divgaitu siltuma un masas apmaiņas aparātā [4.46.] realizētas trīs attīrīšanas pakāpes (skat. 4.14. att.). Vispirms tangenciālais gāzu ievads ļauj centrālās spēka iedarbības rezultātā izdalīt no plūsmas rupjākas daļiņas. Ūdens, kuru iesmidzina šajā daļā, mitrina gāzes. Šajā gadījumā gāzes plūsmā putekļu daļiņas saskaras ar pilieniem un viena ar otru, tādēļ tās koagulējas un vieglāk izgulsnējas no plūsmas. Otrā uztveršanas pakāpe izveidota vertikālo cauruļu kūlī, kurā gāzes plūst no augšas uz apakšu. Šeit notiek cieto daļiņu uztveršana ar plēvīti, kura veidojas cauruļu iekšpusē, un ar pilieniem gāzes tilpumā. Caurules no ārpusēs dzesē siltumnesējs un putekļu uztveršanu intensificē kondensācijas process, kura ietekme apskatīta šīs apakšodaļas sākumā.

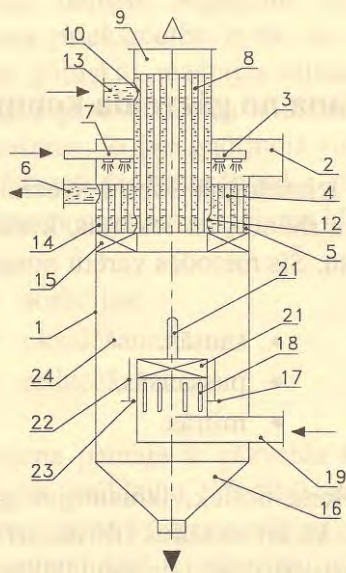
Trešā uztveršanas pakāpe realizēta aparāta centrālajā daļā. Gāzes izplūde no aktīvā pildījuma caurulēm tiek pagriezta par 180°, un

gravitācijas un inerces spēku ietekmē notiek pilienu un putekļu daļiņu izkrišana no gāzes plūsmas. Centrālajā gāzu izvadcaurulē izvietotajās aktīvā pildījuma caurulēs visintensīvāk norit kondensācija un ar to saistītie daļiņu uztveršanas procesi, jo starpcauruļu telpā ir visaukstākais ūdens un gāzu temperatūra arī ir viszemākā.



4.14. att. Divpakāpju centrālās aktīvā pildījuma kontaktsiltummainis:

1 - korpuss; 2 - aktīvais pildījums; 3 - smidzināšanas sprauslas; 4 - smidzināšanas ūdens tvertne; 5,6 - (attiecīgi) gāzu ieplūde un izplūde; 7,8 - (attiecīgi) ūdens ieplūde un izplūde; 9 - cauruļu režģi; 10 - sadalošā sieniņa.



4.15. att. Putekļu virpuļzuvērvērs:

1 - korpuss; 2,9 - (attiecīgi) gāzes ieplūde un izplūde; 3,7 - smidzināšanas sprauslas; 4 - aktīvais pildījums; 5, 8, 11 - ūdens tilpums; 6 - smidzināšanas šķidruma ieplūde; 12 - caurumi centrālajā caurulē; 13,14 - (attiecīgi) ūdens ieplūde un izplūde; 15 - lāpstiņas; 16 - putekļu bunkurs; 17 - gāzes ievads; 18 - spraugas; 21 - plūsmas virziena veidotāji; 22 - atsitienvairogs; 23 - atsitienvairoga atbalsta plāksne; 24 - separācijas kamera.

Putekļu virpuļzuvērvērvē [4.41.], kura principiālā shēma dota 4.15. attēlā, izmantots ne tikai kondensācijas, bet arī iztvaikošanas efekts. Separācijas zonā, kas izveidota aparāta vidējā daļā, sastopas daļēji attīrīta, atdzesēta, iegriezta lejupvērstā gāzes plūsma ar karstu, augšupvirzītu (arī iegrieztu) putekļainu gāzu plūsmu. Šajā daļā notiek gāzu dzesēšana un papildu attīrīšana no sīkajām putekļu daļiņām. Ar putekļu virpuļzuvērvērvē dažreiz iespējams aizstāt tehnoloģiskas iekārtas, piemēram, granulatoru, tehniskā ogļekļa ražotnē.

4.4.5. Dūmgāzu tīrīšana no gāzveida komponentiem

Gāzes attīrīšanas tehnoloģijā šobrīd speciālisti visā pasaulē strādā, lai izveidotu mazatlikuma shēmas un iekārtas, kurās iegūst tautsaimniecībā izmantojamu galaproduktu. Šīs metodes varētu nosacīti iedalīt trijās grupās:

- sausās,
- pussausās,
- mitrās.

Sausā gāzu attīrīšana notiek, izmantojot gravitācijas, centrālās, inerces un citus aparātus, kā arī dažādus filtrus, arī elektrofiltrus. Šo metožu galvenā priekšrocība ir uztverto cieto daļiņu tālākās lietošanas perspektīvas. Piemēram, tehniskā oglekļa ražošanas tehnoloģijā aiz krāsnīm un iekārtām no gāzes plūsmām ciklonos uztvertās sīkās kvēpu daļiņas iespējams atkārtoti izmantot tehnoloģijā. Taču sauso gāzu attīrīšanas metodi praktiski nav iespējams lietot kaitīgo gāzveida komponentu atdalīšanai no gāzes plūsmas un tādēļ tai ir ierobežotas izmantošanas iespējas.

Mitrā dūmgāzu attīrīšanas shēma ietver aparātu grupu, kuros norit cieto un gāzveida komponentu uztveršana, šķidrums kontaktējoties ar gāzes plūsmu. Šeit atsevišķu gāzu absorbcija notiek vienlaicīgi ar fāzu pārejas procesiem (iztvaikošanu vai kondensāciju). Attīrīšanas pakāpe no dažādiem kaitīgiem piemaisījumiem šādās shēmās ir ļoti augsta (98...99%). Tomēr to plašu lietojumu kavē iegūtā piesārņotā šķidrā atlikuma izmantošanas problēmas. Atkarībā no šī šķidruma sastāva speciālisti piedāvā dažādus risinājumus. Dažas shēmas aplūkotas tālākajā izklāstā.

Pussausās metodes būtība ir siltuma un masas apmaiņas procesa organizācijā: gāzes plūsmā izsmidzina absorbcijas šķidrumu tādā daudzumā, lai ķīmiskās reakcijas noritētu līdz galam, veidotos gāzes komponentu un absorbenta reakcijas produkts šķidrums nešķīstošas cietas frakcijas veidā un liekais ūdens pilnībā iztvaikotu. Sausajos putekļu uztvērējos no gāzes

plūsmas atdalītās cietās daļiņas iespējams izmantot tautsaimniecībā. Pussauso metožu glavenā priekšrocība ir tā, ka nav jārisina notekūdeņu attīrīšanas problēmas un ķīmiskās reakcijas atlikums ir sausa, cieta viela, bez tam nav nepieciešama gāzu atkārtota sildīšana un speciāli nerūsējošie materiāli iekārtas izveidošanai, jo šajā gadījumā vide nav korozijas agresīva.

Savukārt ķīmiskās metodes tehnoloģisko gāzu un degšanas produktu attīrīšanai no gāzveida komponentiem iespējams klasificēt trīs grupās:

- sorbcijas;
- oksidēšanas;
- reducēšanas.

Sorbcijas paņēmiena pamatā ir gāzveida komponentu saistišana ar cietas vielas vai šķidrumsa palīdzību. Pirmajā gadījumā tā ir adsorbcija, izmantojot tādus adsorbentus kā kūdra, ceolīti u.c., bet otrajā - absorbcija, lietojot dažādus absorbentus: ūdeni, kondensātu, sārnu ūdens šķīdumus utt. Sorbcijas procesus īsteno adsorberos, absorbcijas torņos un gāzes skalotņos.

Oksidēšanas metodes pamatā ir gāzveida komponenta, piemēram, sēra dioksīda vai slāpekļa monoksīda, oksidācijas reakcija ar skābekli. Tās realizācijai nepieciešams kontakta aparāts.

Reducēšanas paņēmieni radīti, lai realizētu gāzveida komponentu - dažādu oksīdu - reducēšanās reakcijas. Piemēram, slāpekļa oksīda reducēšanās reakcijas rezultātā kā gala produktu iegūstot slāpekli un skābekli, kuri nav kaitīgi apkārtējai videi. Šāda uzdevuma veikšanai izmanto katalizatorus.

Pasaulē visplašākie pētījumi kaitīgo gāzveida komponentu jomā veltīti sēra un slāpekļa oksīdu absorbcijas metodēm.

Tas izskaidrojams ar to, ka tehnikas progress šobrīd nav iedomājams bez organiskā kurināmā sadedzināšanas, tātad bez pelnu, sēra, slāpekļa un oglekļa oksīdu veidošanās un to izvadīšanas apkārtējā vidē.

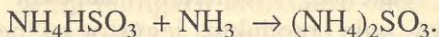
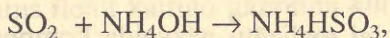
Mitrās dūmgāzu attīrīšanas metodes pēc lietotā absorbenta varētu iedalīt šādi: kaļķu, sodas, amonjaka, nātrija, kālija, magnēzīta, ozona, aromātisko amīnu utt. metodēs.

Vienā no visbiežāk sastopamajām metodēm izmanto gāzveida amonjaka vai amonjaka ūdens šķīdumu. Piemēram, Vācijas firma "Walter Cie" izstrādājusi amonjaka metodes variantu, kas shematiski parādīts 4.16. attēlā.

Attīrīšanas procesā ir šādas stadijas:

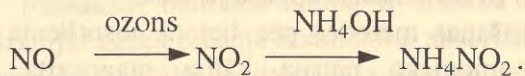
- dūmgāzu attīrīšana no cietajām daļiņām putekļu uztvērējos;
- sēra trioksīda saistīšana;
- sēra dioksīda absorbcija divās pakāpēs;
- slāpekļa oksīda absorbcija;
- absorbcijas šķīdumu apstrāde ar reaģentiem, lai iegūtu reakcijas gala produktu;
- liekā šķīduma atdalīšana un sausa produkta iegūšana.

Ja katla agregāta kurtuvē sadedzina ogles, tad dūmgāzes pēc tam vispirms no pelniem attīra pelnu uztvērējā, parasti elektrofiltros. Lai kristalizētu SO_3 , pēc pelnu uztvērēja gāzu plūsmā pievada amonjaku. Sēra dioksīda uztveršana norit I un II pakāpes absorberos, realizējot reakcijas:

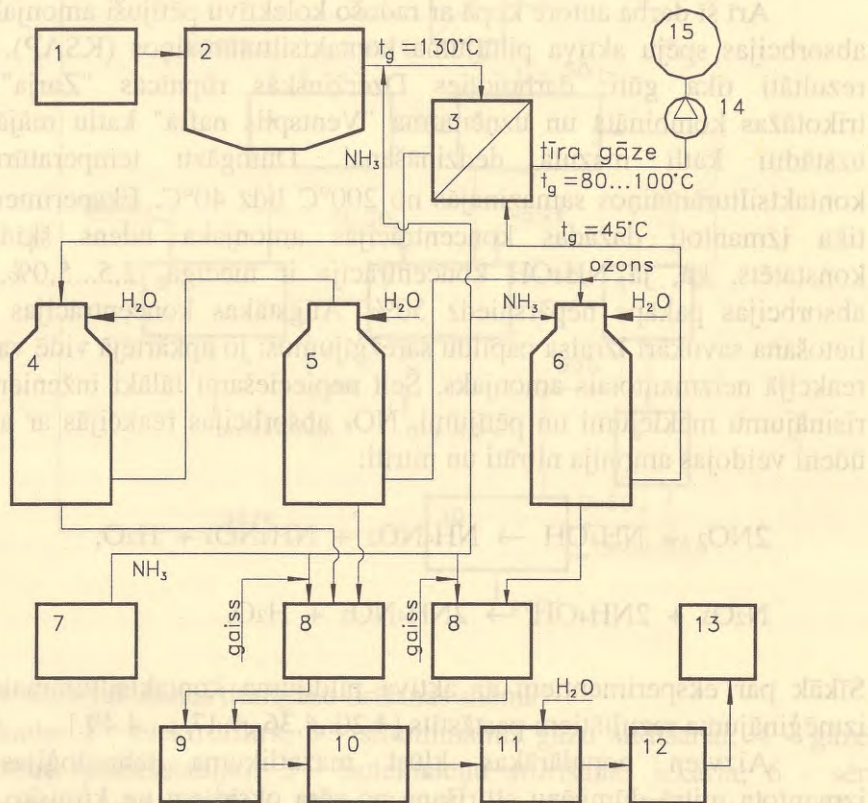


Pirmās pakāpes absorberā vide ir skāba ($\text{pH} = 6$) un tātad korozijas agresīva. II pakāpes skalotnī gāzes kontaktējas ar ūdeni, lai reakcija paspētu noritēt līdz galam. Trešajā absorberā gāzes sajauc ar ozonētu gaisu un to plūsmā izsmidzina amonjaka ūdeni.

Šajā gadījumā slāpekļa oksīda uztveršanas shēma ir šāda:



Absorbcijas šķīdumu aizvada uz oksidēšanās reaktoru, kurā papildus ievada amonjaka un gaisa maisījumu un iegūst amonija sulfātu un nitrātu. Piesātināto šķīdumu iztvaicē 350...450°C temperatūrā, iegūstot minerālmēslus sausā veidā.

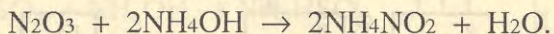
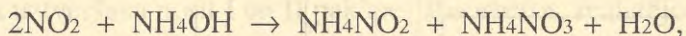


4.16. att. Amonjaka dūmgāzu attīrīšanas metode.

- 1 - katls; 2 - elektrofiltri; 3 - siltummainis; 4,5 - (attiecīgi) I un II pakāpes sēra oksīda absorbērs; 6 - slāpekļa oksīdu absorbērs; 7 - amonjaka tvertne; 8 - oksidēšanas reaktors; 9 - minerālmēslu tvertne; 10 - žāvētava; 11 - granulators; 12 - kalte; 13 - noliktava; 14 - dūmsūcējs; 15 - skurstenis.

Viens no aparātiem, kurā iespējams realizēt absorbcijas paņēmieni, ir aktīva pildījuma kontaktsiltummainis. Tādēļ siltuma un masas apmaiņas procesu izpētei tajos tika pievērsta īpaša uzmanība.

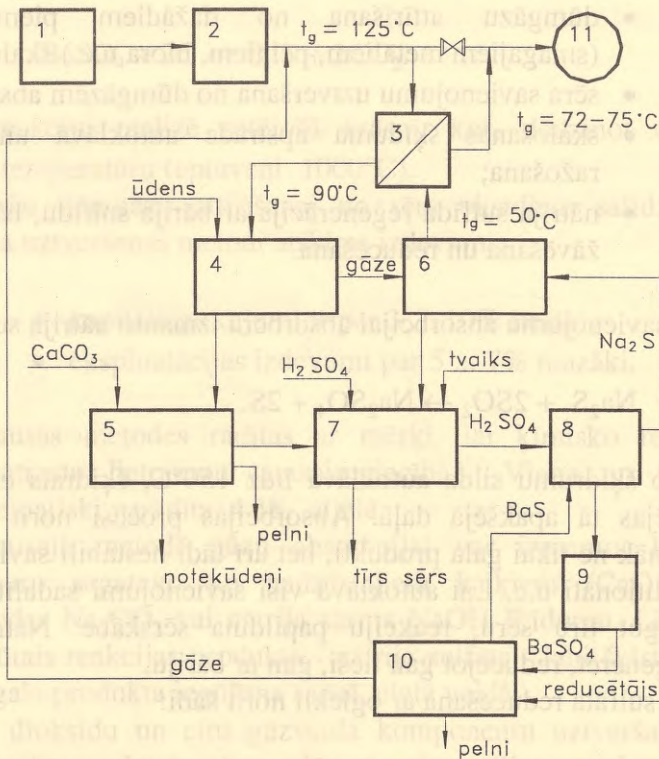
Arī šī darba autore kopā ar radošo kolektīvu pētījuši amonjaka ūdens absorbcijas spēju aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņos (KSAP). Pozitīvi rezultāti tika gūti, darbojoties Dzeržinskas rūpnīcas "Zarja", Ogres trikotāžas kombināta un uzņēmuma "Ventpils nafta" katlu mājās, kurās uzstādīti katli mazuta dedzināšanai. Dūmgāzu temperatūra šajos kontaktsiltummaiņos samazinājās no 200°C līdz 40°C. Eksperimentu laikā tika izmantoti dažādas koncentrācijas amonjaka ūdens šķīdumi un konstatēts, ka, ja NH₄OH koncentrācija ir niecīga, 2,5...5,0%, - NO_x absorbcijas pakāpe nepārsniedz 50%. Augstākas koncentrācijas NH₄OH lietošana savukārt izraisa papildu sarežģījumus: jo apkārtējā vidē var nonākt reakcijā neizmantotais amonjaks. Šeit nepieciešami tālāki inženiertehnisku risinājumu meklējumi un pētījumi. NO_x absorbcijas reakcijās ar amonjaka ūdeni veidojas amonija nitrāti un nitrīti:



Sīkāk par eksperimentiem ar aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņiem un izmēģinājuma rezultātiem pastāstīts [4.20., 4.36., 4.47. ... 4.49.].

Aizvien populārākas kļūst mazatlikuma tehnoloģijas, kurās izmantota mitrā dūmgāzu attīrīšana no sēra oksīdiem un ķīmisko reakciju ceļā tiek iegūtas tautsaimniecībā lietojamas vielas.

Viena no tādām shematiski parādīta 4.17. attēlā. Šai tehnoloģijā realizēta dūmgāzu ķīmiskā skalošana, lai iegūtu tīru sēru, pie kam izmantotos reaģentus reģenerē un atkārtoti izmanto skalošanas un absorbcijas procesā.



4.17. att. Sēra ražošanas dūmgāzu tīrīšanas shēma:

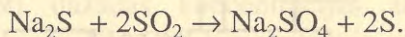
1 - katls; 2 - elektrofiltrs; 3 - siltummainis gāzu sildīšanai; 4 - gāzes skalotnis (priekšstadija); 5 - notekūdeņu attīrīšanas iekārta; 6 - sēra uztvēršanas iekārtas (I un II stadija); 7 - autoklāvs; 8 - nātrija sulfīda reģenerācijas iekārta; 9 - filtri; 10 - bārija sulfāta žāvētava un reducēšanas iekārta; 11 - skurstenis.

Attīrīšanas procesā ir šādas stadijas:

- dūmgāzu attīrīšana no putekļiem elektrofiltros un dzesēšana;

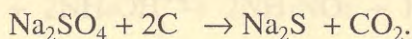
- dūmgāzu attīrīšana no dažādiem piemaisījumiem (smagajiem metāliem, pelniem, hlora u.c.) skalotnēs;
- sēra savienojumu uztveršana no dūmgāzēm absorberā;
- skalošanas šķīduma apstrāde autoklāvā un tīra sēra ražošana;
- nātrija sulfīda reģenerācija ar bārija sulfīdu, bārija sulfāta žāvēšana un reducēšana.

Sēra savienojumu absorbcijai absorberā izmanto nātrija sulfīdu:



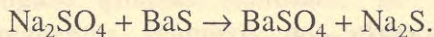
Iegūto šķīdumu silda autoklāvā līdz 150°C, šķidrās elementārais sērs izgulsnējas tā apakšējā daļā. Absorbcijas procesi norit lēni, tādēļ autoklāvā nonāk ne tikai gala produkti, bet arī tādi nestabili savienojumi kā tiosulfāti, politionāti u.c. Lai autoklāvā visi savienojumi sadalītos un būtu iespējams iegūt tīru sēru, reakciju papildina sērskābe. Nātrija sulfātu iespējams reģenerēt, reducējot gan tieši, gan ar bāriju.

Tiešā sulfāta reducēšana ar oglekli norit šādi:

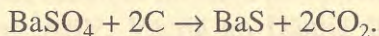


To realizēt iespējams krāsnī, uzturot tajā 1000°C temperatūru, pie kam nātrija sulfātam jābūt cietā agregātstāvoklī.

Otra alternatīva paredz bārija sulfāta šķīduma izmantošanu. Reakcijas rezultātā bārija sulfāts izgulsnējas, bet nātrija sulfīds paliek šķīdumā izšķīdušā veidā:



Bārija sulfāta nogulsnes no reģenerētā šķīduma atdala filtrācijas procesā. Bārija sulfātu analogiski nātrija sulfātam iespējams reducēt, iegūstot bārija sulfīdu:



Šo reakciju realizē rotējošā krāsnī, kur, dedzinot ogles, uztur reducēšanas temperatūru (aptuveni 1000°C).

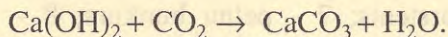
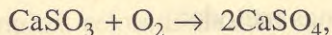
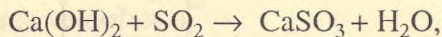
Mitrajai dūmgāzu attīrīšanai no sēra oksīdiem salīdzinājumā ar pussauso sēra uztveršanas metodi atšķiras izdevumi:

- kapitālieguldījumi ir par 3 ... 10% lielāki,
- ekspluatācijas izdevumi par 5 ... 7% mazāki.

Pussausās metodes radītas ar mērķi, lai ķīmisko reakciju gala produktam atrastu lietojumu tautsaimniecībā. Viena no pussausajām metodēm shematiski parādīta 4.18. attēlā.

Pussausajā metodē gāzu absorbcijai var izmantot kaļķu pienu $\text{Ca}(\text{OH})_2$, kuru sagatavo no nedzēstajiem kaļķiem (CaO), tehniskās kalcinētās sodas Na_2CO_3 vai nātrija sārma NaOH šķīdumu. Lietojot divus pēdējos, iegūtais reakcijas produkts - nātrija sulfāts - labi šķīst, un tādēļ ir sarežģītāka gala produkta iegūšana sausā, cietā veidā.

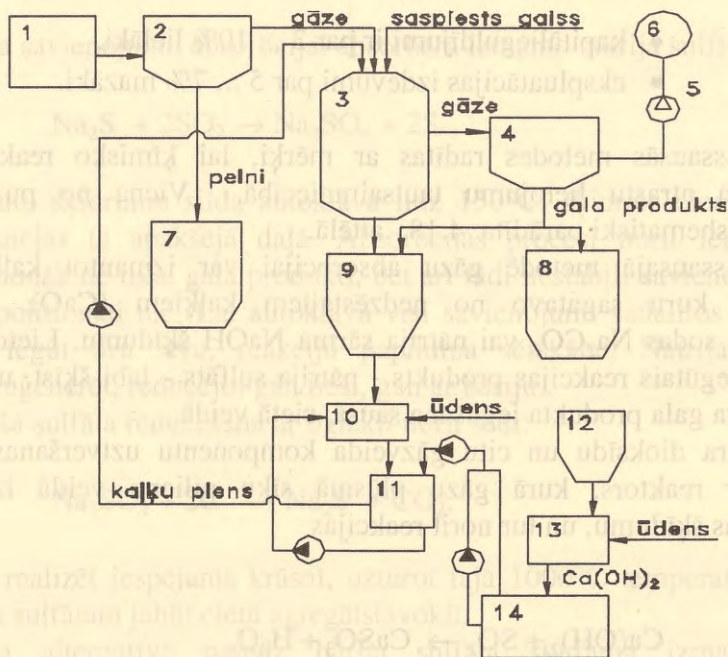
Sēra dioksīdu un citu gāzveida komponentu uztveršanas galvenā iekārta ir reaktors, kurā gāzu plūsmā sīku pilienu veidā izsmidzina absorbcijas šķīdumu, un tur norit reakcijas



Praktiski reakcijas ir sarežģītākas, jo papildus notiek vēl citas, piemēram, SO_2 un SO_3 reaģē ar ūdeni. Karbonāta veidošanās reakcija jāuzskata par nevēlamu, jo sasaista CO_2 uztveršanai nepieciešamo sārma,

tādēļ kaļķu piens jāpievada nelielos daudzumos, lai reakcijai nepietiktu sārna.

Reaktorā padotā šķidrums daudzumam jābūt tādā, lai viss ūdens paspētu iztvaikot un apakšējā daļa būtu sausa. Cietās daļiņas satur pelnus (10...30%), CaSO_3 (40...60%), CaSO_4 (3...20%), CaCO_3 (1...8%), $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (3...15%), CaCl_2 (6...8%) un inertas vielas (3...10%).



4.18. att. Dūmgāzu pussausā attīrīšanas metode:

- 1 - katls; 2 - rupjo putekļu uztvērējs; 3 - reaktors; 4 - putekļu uztvērējs;
 5 - ventilators; 6 - skurstenis; 7 - pelnu bunkurs; 8 - gala produkta bunkurs;
 9 - bunkurs; 10 - mitrinātājs; 11 - dozēšanas tvertne; 12 - kaļķu bunkurs;
 13 - kaļķu dzesēšanas tvertne; 14 - kaļķu piena tvertne.

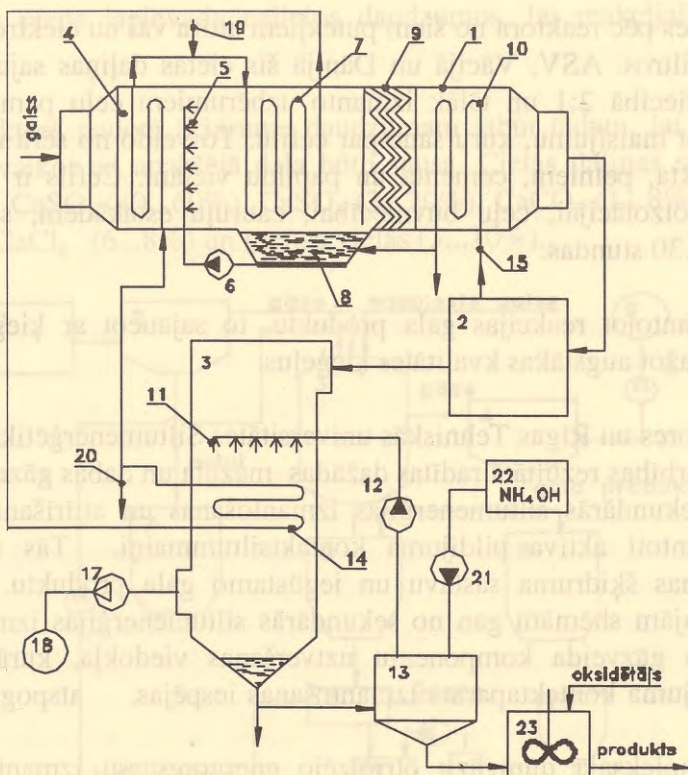
Gāzes pēc reaktora no šiem putekļiem attīra vai nu elektrofiltros, vai arī maisu filtros. ASV, Vācijā un Dānijā šīs cietās daļiņas sajauc ar ogļu pelniem attiecībā 2:1 un tālāk izmanto uzbērumiem ceļu pamatos. Somi ieteic veidot maisījumu, kuru sauc par cefilu. To veido no sēra uztveršanas gala produkta, pelniem, cementa un papildu vielām. Cefils ir salizturīgs, derīgs hidroizolācijai, ceļu būvniecībai, cauruļu estakādēm, sacietēšanas laiks ir 15...30 stundas.

Izmantojot reakcijas gala produktu, to sajaucot ar ķieģeļu masu, iespējams ražot augstākas kvalitātes ķieģeļus.

Autores un Rīgas Tehniskās universitātes Siltumenerģētikas katedras kolēģu sadarbības rezultātā radītas dažādas mazuta un dabas gāzes degšanas produktu sekundārās siltumenerģijas izmantošanas un attīrīšanas shēmas, kurās izmantoti aktīva pildījuma kontaktsiltummaiņi. Tās atšķiras ar smidzināšanas šķidrums sastāvu un iegūstamo gala produktu. Viena no vispilnīgākajām shēmām gan no sekundārās siltumenerģijas izmantošanas, gan kaitīgo gāzveida komponentu uztveršanas viedokļa, kurā parādītas aktīva pildījuma kontaktparāta izmantošanas iespējas, atspoguļota 4.19. attēlā.

Kompleksajā dūmgāzu otrreizējo energoresursu izmantošanas un attīrīšanas procesā, lai atdalītu sēra un slāpekļa oksīdus, ir šādas stadijas:

- iedarbība uz degšanas procesu kurtuvē, lai samazinātu slāpekļa oksīda veidošanos;
- dūmgāzu sekundārās siltumenerģijas izmantošana un slāpekļa un sēra oksīda absorbcija;
- absorbcijas šķidrums apstrāde gala produktu iegūšanai.



4.19. att. Kompleksā dūmgāzu attīrīšana un siltuma enerģijas atlikumu izmantošanas shēma:

1 - gaisa sildītājs; 2 - katls; 3 - kontaktsiltummainis - absorbers; 4 - siltummainis; 5 - sprauslas; 6 - sūknis; 7 - rasiņāta sildvirsmā; 8 - ūdens tilpne; 9 - separators; 10 - siltummainis; 11 - sprauslas; 12 - smidzināšanas sūknis; 13 - tvertne; 14 - aktīvais pildījums; 15- nopūšanas ūdens līnija; 16 - ievads drenāžā; 17 - dūmsūcējs; 18 - skurstenis; 19, 20 - (attiecīgi) ievads un izvads ūdenim no un uz siltuma tīkliem; 21 - dozatorsūknis; 22 - amonjaka ūdens tvertne; 23 - oksidēšanas tvertne.

Lai samazinātu gaisa piesārņošanu ar slāpekļa oksīdiem, tiek īstenotas abas metožu grupas:

- 1) regulējot degšanas procesu, lai samazinātu maksimālo degšanas temperatūru kurtuvē;
- 2) uztverot no dūmgāzēm jau radušos slāpekļa oksīdus.

Savukārt sēra oksīdu uztveršana apvienota ar slāpekļa oksīdu uztveršanas otro pakāpi - absorbciju.

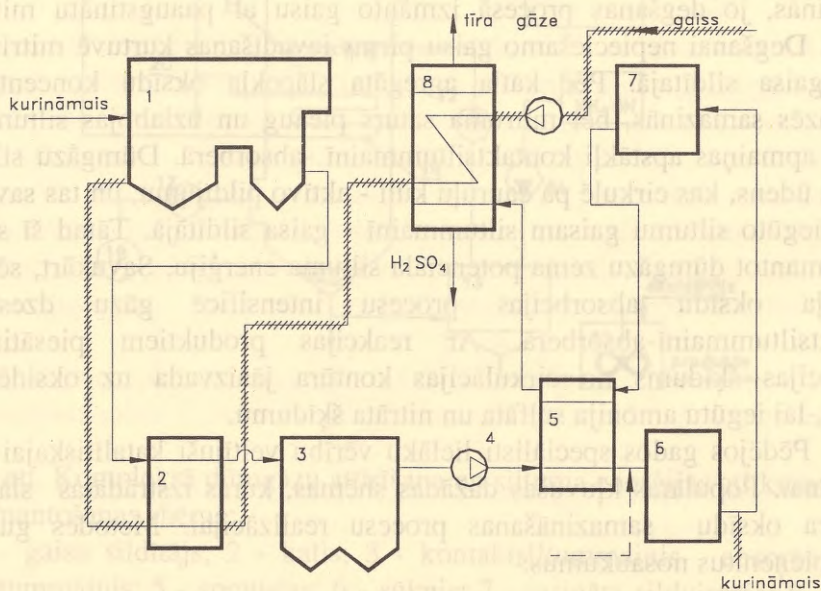
Slāpekļa oksīdu koncentrācija degšanas produktos pēc kurtuves samazinās, jo degšanas procesā izmanto gaisu ar paaugstinātu mitruma saturu. Degšanai nepieciešamo gaisu pirms ievadīšanas kurtuvē mitrina un silda gaisa sildītājā. Pēc katla agregāta slāpekļa oksīdu koncentrācija dūmgāzēs samazinās, bet mitruma saturs pieaug un uzlabojas siltuma un masas apmaiņas apstākļi kontaktsiltummainī - absorberā. Dūmgāzu siltumu uzņem ūdens, kas cirkulē pa cauruļu kūli - aktīvo pildījumu, un tas savukārt atdod iegūto siltumu gaisam siltummainī - gaisa sildītājā. Tātad šī shēma ļauj izmantot dūmgāzu zema potenciāla siltuma enerģiju. Savukārt, sēra un slāpekļa oksīdu absorbcijas procesu intensificē gāzu dzesēšana kontaktsiltummainī-absorberā. Ar reakcijas produktiem piesātinātais absorbcijas šķīdums no cirkulācijas kontūra jāaizvada uz oksidēšanās tvertni, lai iegūtu amonija sulfāta un nitrāta šķīdumu.

Pēdējos gados speciālisti lielāku vērību veltījuši katalītiskajai gāzu attīrīšanai. Populāras kļuvušas dažādas shēmas, kuras izstrādātas slāpekļa un sēra oksīdu samazināšanas procesu realizācijai. Metodes guvušas vispārpieņemtus nosaukumus:

- DENOX - slāpekļa oksīdu katalītiskā samazināšana;
- SCR - sēra oksīdu katalītiskā samazināšana;
- SNOX - vienlaicīga slāpekļa un sēra oksīdu katalītiskā samazināšana.

Šo metožu pamatā ir izmantoti divi atšķirīgi paņēmieni, kuru lietojums ir atkarīgs no uzdevuma - kuru gāzveida komponentu nepieciešams atdalīt no dūmgāzēm:

- ja jāattīra *no sēra oksīdiem* - sēra dioksīds katalītiski oksidējas līdz sēra trioksīdam un pēc tam sērskābes veidā to izvada no iekārtas,
- ja jāattīra *no slāpekļa oksīdiem* - slāpekļa oksīdi reducējas līdz slāpeklim.

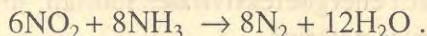
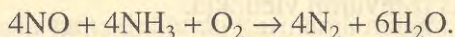


4.20. att. Gāzu attīrīšanas SNOX process.

1 - katla agregāts; 2 - gaisa sildītājs; 3 - putekļu uztvērējs; 4 - dūmsūcējs; 5 - siltummainis; 6 - SCR reaktors; 7 - SO₂ konvertors; 8 - WSA-2 gāzes skalotnis.

Gāzu attīrīšanas SNOX shēma katlu agregātiem, kuru kurtuvēs sadedzina ogles, parādīta 4.20. attēlā.

Karstās dūmgāzes (300...400°C) dzesē gaisa sildītājā līdz 200...240°C temperatūrai, pie kam daļēji uzsildītu gaisu padod no gāzes skalotņa WSA - 2. Dažos gadījumos uzstāda vēl degšanas produktu papildu dzesētāju. No putekļiem dūmgāzes attīra auduma filtrs, jo cieto daļiņu koncentrācija SCR ieplūdē nedrīkst pārsniegt 5 mg/m³. Pēc filtra gāzes karsē līdz 380°C, dzesējot tīrās gāzes pēc katalizatora. Amonjaka un gaisa maisījumu ievada dūmgāzu plūsmā reaktora SCR ieplūdē, kurā slāpekļa oksīdus katalītiski reducē ar amonjaku. Efektīvā slāpekļa oksīdu attīrīšana (līdz 99%) izskaidrojama ar to, ka iespējams ievadīt amonjaku vairāk par stehiometriski nepieciešamo, nebaidoties par tā izplūdi atmosfērā.



Amonjaka pārpalikums piedalās tālākajā gāzes attīrīšanas procesā.

Tādu pašu reakcijas ātrumu var sasniegt kurtuvē 980°C temperatūrā, nelietojot katalizatoru. Praktiski realizēt to ir grūti vairāku iemeslu dēļ: nedaudz augstākā temperatūrā noris papildu reakcijas - amonjaks oksidējas līdz slāpeklim vai pat slāpekļa oksīdiem, katla slodzes ir mainīgas un tāpēc arī kurtuves temperatūra nav pastāvīga. Tādēļ ir būtisks reaktora SCR lietojums SNOX procesā.

Pirms ieplūdes SO₂ konvertorā gāzi papildus karsē līdz 410 - 420°C. Tajā 25% sēra dioksīda katalītiski oksidējas līdz SO₃. Firma uzskata, ka vienlaikus amonjaks un oglekli saturošās vielas konvertorā oksidējas pilnībā. Bez tam katalizators aiztur putekļus, kuri nav uztverti filtrā.

Skalotnī WSA-2 gāzi dzesē ar gaisu, kas nekontaktējas ar gāzi un pārvietojas stikla caurulēs. Dzesēšanas rezultātā norit kondensācijas process - sildvirsmas sienīgas pārklāj koncentrētas sērskābes (95%) plēvīte, kura notek WSA-2 apakšējā daļā. Iegūtās sērskābes kvalitāte ir augsta un to iespējams izmantot tautsaimniecībā.

Atšķirībā no citām gāzu attīrīšanas tehnoloģijām, īstenojot SNOX procesu, tas ir izdevīgāks, ja sēra saturs kurināmajā ir pēc iespējas augstāks. Piemēram, ja ogle satur 3% sēra, procesā izmantotais elektroenerģijas patēriņš tiek kompensēts ar dūmgāzu sekundārās siltumenerģijas izmantošanu.

Šeit parādītās mazatlikuma tehnoloģijas shēmas ir tikai neliela daļa no šobrīd radītajām. To veidošana un īstenošana ir vienīgais iespējamais inženiertehniskās domas ceļš cilvēces un apkārtējās vides aizsardzībā.

Visas mazatlikuma tehnoloģisko gāzu un dūmgāzu attīrīšanas shēmas parasti tiek salīdzinātas un izvērtētas ar ekonomisko kritēriju palīdzību:

1. no kapitālieguldījumu izmaksu viedokļa;
2. no ekspluatācijas izdevumu viedokļa.

Pēdējos būtiski ietekmē iekārtu energoefektivitātes rādītāji, jo ekspluatācijas izdevumu sastāvdaļa ir enerģijas patēriņš.

Tas sīkāk izklāstīts monogrāfijas 3. nodaļā.

4.4.6. Izmešu samazināšana kurināmā maiņas gadījumā

Koksnes dedzināšana katlu kurtuvēs ir jāaplūko kā vides aizsardzība no piesārņojuma ar ogļskābo gāzi. Kā zināms, šī gāze ir siltumnīcas efekta veidotāja un daudzās valstīs par CO₂ izmešiem jāmaksā nodoklis. Koksne, mežā pūstot, sadalās un tā rezultātā veidojas ogļskābā gāze. Arī koksnei sadegot, rezultātā veidojas gala produkts - ogļskābā gāze. Tikai šajā gadījumā tiek iegūts oglekļa sadegšanas siltums, kuru izmanto siltumapgādes sistēmā. Tātad nav nepieciešams papildus dedzināt citu kurināmo (ogles, mazutu, dabas gāzi), lai saražotu siltumenerģiju.

Tas ir tikai viens ekoloģiskais aspekts kurināmā maiņas gadījumā. Vēl jāaplūko divi svarīgi momenti:

- izmešu līmeņa samazināšanās gan kurināmā sastāva izmaiņu, gan modernākas degšanas tehnoloģijas izmantošanas dēļ;
- izmešu samazināšanās katla lietderības koeficienta paaugstināšanās gadījumā: tātad tiek lietota enerģētiski efektīva tehnoloģija un vienas un tās pašas enerģijas vienības saražošanai tiek dedzināts mazāk kurināmā.

Tātad faktiskais izmešu samazinājums kurināmā maiņas gadījumā jāaprēķina ar vienādojumu:

$$\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2,$$

kur ΔC_1 - izmešu samazinājuma kurināmā maiņas sastāvdaļa;

ΔC_2 - izmešu samazinājuma energoefektivitātes komponents.

Kurināmā un dūmgāzu analīzes, kuras tika veiktas katlu eksperimentālo izmēģinājumu laikā [4.18.], parādīja, ka, nomainot ogles vai mazutu ar šķeldu un koksnes atkritumiem, samazinās vides piesārņojums ar slāpekļa un sēra oksīdiem un cieto daļiņu izmešiem. Eksperimentālie pētījumi tika īstenoti NUTEK programmas "Videi piemērotas energosistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā" ietvaros, kuru realizācijas metodika sīkāk izklāstīta 2. nodaļā.

Lai izvērtētu izmešu samazināšanās aspektus kurināmā maiņas gadījumā, jāaplūko vairāki viedokļi.

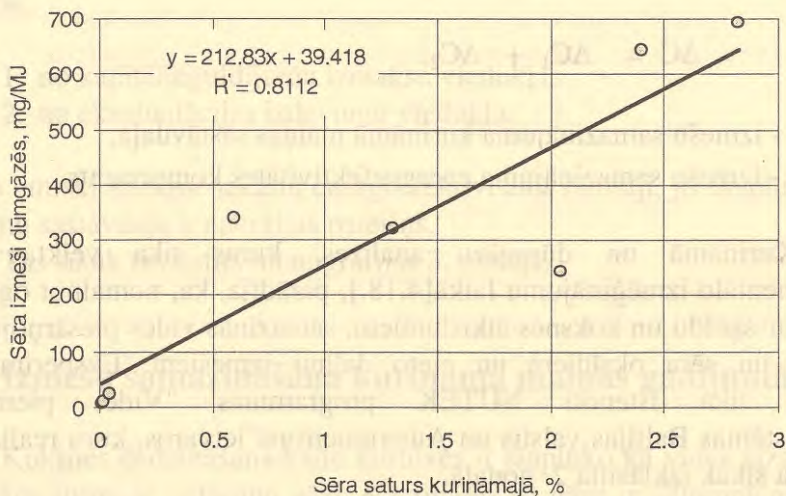
Pirmkārt, jāaplūko kurināmā sastāvā esošie elementi, to reakcija ar skābekli, veidojot kaitīgus izmešus, un izplūde apkārtējā vidē dažādu savienojumu veidā.

Otrkārt, kaitīgo izmešu koncentrācija dūmgāzēs atkarīga no degšanas procesa organizācijas.

Sēra oksīdu izmeši ir atkarīgi no sēra satura kurināmajā. Koksne sēra saturs ir niecīgs: 0,01 ... 0,04%. Savukārt, sēra saturs mazutā katlu izmēģinājumu laikā tika konstatēts diapazonā 1,3 ... 2,83%, bet oglēm

Balvos - 0,6%. Kurināmā sēra saturs ietekme uz sēra izmešu veidošanos dažādiem kurināmajiem atspoguļota 4.21. attēlā.

Kā redzams 4.21. attēlā, analīžu dati labi korelē ar regresijas vienādojumu. Tas liecina, ka sēra izmešu daudzums ir atkarīgs galvenokārt no sēra saturs kurināmajā un citu parametru ietekme ir salīdzinoši niecīga. Sakarā ar to, ka dūmgāzēs var veidoties gan sēra dioksīds, gan sēra trioksīds, abu sēra oksīdu izmeši pārrēķināti uz sēra saturu dūmgāzēs, pie kam tie attiecināti pret vienu kurināmā siltuma vienību MJ.



4.21. att. Sēra izmešu atkarība no sēra saturs kurināmajā.

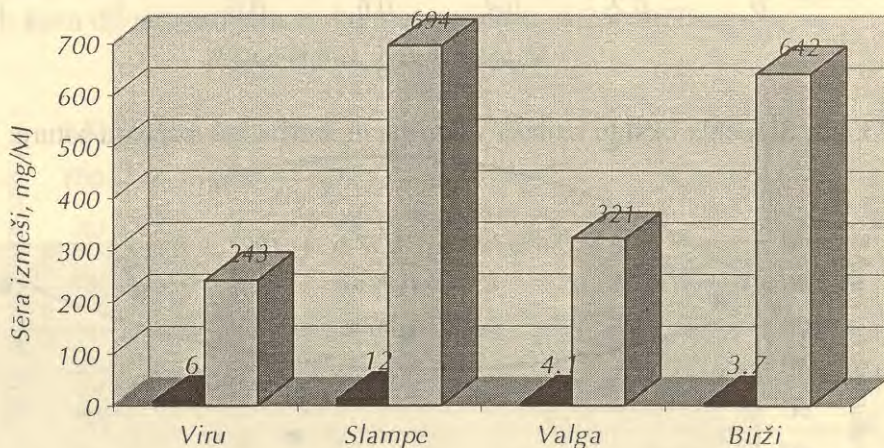
Sēra izmešu samazinājums katlu mājā, rekonstruējot mazuta katlu kurtuvi koksnes šķeldas dedzināšanai, grafiski atspoguļots 4.22. attēlā.

Kā redzams 4.21. attēlā, uz katru kurināmā MJ sēra izmeši atmosfērā samazinās 40 ... 170 reizes.

Nemot vērā iepriekš aplūkoto slāpekļa oksīdu veidošanās mehānismu specifiku, jāapskata ne tikai kurināmā sastāvā esošais slāpekļis, bet arī slāpekļa oksīda veidošanās tehnoloģija.

Kurināmā sastāva analīze parādīja, ka slāpekļa saturs ir mazs:

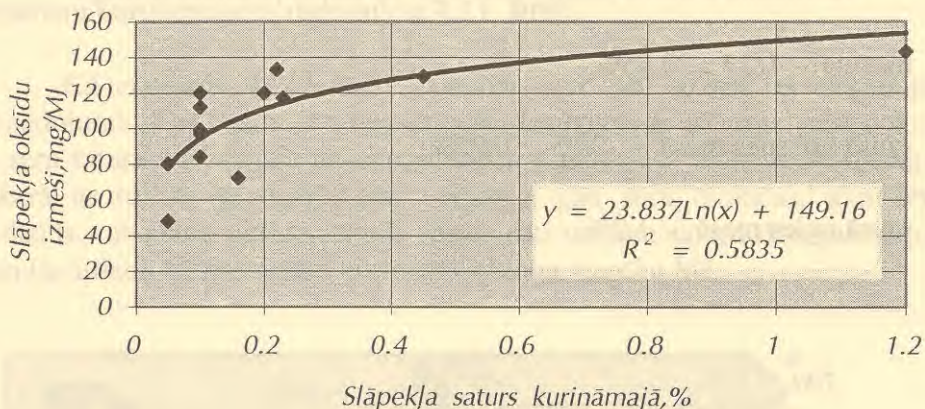
- mazutā - 0,11 ... 0,45%;
- sausā koksnes masā - 0,05 ... 0,23%;
- sausā ogles masā - 1,2%.



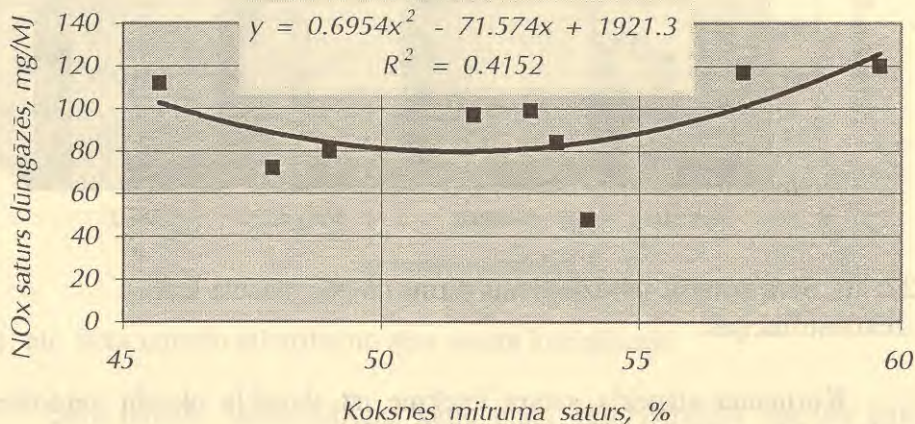
4.22. att. Sēra izmešu salīdzinājums pirms un pēc mazuta katlu rekonstrukcijas.

Kurināmā slāpekļa satura ietekme uz slāpekļa oksīdu veidošanos parādīta 4.23. attēlā.

Kā redzams 4.23. attēlā, slāpekļa saturs kurināmajā ietekmē slāpekļa oksīdu veidošanos: pirmajam pieaugot, palielinās NO_x izmeši. Taču datu lielā izkliede liecina, ka regresijas sakarība ir lietojama vairāk kā kvalitatīvs rādītājs, bet nevis kā - aprēķinu vienādojums.



4.23. att. Slāpekļa oksīdu izmešu atkarība no kurināmā slāpekļa satura.

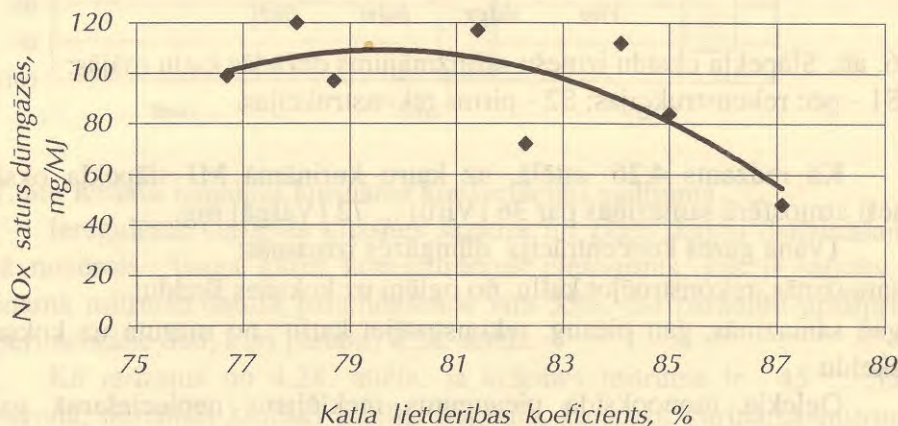


4.24. att. Kurināmā mitruma satura ietekme uz slāpekļa oksīdu veidošanos.

Sakarā ar to, ka koksnes šķelda un zāģu skaidas, kas tika dedzinātas rekonstruēto katlu kurtuvēs, atšķirās ar mitruma saturu: 45 ... 60%, degšanas procesa norisei būtu jāatšķiras. Zinot to, ka liela mitruma satura

gadījumā samazinās temperatūras kurtuvē, un tātad pasliktinās termisko slāpekļa oksīdu veidošanās apstākļi, vajadzētu novērot slāpekļa oksīdu samazināšanās likumsakarību, pieaugot mitrumam. Tā meklēta grafiski un atspoguļota 4.24. attēlā. Eksperimentu dati, kas parādīti 4.24. attēlā, rāda, ka vērojama izkļiede un tie vāji korelē ar regresijas vienādojumu. Tātad kurināmā mitruma saturs ietekmi uz slāpekļa oksīdu veidošanos koksnes šķeldas dedzināšanas gadījumos var neņemt vērā.

Modernās, ieregulētās kurtuvēs koksnes dedzināšanai degšanas tehnoloģijai jānodrošina ne tikai augsta enerģētiskā efektivitāte, bet arī minimāls slāpekļa oksīdu izmešu līmenis. Tādēļ tika meklēta kopsakarība starp šiem diviem lielumiem, kura atspoguļota 4.25. attēlā.

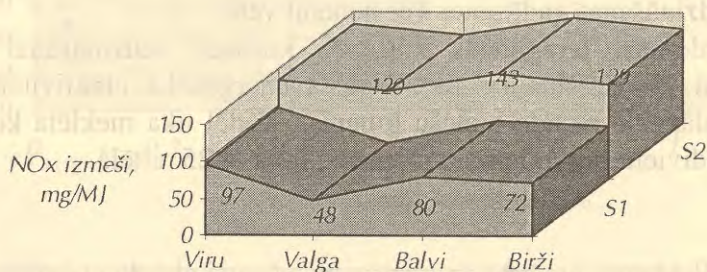


4.25. att. Slāpekļa oksīdu izmešu daudzums atkarībā no katla lietderības koeficienta.

Kā liecina grafiskais atspoguļojums 4.25. attēlā, slāpekļa oksīdu izmešu daudzums ir atkarīgs no katla lietderības koeficienta: pieaugot katla enerģētiskajai efektivitātei, samazinās kaitīgie NOx izmeši. Tātad ieregulētas koksnes šķeldas un zāģu skaidu kurutves, kuras strādā ar

maksimālu lietderības koeficientu, nodrošina minimālo slāpekļa oksīdu izmešu līmeni.

Slāpekļa oksīdu izmešu samazinājums katlu mājā, rekonstruējot mazuta un ogļu katlu kurtuves koksnes šķeldas dedzināšanai, grafiski atspoguļots 4.26. attēlā.



4.26. att. Slāpekļa oksīdu izmešu salīdzinājums dažādās katlu mājās:
S1 - pēc rekonstrukcijas; S2 - pirms rekonstrukcijas.

Kā redzams 4.26. attēlā, uz katru kurināmā MJ slāpekļa oksīdu izmeši atmosfērā samazinās par 36 (Viru) ... 72 (Valgā) mg.

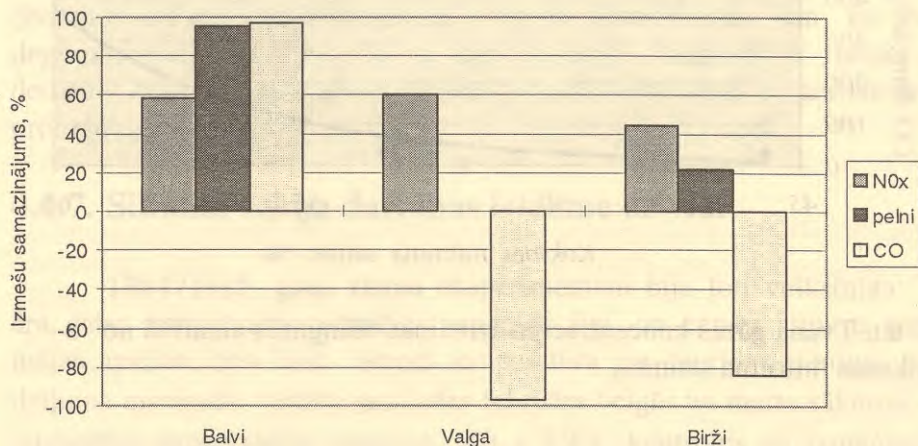
Tvana gāzes koncentrācija dūmgāzēs izmainās:

- samazinās, rekonstruējot katlu no oglēm uz koksnes šķeldu;
- gan samazinās, gan pieaug, rekonstruējot katlu no mazuta uz koksnes šķeldu.

Oglekļa monoksīda pieaugums meklējams nepieciešamā gaisa pievadīšanas organizācijā. Tvana gāzes, kā arī slāpekļa oksīdu un cieto daļiņu izmešu izmaiņas kurināmā maiņas gadījumā trīs piramajos NUTEK programmas projektos Balvu, Valgas un Biržu katlu mājās atspoguļotas 4.27. attēlā.

Kā redzams no datiem 4.27. attēlā, dedzinot koksni, ne vienmēr vērojama visu izmešu samazināšanās. Piemēram, pāreja no mazuta uz enerģētiskās koksnes dedzināšanu sākotnējā kurtuves darbības periodā bija saistīta ar tvana gāzes izmešu palielināšanos. Kaut arī bija novēroti gaisa piejaukumi visā dūmgāzu ceļā, labvēlīgi apstākļi tvana gāzes pilnīgai

degšanai neveidojās (katla lietderības koeficients bija par 1% zemāks nekā kurināmā pilnīgas degšanas apstākļos). Tas tika novērsts pēc rūpīgas degšanas procesu ieregulēšanas darbu veikšanas.



4.27. att. Izmešu izmaiņas kurināmā konvertācijas gadījumā.

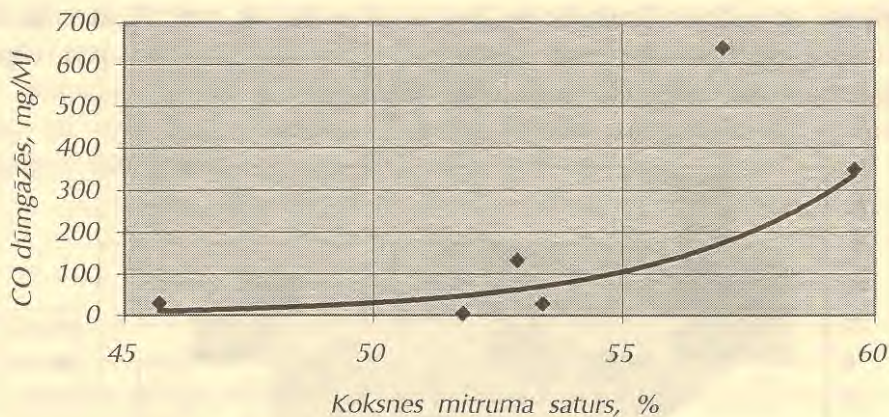
Ieregulētās kurtuvēs koksnes šķeldas un zāģu skaidu dedzināšanas laikā novērots tvana gāzes koncentrācijas pieaugums, kas ir saistīts ar kurināmā mitruma satura palielināšanos virs 55%. Šo parādību apstiprina eksperimentālie dati, kuri parādīti 4.28. attēlā.

Kā redzams no 4.28. attēla, ja koksnes mitrums ir 45 ... 55% diapazonā, norisinās ķīmiski pilnīga degšana. Pieaugot kurināmā mitruma saturam, apgrūtinās gaisa sajaukšanās ar degošo koksni, kā arī krītas temperatūru līmenis kurtuvē. Tas izraisa degšanas procesa tehnoloģijas izmaiņu nepieciešamību.

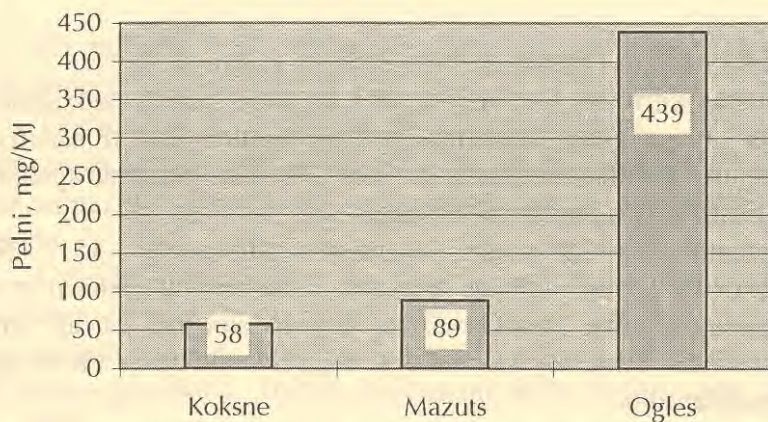
Pelnu satura samazināšanās dūmgāzēs jāvērtē divējādi:

- Gaisa baseinā ar katru dūmgāzu m³ nonāk mazāk putekļu.
- Ogļu un mazuta pelni satur kaitīgus piemaisījumus, kuru sastāvs atkarīgs no ogļu un naftas ieguves vietas.

EKOĻOGISKIE ASPEKTI



4.28. att. Tvana gāzes koncentrācijas izmaiņas dūmgāzēs atkarībā no koksnes mitruma satura.



4.29. att. Vidējie pelnu izmešu daudzumi dažādiem kurināmajiem.

Interesants atzinums iegūstams, aplūkojot pelnu koncentrācijas izmaiņu kurtuvē. Visos gadījumos, arī rekonstruējot mazuta kurtuves, vērojama cieto daļiņu koncentrācijas samazināšanās. Pelnu saturs dūmgāzēs

koksnes izmantošanas gadījumā ir ļoti zems. Apkopojot eksperimentālos datus, iegūti vidējie pelnu izmešu daudzumi atmosfērā dažādiem kurināmajiem, kuri ilustrēti 4.29. attēlā.

Kā redzams 4.29. attēlā, vismazākā pelnu koncentrācija dūmgāzēs ir, dedzinot koksni, bet visaugstākā - ogles. Skaidrojums tam, ka mazuta degšanas gadījumā cieto daļiņu koncentrācija dūmgāzēs ir lielāka nekā dedzinot koksni, meklējams degšanas procesa tehnoloģijā un aerodinamisko procesu organizācijā.

4.4.7. Siltuma sūkņa darbības ietekme uz vidi

1984./1985. gada ziema eksperimentam bija ļoti veiksmīga: zema āra gaisa temperatūra noturējās neparasti ilgi, un zemes siltuma patēriņš mājas apsildei bija liels. Grunts temperatūra pie caurules sienīņas 85 cm dziļumā minimālo vērtību sasniedza februāra beigās un marta sākumā $-0,5^{\circ}$. Vislielākā temperatūras starpība $2,8 - 3,9^{\circ}\text{C}$ kontroles un izmēģinājuma lauciņos šajā dziļumā novērota daudz ātrāk - janvāra sākumā un saglabājas līdz februāra beigām. Arī temperatūras paaugstināšanās pavasarī ir straujāka zemes siltuma izmantošanas teritorijā, maijā - par 6°C , turpretī kontroles laukā - par 5°C . Jūnija sākumā temperatūras starpība vairs bija tikai $0,4^{\circ}\text{C}$, tātad izlīdzinājusies.

25 cm dziļumā temperatūra mainās straujāk. Siltuma sūkņa cauruļu zonā februāra beigās temperatūra ir 3°C zemāka nekā kontroles variantā. Marta beigās un aprīļa sākumā temperatūra izlīdzinās. Ārā gaisa temperatūrai strauji pieaugot, kontroles laukā augsne sasilst par 2°C vairāk, bet maija beigās temperatūra atkal izlīdzinās. Sīkāk pētījumu rezultāti aplūkoti monogrāfijas 2.3. nodaļā.

Pētījumi ļauj secināt, ka attiecīgajos apstākļos zeme atdziest lēni, nesasniedzot projektā paredzētās minimālās vērtības. Pavasarī caurules parasti neietekmē aramkārtas temperatūru un līdz ar to augu pasauli. Tātad varam uzskatīt, ka nav jūtama ietekme uz vidi šajā konkrētajā siltuma sūkņa lietošanas gadījumā.

Literatūra

- 4.1. ANO Vides un attīstības konferences materiāli. Riodežanciro. 1992.
- 4.2. Снгал И.Я. Защита воздушного бассейна при сжигании топлива.- Ленинград, 1988.
- 4.3. Сборник законодательных нормативных и методических документов для экспертизы воздухоохраных мероприятий.- Ленинград, 1986.
- 4.4. Скалкин Ф.В., Канаев А.А., Копп И.З. Энергетика и окружающая среда. - Ленинград, 1981.
- 4.5. Зельдович Б.Я., Садовников П.Я., Франк-Каменецкий Д.А. Окисление азота при горении. - Москва, 1974.
- 4.6. Лавров Н.В., Розенфельд Э.И., Хаустович Г.П. Процессы горения топлива и защита окружающей среды. - Москва, 1981.
- 4.7. Glarborg P., Miller J., Kee R. Kinetic Modeling and Sensitivity Analysis of Nitrogen Oxide Formation in Well - Stirred Reactors// Combustion and Flames. -1986. - Vol. 65. - No 2.
- 4.8. Rauch - Gas - Rücksaugung Stickoxide// Energ.Spektrum. - 1989. - No5. - Sondert., Betr. und Energ.
- 4.9. Uschwa H. NO_x - Kolloquium in Essen: Neue Wege bei der NO_x Minderung// Wärmetechnik. - 1989. - V. 34. - No 8.
- 4.10. А.С. 1252611 СССР.
- 4.11. Патент 4533314 США.
- 4.12. Заявка 524111876 Япония.
- 4.13. Заявка 5394271 Япония.
- 4.14. Патент 5322937 Япония.
- 4.15. Патент 2614933 ФРГ.

4.16. Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of the coal combustion process in small capacity boilers // IAEE - East - European Conf. Improved Energy Efficiency in Former Centrally Planned Economies. Kaunas, Lithuania, October 19-21, 1992.

4.17. Blumberga D. Improvement of Combustion Efficiency and Air Pollution // ECEEE Summer Study. The Energy Efficiency Challenge for Europe, Rungstedgaard, Denmark, June 1-5, 1993.

4.18. Ekoloģiski tīras enerģētiskās sistēmas Baltijas valstīs un Austrumeiropā// NUTEK zinātniskais seminārs un informācijas diena. Cēsis, 1994. gada 23. novembris.

4.19. Veidenbergs I., Blumberga D., Bazhbauer J. An Empirical Model of NO_x Emission in Natural Gas-Fired Industrial Steam Generating Units// Latvian J. Phys. Tech. Sci. - 1992. - No6.

4.20. Blumberga D., Veidenbergs I. Slāpekļa oksīdu izmešu samazināšana. - Rīga, 1992.

4.21. Blumberga D., Veidenbergs I., Jakušenoks J. Slāpekļa oksīdu samazināšana enerģētiskajā iekārtā // Latvian J. Phys. Tech. Sci. - 1991. - No6.

4.22. Veidenbergs I., Blumberga D. NO_x Emissions on Natural Gas-Fired Industrial Steam Generating Units // Paper presented at 24th International Symposium on Combustion. Sydney, Australia, July 5-10, 1992.

4.23. Блумберга Д.М., Вейденберг И.К. Снижение образований оксидов азота путем впрыска воды в топочную камеру // Теплообмен в парогенераторах: Тез. докл. // Всесоюз. конф. - Новосибирск, 1990.

- 4.24. Blumberga D., Veidenbergs I. Tehnoloģisko gāzu attīrīšana // Ref.tēzes Vispasaules latviešu zinātņu kongresā - Rīgā, 1991. - 1.sēj. - Tehn.zin.
- 4.25. Blumberga D., Veidenbergs I. Slāpekļa oksīdu samazinājuma nelielas jaudas katlos ekonomiskais vērtējums // Akad. A. Krogera piemiņas starptautiskās konferences tēžu krājums. -Rīga, 1991.
- 4.26. Blumberga D., Veidenbergs I., Bazhbauer G. Heat and Mass Transfer in Steam Generating Units from the Viewpoint of Reducing NOx // - Transport Processes in Engineering. Recent Advances in Heat Transfer. Proceedings of the First Baltic Heat Transfer Conference, Göteborg. Sweden, August 26-28, 1991.
- 4.27. Veidenbergs I., Blumberga D. Analysis of the coal combustion process in small capacity boilers // IAEE - East - European Conf. Improved Energy Efficiency in Former Centrally Planned Economies. Kaunas, Lithuania, October 19-21, 1992.
- 4.28. Патент 4837011/26 (054632) СССР. Теплообменная установка/Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг, В.П.Гривцов. Полож. реш. от 28.01.91.
- 4.29. Патент 5000239/26 (058618) СССР. Теплообменная установка/ Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг, Г.Я.Бажбауэр. Полож. реш. от 23.04.92.
- 4.30. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю. Подготовка промышленных газов к очистке. - Москва, 1975.
- 4.31. Ужов В.Н., Вальдберг А.Ю., Мягков Б.И., Решидов И.К. Очистка промышленных газов от пыли. - Москва, 1981.
- 4.32. Русанов А.А. Справочник по пылеулавливанию. - Москва, 1983.

4.33. Хайдаров Г.Г. К определению затрат энергии на очистку газа пароконденсационным способом // Журнал прикладной химии. - 1982. - №8.

4.34. Галустов В.С. Прямоточные распылительные аппараты в теплоэнергетике. - Москва, 1989.

4.35. Mielazek W.I., Sparrow E.M. Condensation heat transfer in the presence of noncondensables, interfacial resistance superheating, variable properties and diffusion // Int. J. Heat and Mass Transfer. - 1966. - Vol. 9. - No 10.

4.36. Blumberga D., Veidenbergs I. Tehnoloģisko gāzu attīrīšana un dzesēšana. - Rīga, 1990.

4.37. Блумберга Д.М., Вейденберг И.К., Ильин И.Н., Гришин В.А., Ворпс Х.М., Донченко Б.Т., Кононенко В.Д. Экспериментальное исследование пылеуловителя - контактного теплообменника с активной насадкой // Вентиляция и кондиционирование воздуха. - Рига, 1989.

4.38. Виленский Т. Расчет золопылеуловителей. - Москва, 1964.

4.39. А.С. 1469190, СССР МКИ 01 К 17/02, 24Н 3/12. Система теплофикации / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, В.П.Гривцов и др. - Заявлено 10.03.87; № 4234223/24-06. Оpubл. 30.03.89. Бюл. № 12.

4.40. Заявка БНР №86778/ЛВЦ МКИ 24/3/147 Метод и инсталация за тепловлажностна обработка на воздух / Горсиев Я., Блумберга Д., Гривцов В. и др. - Положит. реш. 06.01.89.

4.41. А.С. 1611451, СССР, МКИ В 04 С 3/02; 3/06. Вихревой пылеуловитель / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг и др. - Заявл. 13.12.88; №4618629/31-26. Оpubл. 7.12.90. Бюл. № 45.

4.42. А.С. 1457974, СССР, МКИ В 01 D 53/18. Теплообменный аппарат со спиральной насадкой / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг и др. - Заявл. 6.07.87; №4277288/31-26. Оpubл. 15.02.89. Бюл. № 46.

4.43. А.С. 1272061, СССР, МКИ 24 Н 1/10 Контактный теплообменник / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга и др. - Заявлено 27.05.86; № 3905773/29-06. Оpubл. 23.11.86. Бюл. №43.

4.44. А.С. 1224534, СССР, МКИ F28 D5/00; F28 C3/06. Теплообменник для охлаждения и осушки парогазовых потоков / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг и др. - Заявл. 10.06.84; №3791276/23-06; Оpubл. 15.04.86. Бюл. №14.

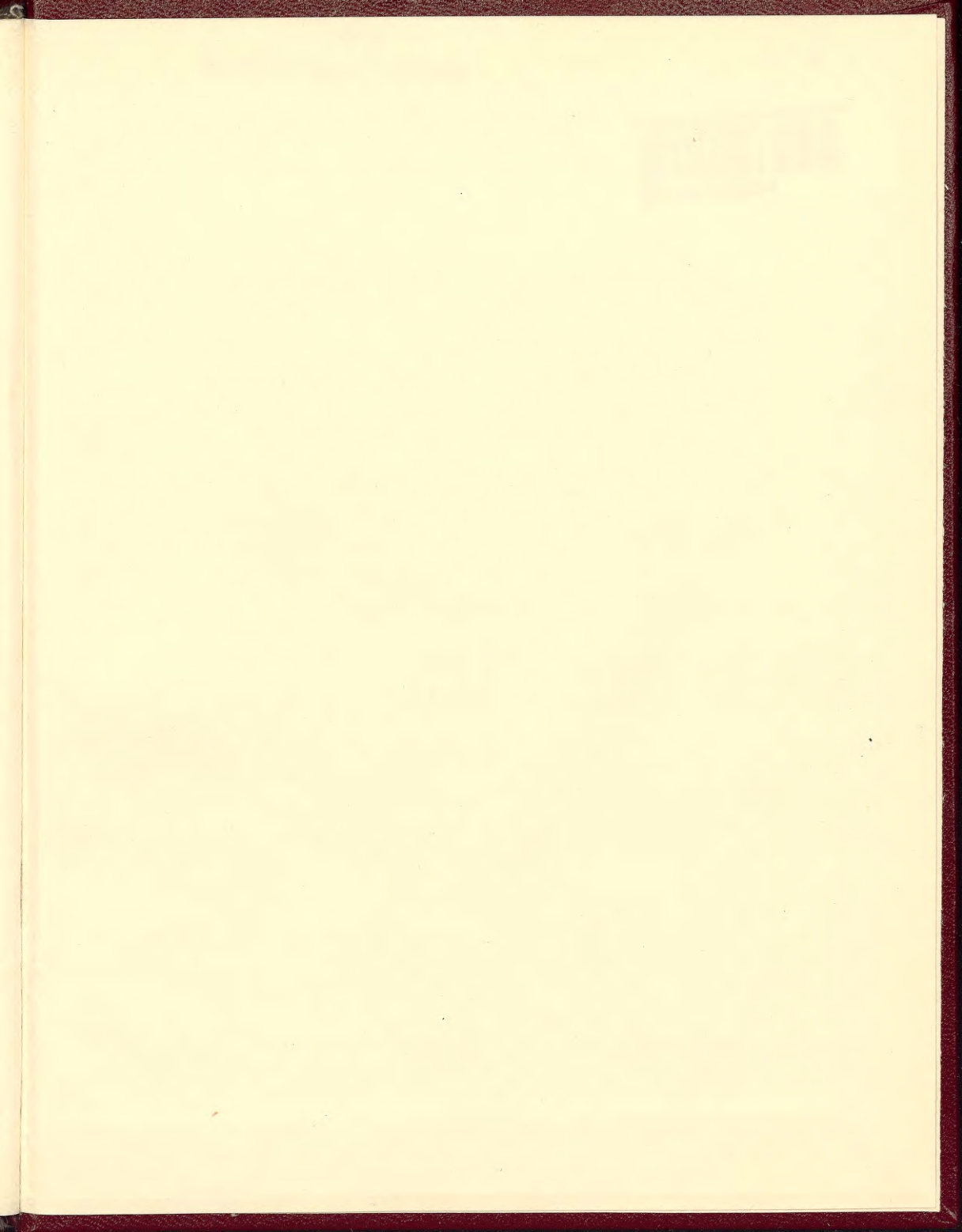
4.45. А.С. 1374001, СССР, МКИ F25 В1/00; F28 C3/06. Теплообменник для охлаждения и осушки парогазовых потоков / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг, В.А.Гришин. - Заявл. 16.06.86; №4128051/23-06. Оpubл. 15.04.88. Бюл. № 6.

4.46. А.С. 1443948, СССР, МКИ В 01 D 53/18. Теплообменник аппарат / И.Н.Ильин, Д.М.Блумберга, И.К.Вейденберг, В.Д.Кононенко. - Заявл. 27.05.87; №4251607/31-26; Оpubл. 15.12.88. Бюл. № 46.

4.47. Блумберга Д.М., Ильин И.Н. Мокрая очистка газов: Учебное пособие. - Рига. 1987.

4.48. Блумберга Д.М., Наукина М.А., Ильин И.Н. Выбор состава орошающей жидкости в контактных теплообменниках с активной насадкой // Коммерческая и техническая эксплуатация морского транспорта. - Рига, 1988.

4.49. Блумберга Д.М., Крейцберга Д.Р., Ильин И.Н. Улавливание ванадия в орошающей жидкости контактных теплообменников с активной насадкой // Проблемы загрязнения и очистки наружных поверхностей нагрева паровых котлов: Тез. докл. Всесоюз. конф. - Батуми, 1988.



The first part of the book is devoted to a general introduction to the subject of the history of the United States. It covers the period from the discovery of the continent to the beginning of the American Revolution.

The second part of the book is devoted to a detailed account of the American Revolution. It covers the period from the outbreak of hostilities in 1775 to the signing of the Treaty of Paris in 1783.

The third part of the book is devoted to a detailed account of the early years of the United States. It covers the period from the signing of the Constitution in 1787 to the end of the War of 1812.

The fourth part of the book is devoted to a detailed account of the middle years of the United States. It covers the period from the end of the War of 1812 to the beginning of the Civil War in 1861.

The fifth part of the book is devoted to a detailed account of the late years of the United States. It covers the period from the beginning of the Civil War in 1861 to the end of the Reconstruction era in 1877.

The sixth part of the book is devoted to a detailed account of the early years of the 20th century. It covers the period from the end of the Reconstruction era in 1877 to the beginning of World War I in 1914.

The seventh part of the book is devoted to a detailed account of the middle years of the 20th century. It covers the period from the beginning of World War I in 1914 to the end of World War II in 1945.

The eighth part of the book is devoted to a detailed account of the late years of the 20th century. It covers the period from the end of World War II in 1945 to the present day.

The ninth part of the book is devoted to a detailed account of the future of the United States. It covers the period from the present day to the year 2000.

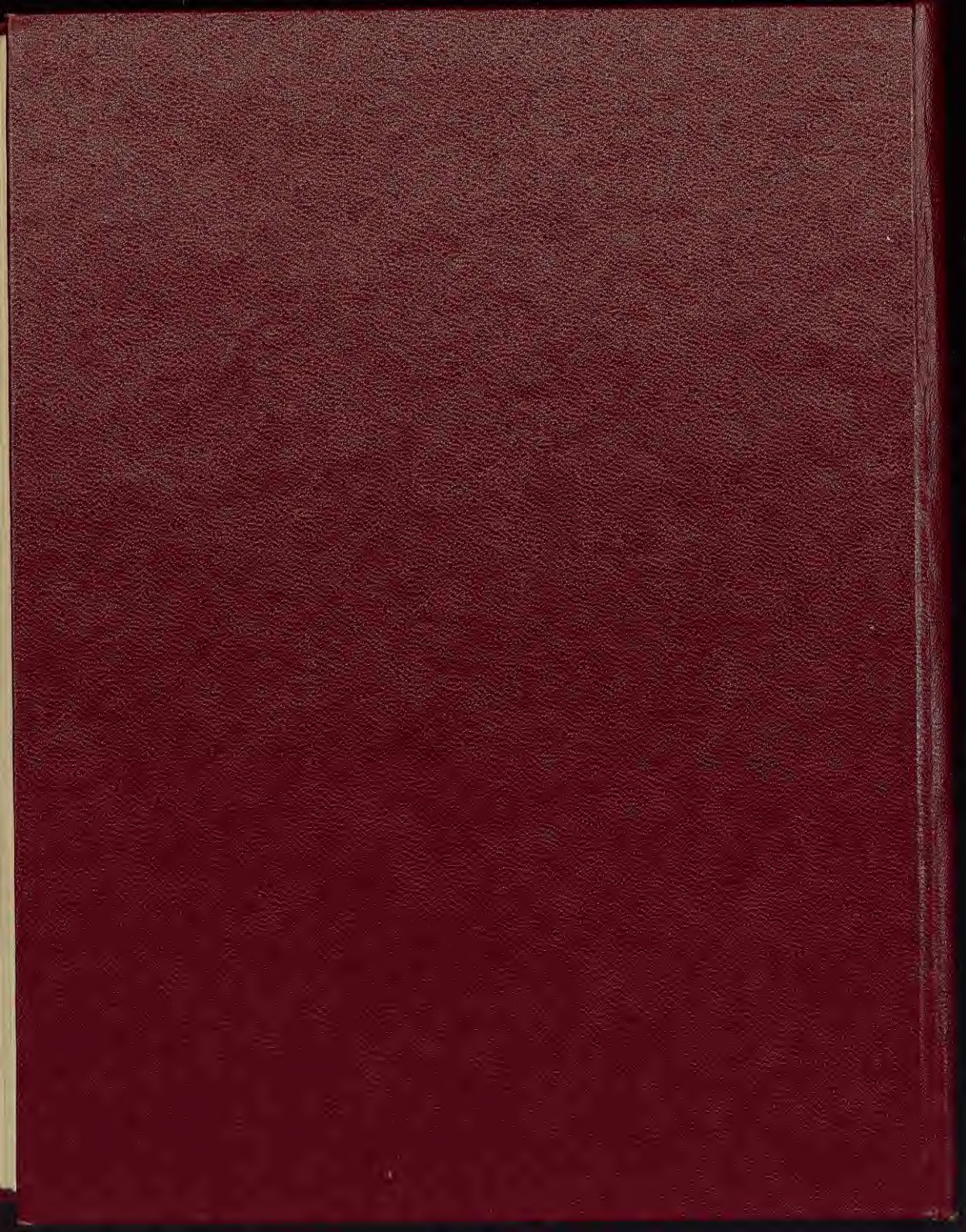
Kontroleksemplārs

2. 8^o

LATVIJAS NACIONĀLA BIBLIOTEKA



0303025894



96-3

323