

2. STUDIU DE CAZ PRIVIND UTILIZAREA TEHNICILOR DE MASURARE IN CADRUL BILANȚULUI ENERGETIC AL CAZANELOR DE APA FIERBINTE PENTRU REALIZAREA SERVICIULUI DE AUDIT TERMOENERGETIC

2.1. METODOLOGIA DE ÎNTOCMIRE A BILANȚULUI TERMIC LA CAZANELE ENERGETICE

Bilanțul respectă recomandările ARCE, Normativul PE 902/86 (reeditat în anul 1995) privind întocmirea și analiza bilanțurilor energetice, în conformitate cu Catalogul reglementărilor și prescripțiilor tehnice valabile în sectorul energetic din anul 2002, recomandat de ANRE.

Bilanțul termic al cazanelor se întocmește luându-se ca referință unitatea de timp (ora sau secunda), sau unitatea de masă sau de volum de combustibil introdusă în instalație. Conturul de bilanț coincide de obicei cu conturul fizic al cazanului, iar temperatura de referință este aleasă arbitrar sau fixată prin norme.

Pentru facilitatea calculelor este de preferat efectuarea bilanțului termic cu referire la unitatea de combustibil.

- Ecuația generală a bilanțului termic este dată de relația conservării energiei:

$$Q_T = Q_u + Q_p \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (1)$$

unde: Q_T - reprezintă cantitatea totală de căldură intrată în cazan (kW; kJ/kg, $(\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}$);

Q_u - căldura utilă, regăsită în produsul energetic util (agent termic încălzitor), (kW; kJ/kg, $(\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}$);

Q_p - căldura totală pierdută sub diferite forme în mediul ambiant (kW; kJ/kg, $(\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}$).

Modelul matematic general de calcul desfășurat, are forma:

$$B(Q_i + \Delta i_c + i_{c0}) + B \cdot W_f (i_f - 2510) + B_{ef} \cdot \alpha'_p [I_{aum}^0(t'_p) - I_{aum}^0(t_0)] + \\ + B_{ef} \cdot \Delta \alpha \cdot I_{aum}^0(t_0) = Q_u + B_{ef} \cdot I_g (\alpha_{ev}, t_{ev}) + B \cdot (Q_m + Q_{ch} + Q_{ex} + Q_{rf}) \quad [\text{kW}]$$

unde: B , B_{ef} - consumul total, respectiv efectiv de combustibil în (kg/s), cu puterea calorică inferioară Q_i ;

$\Delta i_c = c_c (t_c - t_0)$ - variația de entalpie specifică a combustibilului (căldura sensibilă),

(kJ/kg, m^3N); c_c - este căldura specifică a combustibilului utilizat (kJ/kg, $\text{m}^3\text{N} \cdot \text{K}$) și t_c - temperatura combustibilului la intrarea în cazan, în °C.

i_{c0} - entalpia specifică a combustibilului la temperatura mediului ambiant;

$\Delta \alpha$ - creșterea excesului de aer prin infiltrațiile de aer fals pe întreaga instalație; I_{aum} - entalpia teoretică a aerului umed, în (kJ/ m^3N);

I_g - entalpia gazelor de ardere, (kJ/ m^3N);

$Q_m, Q_{ch}, Q_{ex}, Q_{rf}$ - cantitățile de căldură pierdute prin elementele din combustibil nearese mecanic, nearese chimic, pierdute în mediul exterior prin pereții cazanului și respectiv prin radiație prin orificii și neetanșeități, (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb}).

a) Cantitatea totală de căldură Q_T intrată în cazan se determină cu relația:

$$Q_T = Q_c + Q_a + Q_{inj} + Q_L \quad [\text{kW}] \quad (2)$$

unde: Q_c este căldura introdusă cu combustibilul (atât căldura fizică cât și cea chimică) (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_a - căldura sensibilă a agentului termic la intrarea în cazan, în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_{inj} - căldura aburului folosit pentru injectia combustibilului lichid, în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_L - căldura fizică a aerului de ardere intrat în cazan (inclusiv aerul fals), în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

b) Căldura utilă Q_u , ce se identifică cu căldura agentului termic produs de cazan:

$$Q_u = D_{ab} (i_{ab} - i_{al}) \quad [\text{kW; kJ/kg, (m}^3\text{N)}_{\text{comb}}] \quad (3)$$

unde: D_{ab} - este debitul de agent termic produs (kg/s); i_{ab}, i_{al} - reprezintă entalpiile agentului termic la ieșire, respectiv de alimentare, (kJ/kg).

c) Căldura pierdută în exteriorul cazanului are mai multe componente:

$$Q_p = Q_{ga} + Q_{co} + Q_{rc} + Q_p \quad [\text{kW; kJ/kg, (m}^3\text{N)}_{\text{comb}}] \quad (4)$$

unde: Q_{ga} este căldura sensibilă (fizică) a gazelor arse în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_{co} - căldura pierdută prin arderea chimic incompletă, în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_{rc} (sau Q_{ex}) - căldura pierdută în mediul înconjurător prin convecție și radiație, prin pereții cazanului și orificiile de vizitare, în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_p - căldura sensibilă pierdută prin purja continuă sau intermitentă, în (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb}).

În cele ce urmează se prezintă defalcăt componentele mai sus menționate, în scopul explicării modului lor de calcul:

- **Cantitățile de căldură intrate**

a.1) Căldura introdusă cu combustibilul utilizat Q_c :

$$Q_c = Q_{cf} + Q_{ch} \quad [\text{kW; kJ/kg, (m}^3\text{N)}_{\text{comb}}] \quad (5)$$

unde: Q_{cf} - căldura fizică a combustibilului (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb});

Q_{ch} - căldura chimică (kW; kJ/kg, (m³N)_{comb}).

Notând cu B consumul de combustibil, cu Q_i puterea sa calorifică inferioară pe unitatea de masă sau volum, iar cu i_c entalpia unității de combustibil la temperatura de intrare a acestuia în arzător, expresia lui Q_c devine:

$$Q_c = B(Q_i + i_c) \quad [\text{kW; kJ/kg, (m}^3\text{N)}_{\text{comb}}] \quad (6)$$

Pe de altă parte căldura sensibilă (fizică) a combustibilului este:

$$Q_{cf} = B \cdot i_c \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (7)$$

iar cea chimică:

$$Q_{cch} = B \cdot Q_i \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (8)$$

unde:

$$i_c = c_{pm} \cdot t_c \quad [\text{kJ/kg}, \text{m}^3\text{N}] \quad (9)$$

iar, c_{pm} este căldura specifică medie a combustibilului, în $(\text{kJ/kg}, \text{m}^3\text{N} \cdot \text{K})$

a.2) Căldura sensibilă a agentului termic la alimentare, Q_a :

$$Q_a = (D_a + p) \cdot i_a \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (10)$$

unde: D_a - debitul de agent termic, în $[\text{kg/s}]$;

p - debitul de purjă (în cazurile în care există), în $[\text{kg/s}]$;

i_a - entalpia specifică a agentului termic, în $[\text{kJ/kg}, \text{m}^3\text{N}]$.

$$i_a = c_{pa} \cdot t_a \quad [\text{kJ/kg}, \text{m}^3\text{N}] \quad (11)$$

a.3) Cantitatea de căldură introdusă cu aerul de ardere intrat în cazan, Q_L :

$$Q_L = L_t \cdot i_L \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (12)$$

unde: L_t reprezintă cantitatea totală de aer intrată în cazan, iar i_L entalpia sa specifică.

Întrucât, $L_t = \alpha \cdot V_a^0$, unde α este coeficientul de exces de aer, iar V_a^0 este volumul specific de aer teoretic necesar arderii în $\text{m}^3\text{N/kg}_{\text{comb}}$ sau $\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}_{\text{comb}}$ și deoarece conturul de bilanț coincide cu conturul fizic al cazanului, α trebuie măsurat la sfârșitul drumului de gaze de ardere (înainte de intrarea în coș și la ieșirea din cazan) pentru a putea cuprinde și pătrunderile de aer fals.

Coeficientul α se poate determina din triunghiul arderii (Ostwald sau Brünste) folosind analiza gazelor arse prelevate de la ieșirea din cazan, sau utilizând relațiile sale de definiție, iar debitul de aer cu una din ecuațiile :

$$V_a^0 = 0,0889(C + 0,375S) + 0,265H - 0,03330 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}] \quad (13)$$

pentru combustibilii solizi sau lichizi, și:

$$V_a^0 = 0,0476 \left[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad [\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}] \quad (14)$$

pentru combustibilii gazoși.

Notațiile se referă la compoziția volumetrică a combustibilului gazos și la cea gravimetrică a celui solid sau lichid.

Coeficientul de exces de aer se poate determina și analitic cu o relație generală, care ține cont de procente volumetrice ale componentelor gazelor de ardere :

$$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \frac{O_2 - 0,5CO}{100 - (O_2 + RO_2 + CO)}} \quad (15)$$

în care O_2 , $RO_2 = CO_2 + SO_2$, CO reprezintă elementele procentuale volumetrice din analiza gazelor de ardere la finele focarului cazanului.

În cazul unor calcule exacte trebuie să se ia în considerare și umiditatea absolută a aerului. Fie φ (%) umiditatea relativă, iar x (g/kg.a.us.) sau d (kg/kg_{aus}) conținutul de umiditate a aerului, care se calculează din relația:

$$x = 622 \frac{\varphi p_s}{p_b - \varphi p_s} \quad [\text{g/kg.a.us.}] \quad (16)$$

unde p_s este presiunea de saturație a vaporilor de apă la temperatura aerului, în (mmHg), iar p_b este presiunea barometrică, în aceleași unități.

Pentru un calcul rapid și direct se poate aproxima $x = 10$ g/kg.a.us.

În acest caz debitul de aer umed necesar arderii devine :

$$V_{a_{um}}^0 = (1 + 0,00161x)V_a^0 \approx 1,0161V_a^0 \quad [\text{m}^3/\text{kg}] \text{ sau } [\text{m}^3/\text{m}^3\text{N}] \quad (17)$$

Entalpia aerului umed i_L se determină din tabelele de proprietăți ale aerului umed.

- **Cantitatea de căldură utilă, Q_u**

Se calculează cu formula generală:

$$Q_u = D_a \cdot i_{ab} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3/\text{N})_{\text{comb}}] \quad (18)$$

unde i_{ab} este entalpia fluidului termic la ieșirea din cazan (abur, apă fierbinte, etc).

Pentru cazul agenților termici lichizi fierbinți:

$$i_a = c_{pa} \cdot t \quad [\text{kJ/kg}] \quad (19)$$

- **Cantitatea de căldură pierdută în mediul ambiant, Q_p**

c.1) Căldura sensibilă pierdută prin gazele de ardere care părăsesc cazanul la temperatura, t_{ga} .

Această căldură se poate calcula în mai multe moduri:

$$Q_{ga} = 3.72 \cdot 10^{-4} \left[\frac{C + 0,375S^i}{0,536(RO_2 + CO)} + 0,46 \frac{9H^i + W^i + 100y_{inj}}{100} \right] \cdot t_{ga} \cdot B + 0.697 \cdot B \cdot y_{inj} \quad [\text{kW}] \quad (20)$$

valabilă și pentru combustibilii gazoși dacă se transformă compoziția volumetrică a acestora în analiză elementară gravimetrică.

Această pierdere se mai poate calcula și cu ajutorul ecuațiilor arderii incomplete, astfel:

$$Q_{ga} = V_{ga} \cdot i_{ga} = \left(I_{ga}^{\alpha_{ev}, t_{ev}} - I_{ga}^{\alpha_{ev}, t_0} \right) \frac{100 - q_4}{100} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3_{\text{N}})_{\text{comb}}] \quad (21)$$

unde: V_{ga} este volumul de gaze de ardere ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}$); i_{ga} - entalpia acestora ($\text{kJ}/\text{m}^3_{\text{N}}$); q_4 - pierderile procentuale prin nearsele mecanic; I_{ga} - entalpia totală a gazelor de ardere calculată pentru excesul de aer măsurat la evacuarea din cazan, la temperatura de evacuare (indice superior t_{ev} ,) și respectiv la temperatura de referință (indice t_0)

În general debitul volumic de gaze de ardere real se calculează cu relația:

$$V_{ga} = V_{ga}^{usc} + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}] \quad (22)$$

care se particularizează pentru combustibilii solizi/lichizi și respectiv gazoși :

Pentru combustibili solizi/lichizi:

$$\begin{aligned} \frac{1}{B} V_{ga} = & 0,79 \cdot \left[0,0889 \cdot (C^i + 0,375 S^i) + 0,265 H^i - 0,0333 O^i \right] + \\ & + \frac{N^i}{100} 0,8 + \frac{1,866}{100} \cdot (C^i + 0,375 S^i) + (\alpha - 1) V_a^0 + V_{H_2O} \end{aligned} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}] \quad (23)$$

sau:

$$\begin{aligned} V_{ga} = & \left[0,79 \cdot V_a^0 + \frac{N^i}{100} \cdot 0,8 + \frac{1,866}{100} \cdot (C^i + 0,375 \cdot S^i) + \right. \\ & \left. + (\alpha - 1) \cdot V_a^0 + V_{H_2O} \right] \cdot B \end{aligned} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}] \quad (24)$$

deci:

$$\begin{aligned} V_{ga} = & \left[(\alpha - 0,21) \cdot V_a^0 + 0,008 N^i + 0,01866 \cdot (C^i + 0,375 \cdot S^i) + \right. \\ & \left. + V_{H_2O} \right] \cdot B \end{aligned} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}] \quad (25)$$

unde:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} = & 0,111 H^i + 0,0124 W^i + 0,00161 x V_a^0 + 1,24 y_{inj} + \\ & + 0,00161 \cdot x \cdot (\alpha - 1) \cdot V_a^0 \end{aligned} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}] \quad (26)$$

sau:

$$V_{H_2O} = 0,111 \cdot H^i + 0,0124 \cdot W^i + 0,00161 x \alpha V_a^0 + 1,24 y_{inj} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{kg}] \quad (27)$$

Pentru combustibilii gazoși:

$$V_{ga} = V_{ga}^{usc} + V_{H_2O} \quad [\text{m}^3_{\text{N}}/\text{s}] \quad (28)$$

unde:

$$V_{ga}^{usc} = \left[0,79 \cdot V_a^0 + 0,01 \cdot (N_2 + CO_2 + CO + H_2S + \sum m C_m H_n) \right] \cdot B + (\alpha - 1) \cdot V_a^0 \cdot B \quad (29)$$

iar:

$$\begin{aligned} V_{H_2O} &= \left[0,01 \left(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d \right) + 0,00161x\alpha V_a^0 + \right. \\ &\quad \left. + 0,00161x(\alpha - 1)V_a^0 \right] B = \\ &= B \left[0,01 \left(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + 0,124d \right) + 0,00161x\alpha V_a^0 \right] \end{aligned} \quad (30)$$

deci în final:

$$\begin{aligned} V_{ga} &= B \left[(\alpha - 0,21)V_a^0 + 0,01(H_2 + 2H_2S + CO_2 + CO + \sum \left(m + \frac{n}{2} \right) \cdot \right. \\ &\quad \left. \cdot C_m H_n + 0,124d) + (0,00161x\alpha + \alpha - 1)V_a^0 \right] \quad [m^3N/s] \end{aligned} \quad (31)$$

Entalpia gazelor de ardere i_{ga} se calculează în funcție de participațiile volumetrice ale componentelor și entalpiile specifice ale acestora, astfel:

$$i_{ga} = \frac{1}{100} \cdot (RO_2 \cdot i_{RO_2} + CO \cdot i_{CO} + \dots) \quad [kJ/m^3N] \quad (32)$$

unde: entalpia componentelor i_{RO_2} , i_{CO} , etc, (din analiza gazelor de ardere), se determină în funcție de temperatura gazelor de ardere, din tabelele de proprietăți termodinamice.

Tabelul 2.1. Entalpia unui m^3N pentru diverse tipuri gaze în kJ/m^3N .

$t (^{\circ}C)$	O ₂	N ₂	Aer	H ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	CH ₄
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
100	131,73	130,06	130,44	129,31	130,27	171,75	150,61	165,56
200	276,23	261,08	262,42	259,57	261,63	359,74	304,62	353,55
300	407,38	393,74	396,58	390,18	395,41	561,76	462,55	567,62
400	551,71	528,69	533,72	521,16	532,10	775,67	626,23	807,90
500	699,48	666,83	673,53	652,60	672,27	999,20	793,67	1359,6

c.2) Pierdere de căldură prin arderea chimică incompletă, $Q_{ch} = Q_{CO}$:

Această pierdere se determină prin două metode:

a - direct prin relația de definiție, cunoscându-se puterea calorifică a oxidului de carbon:

$$Q_{CO} = 126,23 \cdot CO \frac{C^i}{0,536(CO_2 + CO)} \cdot B \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (33)$$

valabilă și pentru combustibilii gazoși în urma transferării compoziției lor volumetrice în analiză elementară gravimetrică. Participațiile procentuale de CO și CO₂ sunt determinate din analiza gazelor de ardere.

b - indirect, calculând factorii expresiei:

$$Q_{CO} = V_{CO}^{ga} \cdot Q_i^{CO} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (34)$$

unde: V_{CO}^{ga} este volumul de CO din gazele de ardere, deci:

$$V_{CO}^{ga} = \frac{CO}{100} \cdot V_{ga} \quad [\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}_{ga}] \quad (35)$$

iar Q_i^{CO} este puterea calorifică a CO ($3018 \approx 3020 \text{ kcal}/\text{Nm}^3 = 12624 \text{ kJ}/\text{m}^3\text{N}$),

deci:

$$Q_{CO} = 12624 \cdot V_{ga} \cdot \frac{CO}{100} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (36)$$

sau

$$Q_{CO} = 126,24 \cdot CO \cdot V_{ga} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (37)$$

c.3) Pierdere de căldură în mediul ambiant Q_{rc} (sau Q_{ex} ; sau Q_5) se determină fie grafic din analize statistice funcție de tipul și sarcina cazanului, fie în mod direct prin calcule de transfer de căldură.

În primul caz, din nomograme statistice (figurile 2.1 și 2.2) rezultă pierderea procentuală raportată (q_{rc}) :

$$q_{rc} = \frac{Q_{rc}}{Q_T} \cdot 100 \quad [\%] \quad (38)$$

$$Q_{rc} = q_{rc} \cdot Q_T \cdot \frac{1}{100} \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (39)$$

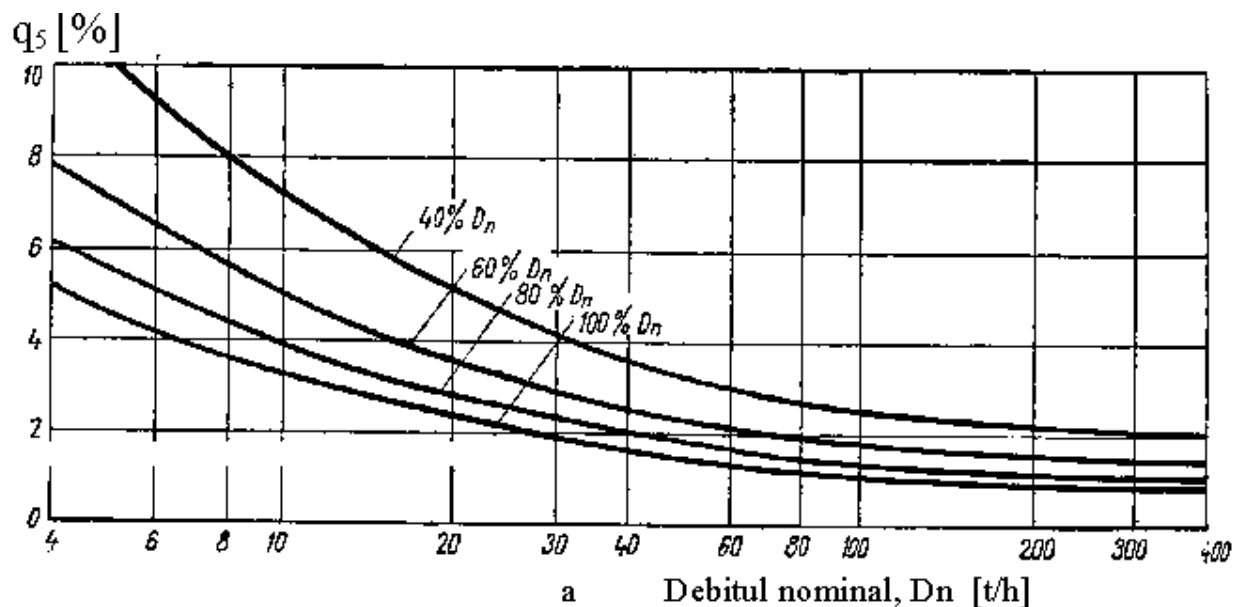


Figura 1.1. Diagrama statistică pentru pierderile procentuale de căldură în mediul ambiant (recomandări germane pentru cazane de debite mici)

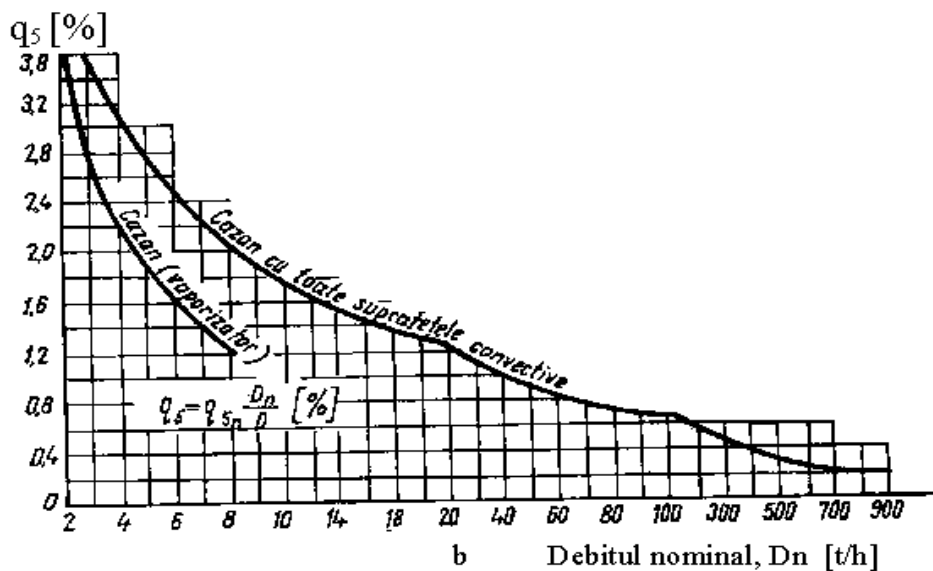


Figura 1.2. Diagrama statistică pentru pierderile procentuale de căldură în mediul ambiant (recomandări din literatura rusă pentru cazane)

În al doilea caz, Q_{rc} se determină prin însumarea pierderilor de căldură proprii fiecărui element din suprafața exterioară a cazanului care schimbă căldură cu mediul înconjurător și de aceea metoda este mai laborioasă și mai dificil de aplicat. Astfel relația de calcul este :

$$Q_{rc} = \sum \alpha_i \cdot S_i \cdot (t_i - t_0) \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (40)$$

unde : S_i este suprafața elementului de construcție "i", în m^2 ;

α_i - coeficientul de transfer de căldură prin radiație și convecție de la elementul de construcție "i" la mediul înconjurător, în $\text{kW/m}^2\text{°C}$;

t_i - temperatura elementului de construcție "i", în $^{\circ}\text{C}$;

t_0 - temperatura mediului ambiant, în $^{\circ}\text{C}$.

Coeficientul de transfer de căldură adoptat de normele metodologice în vigoare se calculează cu relația:

$$\alpha_i = 1,16 \cdot 10^{-3} \left\{ m^4 \sqrt{t_i - t_0} + \frac{c}{t_i - t_0} \left[\left(\frac{t_i + 273,15}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_0 + 273,15}{100} \right)^4 \right] \right\} [\text{kW}/(\text{m}^2\text{K})] \quad (41)$$

în care, în afara mărimilor definite anterior s-au mai notat:

m - coeficient ce depinde de orientarea suprafeței (pentru perete vertical $m = 2,55$; pentru perete orizontal cu suprafața exterioară dirijată în sus $m = 3,25$ și pentru perete orizontal cu suprafața exterioară dirijată în jos $m = 1,625$);

c - coeficient de radiație al suprafeței (pentru tablă neagră, $c = 4,0$).

Randamentul termic brut al cazanului se determină prin metoda directă din relația:

$$\eta_{tb} = \frac{Q_u - Q_a}{Q_T - Q_a} \cdot 100 \quad [\%] \quad (42)$$

sau:

$$\eta_{tb} = \frac{Q_u - Q_a}{Q_c + Q_{inj} + Q_L} \cdot 100 \quad [\%] \quad (43)$$

Închiderea bilanțului termic se face pe baza ecuației generale:

$$Q_T = Q_u + Q_p \quad [\text{kW}; \text{kJ/kg}, (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}}] \quad (44)$$

cu o eroare dependentă și de eroarea aparatelor de măsură utilizate .

2.2. ÎNTOCMIREA BILANȚULUI TERMIC REAL

A) PRIN METODA INDIRECTĂ

Deși se recomandă ca întocmirea bilanțului termic real pe cale indirectă să se facă în condițiile cumulative, respectiv:

- randament termic brut mai mare de 75%;
- debitul nominal al cazanului mai mare de 10 t/h,

metoda indirectă permite o determinare rapidă a randamentului cazanului, aducând totodată o serie de facilități privind calculul și măsurătorile, fiind folosită și în cazul determinării bilanțului optim.

La cazanele de capacități medii și mici, caracterizate prin inexistența preîncălzirii aerului în exteriorul cazanului și prin posibilitățile restrânse de determinare simultană și de precizie a consumului de combustibil și al debitului de agent termic produs, metoda indirectă ușurează mult numărul măsurătorilor.

Randamentul termic brut al cazanului se determină, în acest caz din relația:

$$\eta_{tb} = 100 - (q_{ev} + q_{ch} + q_m + q_{ex} + q_{rf}) \quad [\%] \quad (45)$$

unde: $q_{ga} = q_{ev}$ - pierdere specifică procentuală datorată căldurii fizice a gazelor de ardere evacuate la coș, și care se determină din formula:

$$q_{ev} = \left\{ \left[32 \frac{C^i}{0,536(RO_2 + CO)} + 0,46(9H^i + W^i) \right] t_{ga} - 100L_1i_L \right\} \frac{1}{Q_d} \quad [\%] \quad (46)$$

În afara notațiilor obișnuite:

$$Q_d = Q_i + i_c + (i_{inj} - 600) \cdot y \quad [\text{kW}; \text{kJ}/(\text{kg sau } (\text{m}^3\text{N})_{\text{comb}})] \quad (47)$$

$$L_1 = \alpha \cdot V_a^0 \quad \text{este debitul de aer} \quad (48)$$

unde: y - cota de apă (abur) de injecție, în kg/s; q_{ch} - pierdere specifică procentuală datorită existenței în gazele de ardere evacuate a unor componente combustibile nearse (în special oxidul de carbon):

$$q_{ch} = \frac{12624 \cdot CO \cdot C}{0,536(RO_2 + CO) \cdot Q_d} \quad [\%] \quad (49)$$

q_m - pierdere specifică procentuală de căldură prin nearse mecanic :

$$q_m = 100 \cdot Q_m / Q_i \quad [\%] \quad (50)$$

unde:

$$Q_m = 327 \cdot A^i \cdot \left(\frac{a_{cz} G_{cz}}{100 - G_{cz}} + \frac{a_{ant} G_{ant}}{100 - G_{ant}} \right) \quad [\text{kJ/kg}] \quad (51)$$

A^i - conținutul procentual de cenușă din combustibil; a_{cz} , a_{ant} - fracțiile de cenușă din materialul rezultat în focar și respectiv antrenat de gazele de ardere; G_{cz} , G_{ant} - procente de substanță combustibilă în materialul căzut și antrenat.

$q_{ex} = q_{rc}$ - pierderea specifică procentuală datorată radiației și convecției către mediul ambiant exterior.

$q_{zg} = q_{rf}$ - pierderea specifică de căldură procentuală pierdută cu zgura fierbinte (reziduuri focar):

$$q_{rf} = A^i c_{zg} t_{zg} / Q_i \quad [\%] \quad (52)$$

Utilizând formula randamentului termic brut se poate determina și cantitatea de combustibil consumată orar de cazan :

$$B = 3600 \cdot \frac{Q_u - Q_a}{\eta_{tb} \cdot [Q_i + i_c + y \cdot (i_{inj} - 600)]} \cdot 100 \quad [\text{kg/h}] \quad (53)$$

În acest caz, pentru funcționarea pe gaz natural s-au luat în considerare relațiile din tabelul 2.2 pentru întocmirea bilanțului cazanului. Relațiile pentru funcționarea pe CLU sunt similare și au fost prezentate anterior.

Tabelul 2.2. Sinteza relațiilor utilizate la întocmirea bilanțului energetic la cazanele pe gaze

Nr. crt.	Mărimea calculată	Formula de calcul
1	Volumul teoretic necesar de oxigen, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_{O,\min} = 0,01 \cdot \left[0,5 \cdot CO^c + 0,5 \cdot H_2^c + 1,5 \cdot H_2S^c + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n^c - O_2^c \right]$
2	Volumul gazelor de ardere uscate, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_{gu} = \frac{CO_2^c + CO^c + \sum m C_m H_n^c}{CO_2 + CO + \sum m C_m H_n}$
3	Volumul de aer uscat, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_a = (N_2 \cdot V_{gu} - N_2^c) / 79$
4	Volumul de aer umed, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_{a,um} = (1 + 0,00161 \cdot x) \cdot V_a$
5	Volumul vaporilor de apă, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_{H_2O} = 0,01 \cdot \left(H_2^c + H_2S^c + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n^c + 0,1242 \cdot d \right) - 0,01 \cdot \left(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} \cdot C_m H_n \right) \cdot V_{gu} + 0,00161 \cdot x \cdot V_a$
6	Volumul gazelor de ardere umede, ($\text{m}^3_{\text{N}}/\text{m}^3_{\text{N}}$)	$V_g = V_{gu} + V_{H_2O}$
7	Coeficientul de exces de aer	$\alpha = \frac{21}{21 - 79 \cdot \frac{O_2 - \left[0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5 \cdot H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n \right]}{N_2 - \frac{N_2^c}{V_{gu}}}}$
8	Ecuatia generală a arderii (în formă simplificată)	$(1 + \beta) \cdot CO_2 + (0,605 + \beta) \cdot CO + O_2 = 21\%$

9	Caracteristica combustibilului	$\beta = \frac{0,79 \cdot (100 \cdot V_{O, \min} - CO_2^c - CO^c - \sum m \cdot C_m H_n^c)}{CO_2^c + CO^c + \sum m \cdot C_m H_n^c} +$ $+ \frac{0,21 \cdot (N_2^c + SO_2^c + H_2 S^c)}{CO_2^c + CO^c + \sum m \cdot C_m H_n^c}$
10	Pierderea de căldură cu gazele evacuate, %	$q_{ev} = 0,01 \cdot (1 - 0,01 \cdot q_m) \cdot (\alpha \cdot K + C) \left[t_{ev} - \frac{t_0 \cdot \alpha}{\alpha + b} \right]$ <p>Pentru gaze naturale: $K = 3,53$; $C = 0,60$; $b = 0,18$; Pentru gaze naturale pierderile de căldură prin ardere incompletă mecanic, $q_m = 0$.</p>
11	Pierderile de căldură prin ardere incompletă chimic, %	$q_{ch} = 0,026 \cdot (\alpha - 1) \cdot Q_{inc};$ $Q_{inc} = 126,4 \cdot CO + 108 \cdot H_2 + 358 \cdot CH_4, \text{ în kJ/m}^3_N$
12	Pierderile de căldură în exterior (prin radiație și convecție), %	$q_{ex} = \frac{\sum_i \alpha_i \cdot S_i \cdot (t_i - t_0)}{B \cdot Q_i} \cdot 100$
13	Randamentul cazanului, %	$\eta = 100 - q_{ev} - q_{ch} - q_{rc}$
14	Consumul de combustibil, m ³ _N /h	$B = \frac{Q_u}{\frac{\eta}{100} \cdot (Q_i + i_c) \cdot 3600}$

*) Indicele superior c sau i se referă la compoziția corespunzătoare stării inițiale a combustibilului

B) PRIN METODA DIRECTĂ

În cazul determinării bilanțului termic prin metoda directă, se măsoară atât energiile sau puterile termice și electrice intrate în conturul de bilanț, cât și efectul util al agentului termic produs de cazan.

Astfel ecuația de bilanț pune în evidență randamentul termic cât și pierderile globale de energie, fără însă aleale detalia pe componente specifice.

Ecuația de bilanț este dată de relația:

$$Q_{\text{int rat}} = Q_{\text{util}} + Q_{\text{pierderi}} \quad (54)$$

sau explicitat :

$$B \cdot H_i^i + W_{el} = D_{apa} \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{tur} - t_{retur}) + Q_{\text{pierderi}} \quad (55)$$

unde fata de cele prezentate în paragrafele anterioare s-a notat:

W_{el} – energia (sau după caz puterea) electrică consumată de serviciile proprii ale cazanului din zona de contur considerată;

\bar{c}_p – căldura specifică medie a apei calde;

t_{tur} , t_{retur} – temperaturile de tur respectiv retur ale cazanului de apă.

Cu aceste elemente se determină randamentul cazanului pe cale directă cu relația:

$$\eta_{\text{direct}} = \frac{Q_{\text{util}}}{Q_{\text{int rat}}} \cdot 100 = \frac{D_{apa} \cdot \bar{c}_p \cdot (t_{tur} - t_{retur})}{B \cdot H_i^i + W_{el}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (56)$$

2.3. CALCULUL ERORILOR LA DETERMINAREA RANDAMENTULUI

La calculul randamentului cazanului pot apare erori determinate în general de metodele de măsurare ale parametrilor, de clasa de precizie a aparatelor, de simultaneitatea măsurărilor, de gradul de variație în timp a sarcinii cazanului precum și de alți factori obiectivi sau subiectivi. Legătura dintre valoarea absolută $\Delta\eta$ și eroarea relativă $\delta\eta$ care apare la determinarea randamentului este dată de relația:

$$\Delta\eta = \eta \cdot \delta\eta \quad (57)$$

În cazul determinării randamentului pe cale indirectă, eroarea relativă se calculează cu relația:

$$\begin{aligned} \delta\eta &= \delta \sum_{i=2}^6 q_i = \\ &= \sqrt{\left(\frac{\Delta q_2}{q_2} \cdot \frac{q_2}{\sum q_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_3}{q_3} \cdot \frac{q_3}{\sum q_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_4}{q_4} \cdot \frac{q_4}{\sum q_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_5}{q_5} \cdot \frac{q_5}{\sum q_i}\right)^2 + \left(\frac{\Delta q_6}{q_6} \cdot \frac{q_6}{\sum q_i}\right)^2} \end{aligned} \quad (55)$$

unde s-a notat cu: $q_2 = q_{ga}$; $q_3 = q_{ch}$; $q_4 = q_{mec}$; $q_5 = q_{rc}$; $q_6 = q_{zg}$.

În cazul nostru, eroarea relativă $\delta\eta$ este de circa 3-4 ori mai mică decât $\delta \sum_{i=2}^6 q_i$ și se încadrează de obicei în intervalul $\delta\eta = \pm 1,3 \dots 1,9 \%$.

2.4. CONSUMUL SPECIFIC DE COMBUSTIBIL

Consumul specific de combustibil b , reprezintă consumul de combustibil raportat la unitatea de masă de agent termic produsă sau la unitatea de energie utilă:

$$b = \frac{B}{D_{nom}} \quad [\text{kg}_{\text{comb}}/\text{kg}_{\text{abur}}]; \quad b = \frac{B}{Q_u} \quad [\text{kg}_{\text{comb}}/\text{kJ}, \text{kWh}] \quad (58)$$

Pentru comparația unor centrale sau instalații care utilizează combustibili diferiți, sau pentru același cazan ce arde mai mulți combustibili se folosește raportarea la un combustibil echivalent (combustibilul convențional - cc - care are puterea calorică inferioară de $Q_{cc} = 7000 \text{ kcal/kg}$, sau echivalentul petrol - ep - cu puterea calorică de $Q_{ep} = 10000 \text{ kcal/kg}$).

Relațiile (56) devin:

$$b_{cc} = \frac{B_{cc}}{D_{nom}} \quad [\text{kg}_{cc}/\text{kg}_{\text{abur}}]; \quad b_{cc} = \frac{B_{cc}}{Q_u} \quad [\text{kg}_{cc}/\text{kJ}, \text{kWh}] \quad (59)$$

$$b_{ep} = \frac{B_{ep}}{D_{nom}} \quad [\text{kg}_{ep}/\text{kg}_{\text{abur}}]; \quad b_{ep} = \frac{B_{ep}}{Q_u} \quad [\text{kg}_{ep}/\text{kJ}, \text{kWh}] \quad (60)$$

2.5. EVALUAREA IMPACTULUI ASUPRA MEDIULUI

Principalele emisii de poluanți evacuate la coșurile de fum ale cazanelor de abur și apă caldă sunt *emisiile de SO₂ și NO_x* (cu efecte sinergice la scară regională), *emisiile de pulberi – cenușă zburătoare* (cu efecte la scară locală) și *emisiile de CO₂* (cu efecte la scară globală). În cazul nostru, conform măsurărilor realizate, ponderea importantă este dată de emisiile de CO₂.

Metodologia aplicată se bazează pe utilizarea factorilor de emisie. Celelalte emisii sunt nesemnificative în acest caz, motiv pentru care nu au fost tratate în acest studiu. Cantitatea de poluant evacuat în atmosferă se determină cu relații de forma:

$$E = B \cdot Q_i \cdot \varepsilon, \quad (61)$$

unde:

- E cantitatea de poluant evacuat în atmosferă, într-o perioadă de timp, în [kg];
- B cantitatea de combustibil consumată în perioada respectivă, în [kg];
- Q_i puterea calorică inferioară a combustibilului, în [kJ/kg];
- ε factorul de emisie, în [kg/kJ].

Factorul de emisie reprezintă cantitatea de poluant evacuat în atmosferă, raportată la unitatea de căldură introdusă cu combustibilul în cazan.

În cazul utilizării mai multor tipuri de combustibil, cantitatea de poluant se determină prin însumarea cantităților calculate pentru fiecare dintre aceștia.

Factorii de emisie pentru CO₂ sunt cei adoptați în prezent în țările Comunității Economice Europene și sunt prezentați în tabelul următor:

Combustibil	ε_{CO_2} [g/GJ]
Cărbune	98 000
Păcură	72 000
Gaze naturale	50 000

Observație:

Valorile din tabelul anterior pot fi folosite în calculele de prognoză. Pentru calcule mai exacte se utilizează formula următoare:

$$\varepsilon_{CO_2} = \frac{\frac{m_{CO_2}}{m_C} \cdot x \cdot \frac{C}{100}}{Q_i}, \quad (62)$$

- unde:
- ε_{CO_2} factorul de emisie pentru CO₂ la sarcina x (%), în [kg/kJ];
 - m_{CO_2} masa moleculară pentru CO₂, $m_{CO_2} = 44$ kg/kmol;
 - m_C masa moleculară a carbonului, $m_C = 12$ kg/kmol;
 - C conținutul de carbon al combustibilului, în procente de masă [%].

Factorii de emisie pentru NO_x sunt prezentați în tabelul următor:

Combustibilul	ε_{NOx}		
	Puterea termică a cazanului [MW_t]		
	<100	100 - 300	>300
	g/GJ	g/GJ	g/GJ
Lignit	200	220	260
Huică	380	420	450
Păcură	190	210	280
Gaze naturale	130	150	170

Observație:

Valorile prezentate în tabelul anterior corespund pentru o sarcină a cazanului de 100%. În cazul funcționării cazanului la sarcini parțiale se utilizează următoarea relație de corecție:

$$\varepsilon_x^{NO_x} = \varepsilon_{100}^{NO_x} \cdot \left[a + (1 - a) \cdot \frac{L - 50}{50} \right] \quad (63)$$

unde:

- $\varepsilon_x^{NO_x}$ factorul de emisie la sarcina x %
- $\varepsilon_{100}^{NO_x}$ factorul de emisie la sarcina de 100%
- L sarcina cazanului, cuprinsă între 50% și 100%
- a coeficient în funcție de tipul combustibilului, având următoarele valori:
 - Cărbune pulverizat: 0,85
 - Păcură: 0,75
 - Gaze naturale: 0,5

Concentrația poluantului în gazele evacuate se calculează pein ecuația:

$$c = \frac{E_h \cdot 10^6}{D_g}, \quad (64)$$

unde:

- c concentrația poluantului în gazele evacuate, în [mg/m³N];
- E_h cantitatea de poluant evacuată în atmosferă, în [kg/h];
- D_g debitul de gaze de ardere evacuate, rezultat din calculul arderii, în [m³N/h].

Valoarea lui c astfel obținută se compară cu valoarea de referință precizată în Ordinul Ministerului Apelor, Pădurilor și Protecției Mediului nr. 462/01.07.1993 pentru aprobarea Condițiilor tehnice privind protecția atmosferică și Normelor metodologice

privind determinarea emisiilor de poluanți atmosferici produși de surse staționare –
Anexa 2 Norme de limitare a emisiilor de poluanți pentru instalațiile de ardere.



VEDERE DE ANSAMBLU A CAZANELOR DE APA FIERBINTE CET - UPB

BILANȚUL TERMOENERGETIC AL CAZANULUI DE APA FIERBINTE

2.6. MĂSURĂTORI EFECTUATE

În vederea întocmirii bilanțurilor termice s-au realizat o serie de măsurători privind parametrii termodinamici, termofizici și analiza gazelor de ardere. De asemenea, s-au utilizat tabele de proprietăți pentru mărimile la care face referire metodologia de bilanț prezentată în paragrafele anterioare. Principalele elemente măsurate și aparate utilizate sunt prezentate în tabelul 2.1.

Tabelul 2.1. Mărimi măsurate și aparate utilizate

Nr. crt	MARIMEA	UM	APARAT UTILIZAT	OBSERVAȚII
1	Debit de apă alimentare	m ³ /h	Debitmetru ultrasonic ULTRAFLUX	
2	Temperatură abur	°C	Termometru cu infraroșu și spot laser TESTO 860 T2	
3	Presiune abur saturat	bar	Manometru cu element elastic (local); traductor de presiune	Dotare cazan
4	Temperatură apă de alimentare	°C	Termorezistență Pt 100, Termometru cu infraroșu și spot laser TESTO 860 T2	
5	CO ₂ din gazele de ardere	%	Analizoare de gaze TESTO 33 și 350XL	
6	CO din gazele de ardere	%		
7	O ₂ din gazele de ardere	%		
8	NO din gazele de ardere	%		
9	NO _x din gazele de ardere	%		
10	Coeficient de exces de aer α	-		
11	Temperatură gaze arse	°C		
12	Temperatură mediu ambiant	°C	Termometru digital cu termorezistență Testo 825 T4	
13	Temperaturi suprafețe exterioare	°C	Termometru cu infraroșu și spot laser TESTO 860 T2, termorezistență de contact	
15	Umiditate atmosferică φ	%	Psihometru (TESTO) cu fir incandescent	

Pentru fiecare serie de masuratori s-au calculat valorile medii ale parametrilor, care sunt prezentate centralizat în tabelele 2.2 și 2.3.

Tabelul 2.2. Valorile determinate pentru debitul de apă de alimentare

Combustibil: gaz natural		
Sarcina cazanului	Debit apă (m³/h)	Debit combustibil (m³_s/h)
minimă (54,7%)	460	666,1
medie (77,5%)	460	933,6
maximă 1 (91,1%)	460	1114,4
maximă 2 (99,7%)	458	1259,1

Valorile medii măsurate (pe baza analizelor efectuate) pentru compoziția gazelor de ardere evacuate sunt prezentate în tabelul 2.3.

Tabelul 2.3. Măsurători pe gazele de ardere evacuate din cazan

Mărimea	Notația (U.M.)	Minimă	Medie	Maximă
Compoziția gazelor	CO ₂ (%)	10,3	9,6	9,9
	CO (%)	0,0059	0,0057	0,0082
	O ₂ (%)	2,8	4,1	3,6
	SO ₂ (%)	0	0	0
	NO (%)	0,0061	0,0055	0,0058
	NO ₂ (%)	0	0	0
	N ₂ (%)	86,888	86,2888	86,486
Excesul de aer	α	1,16	1,24	1,21
Temperatura gazelor	t_{ev} (°C)	78,65	92,88	101,75
Temperatura ambiantă	t_0 (°C)	20,9	20,9	20,9
Temperatura combustibilului	t_{cb} (°C)	2	2	2

Pe baza metodologiei prezentate în paragrafele anterioare, a măsurătorilor efectuate precum și a datelor culese din instalație la fața locului, s-au efectuat calculele de bilanț termic real pentru cele două regimuri de lucru. Principalele elemente de calcul sunt prezentate în continuare. Bilanturile termoenergetice s-au efectuat în trei regimuri de funcționare, min, med, maxim, conform normelor metodologice în vigoare.

BILANȚURILE TERMOENERGETICE EFECTUATE

2.7. BILANȚUL LA SARCINĂ MINIMĂ

Arderea completa combustibil gazos

Date de intrare

CH ₄ ^c (%)	96,026
C ₂ H ₆ ^c (%)	1,58
C ₃ H ₈ ^c (%)	0,213
C ₄ H ₁₀ ^c (%)	0,021
C ₅ H ₁₂ ^c (%)	0,015
C ₆ H ₁₄ ^c (%)	0,007
CO ^c (%)	0
CO ₂ ^c (%)	0,153
H ₂ ^c (%)	0
N ₂ ^c (%)	1,976
O ₂ ^c (%)	0,009
Suma	100
d (g/m ³ _N)	12
x (g/kg)	10

Masuratori

CO ₂ (%)	10,3
CO (%)	0,0059
O ₂ (%)	2,8
SO ₂ (%)	0
NO (%)	0,0061
NO ₂ (%)	0
N ₂ (%)	86,888
α	1,16
t _{ev} (°C)	78,7
t ₀ (°C)	20,9
t _{cb} (°C)	2
i _{cb} (kJ/m ³ _N)	3,09
CO _{2max}	11,88

D _{apa}	455,27	t/h
	460,00	m ³ /h
t _{tur}	52	°C
t _{retur}	40	°C
i _{tur}	217,43	kJ/kg
i _{ret}	167,13	kJ/kg
Q _u	6360,36	kW
	5,47	Gcal/h
Sarcina	54,7	%
p _{tur}	9	bar
p _{retur}	12	bar
B	666,1	m ³ _s /h
P _{el}	190	kW

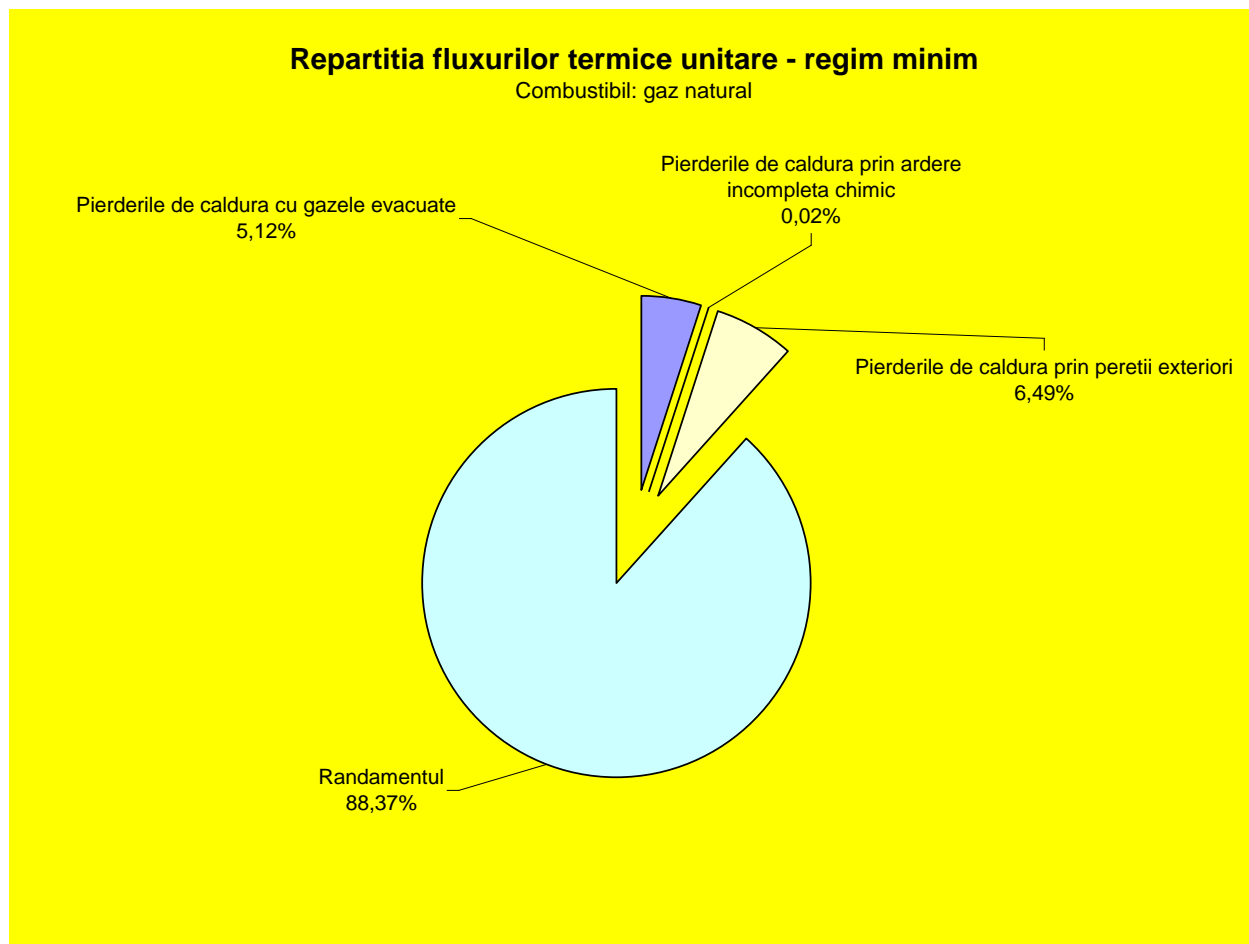
Constante combustibil

Q _i (kJ/m ³ _N)	35747,46
K	3,53
C	0,6
b	0,18

Elemente de calcul		
Volumul teoretic de aer uscat necesar arderii combustibilului		
V ⁰ _a	9,14	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real de aer (umed)		
V _a	10,78	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de azot din gazele de ardere		
V ⁰ _{N2}	7,24	m ³ _N /m ³ _N
Volumul gazelor de ardere triatomice uscate		
V ⁰ _{RO2}	0,96	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al gazelor de ardere uscate (anhidre)		
V ⁰ _{gu}	8,21	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H2O}	2,08	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de gaze de ardere umede		
V ⁰ _g	10,29	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al gazelor de ardere uscate		

V_{gu}^0	9,67	m^3_N/m^3_N			
Volumul real al vaporilor de apa din gazele de ardere					
$V_{H_2O}^0$	2,11	m^3_N/m^3_N			
Volumul real al gazelor de ardere (arderea cu exces de aer)					
V_g^0	11,78	m^3_N/m^3_N			
Calculul arderii reale					
Volumul gazelor de ardere uscate rezultate efectiv din arderea reala					
V_{gu}	9,33	m^3_N/m^3_N	V_{RO_2}	0,96179	m^3_N/m^3_N
Volumele de aer uscat si umed efectiv introduse in instalatie					
V_a	10,24	m^3_N/m^3_N			
$V_{a,um}$	10,40	m^3_N/m^3_N			
Volumul vaporilor de apa din gazele de ardere					
V_{H_2O}	2,10	m^3_N/m^3_N			
Volumul de gaze de ardere umede rezultate din arderea reala a combustibilului					
V_g	11,43	m^3_N/m^3_N			
Coeficientul de exces in aer din gazele de ardere (calculat)					
α	1,14				
Volumul strict necesar de oxigen					
V_{0min}	1,92043	m^3_N/m^3_N			
Caracteristica combustibilului					
β	0,79				
Calculul randamentului cazanului si a consumului de combustibil					
Pierdere de caldura cu gazele evacuate					
q_{ev}	5,12	%			
Pierdera de caldura prin ardere incompleta chimic					
q_{ch}	0,02	%			
Pieredrea de caldura in exterior					
q_{ex}	6,49	%			
Randamentul cazanului					
η_{direct}	88,74	%			
$\eta_{indirect}$	88,37	%			
Consumul de combustibil					
B	536,35	kg/h			
	721,88	m^3_N/h			
	684,30	m^3_s/h			
Eroarea pentru debitul de combustibil					
ε	2,73	%			
Consumul specific de combustibil					
b	1,586	m^3_N/t apa			
Consumul specific de caldura					
q	56,91	MJ/t apa			
Analiza emisii					
Puterea calorifica inferioara a gazului natural					
Q_i	48112	kJ/kg			
Continul de carbon din combustibil					
C	72,06	%			
Factorul de emisie pentru CO ₂					

ε_{CO_2}	30035	g/GJ	
Cantitatea de CO ₂ evacuată în atmosferă			
E_h	775,0	kg/h	
Concentrația de CO ₂ în gazele evacuate			
c	93,91	g/m ³ _N	
Factorul de emisie pentru NO			
ε_{NO}	71	g/GJ	
Cantitatea de NO evacuată în atmosferă			
$E_{h,NO}$	1,83	kg/h	
Concentrația de NO în gazele evacuate			
C_{NO}	222,3	mg/m ³ _N	(valoarea limită 350 mg/m ³ _N)
Concentrația de CO în gazele evacuate			
C_{CO}	84,32	mg/m ³ _N	(valoarea limită 100 mg/m ³ _N)



2.8. BILANȚUL LA SARCINĂ MEDIE

Arderea completa combustibil gazos

Date de intrare

CH ₄ ^c (%)	96,026
C ₂ H ₆ ^c (%)	1,58
C ₃ H ₈ ^c (%)	0,213
C ₄ H ₁₀ ^c (%)	0,021
C ₅ H ₁₂ ^c (%)	0,015
C ₆ H ₁₄ ^c (%)	0,007
CO ^c (%)	0
CO ₂ ^c (%)	0,153
H ₂ ^c (%)	0
N ₂ ^c (%)	1,976
O ₂ ^c (%)	0,009
Suma	100
d (g/m ³ _N)	12
x (g/kg)	10

Masuratori

CO ₂ (%)	9,6
CO (%)	0,0057
O ₂ (%)	4,1
SO ₂ (%)	0
NO (%)	0,0055
NO ₂ (%)	0
N ₂ (%)	86,2888
α	1,24
t _{ev} (°C)	92,9
t ₀ (°C)	20,9
t _{cb} (°C)	2
i _{cb} (kJ/m ³ _N)	3,09
CO _{2max}	11,93

D _{apa}	454,58	t/h
	460,00	m ³ /h
t _{tur}	58	°C
t _{retur}	41	°C
i _{tur}	242,66	kJ/kg
i _{ret}	171,32	kJ/kg
Q _u	9008,72	kW
	7,75	Gcal/h
Sarcina	77,5	%
p _{tur}	9	bar
p _{retur}	12	bar
B	933,6	m ³ _s /h
P _{el}	190	kW

Constante combustibil

Q _i (kJ/m ³ _N)	35747,46
K	3,53
C	0,6
b	0,18

Elemente de calcul		
Volumul teoretic de aer uscat necesar arderii combustibilului		
V ⁰ _a	9,14	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real de aer (umed)		
V _a	11,52	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de azot din gazele de ardere		
V ⁰ _{N₂}	7,24	m ³ _N /m ³ _N
Volumul gazelor de ardere triatomice uscate		
V ⁰ _{RO₂}	0,96	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al gazelor de ardere uscate (anhidre)		
V ⁰ _{gu}	8,21	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H₂O}	2,08	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de gaze de ardere umede		
V ⁰ _g	10,29	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al gazelor de ardere uscate		
V ⁰ _{gu}	10,40	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H₂O}	2,12	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al gazelor de ardere (arderea cu exces de aer)		

V_g^0	12,52	m^3_N/m^3_N			
Calculul arderii reale					
Volumul gazelor de ardere uscate rezultate efectiv din arderea reala					
V_{gu}	10,01	m^3_N/m^3_N	V_{RO2}	0,96179	m^3_N/m^3_N
Volumele de aer uscat si umed efectiv introduse in instalatie					
V_a	10,91	m^3_N/m^3_N			
$V_{a,um}$	11,09	m^3_N/m^3_N			
Volumul vaporilor de apa din gazele de ardere					
V_{H_2O}	2,11	m^3_N/m^3_N			
Volumul de gaze de ardere umede rezultate din arderea reala a combustibilului					
V_g	12,12	m^3_N/m^3_N			
Coeficientul de exces in aer din gazele de ardere (calculat)					
α	1,22				
Volumul strict necesar de oxigen					
V_{Omin}	1,92043	m^3_N/m^3_N			
Caracteristica combustibilului					
β	0,79				
Calculul randamentului cazanului si a consumului de combustibil					
Pierdere de caldura cu gazele evacuate					
q_{ev}	4,83	%			
Pierdere de caldura prin ardere incompleta chimic					
q_{ch}	0,02	%			
Pierdere de caldura in exterior					
q_{ex}	5,04	%			
Randamentul cazanului					
η_{direct}	90,36	%			
$\eta_{indirect}$	90,11	%			
Consumul de combustibil					
B	746,02	kg/h			
	1004,06	m^3_N/h			
	951,79	m^3_s/h			
Eroarea pentru debitul de combustibil					
ε	1,95	%			
Consumul specific de combustibil					
b	2,209	m^3_N/t apa			
Consumul specific de caldura					
q	78,24	MJ/t apa			
Analiza emisii					
Puterea calorifica inferioara a gazului natural					
Q_i	48112	kJ/kg			
Continutul de carbon din combustibil					
C	72,06	%			
Factorul de emisie pentru CO ₂					
ε_{CO_2}	42541	g/GJ			
Cantitatea de CO ₂ evacuata in atmosfera					
E_h	1526,9	kg/h			
Concentratia de CO ₂ în gazele evacuate					

c	125,43	g/m ³ _N	
Factorul de emisie pentru NO			
ε _{NO}	101	g/GJ	
Cantitatea de NO evacuata in atmosfera			
E _{h,NO}	3,58	kg/h	
Concentratia de NO în gazele evacuate			
C _{NO}	293,9	mg/m ³ _N	(valoarea limita 350 mg/m ³ _N)
Concentratia de CO în gazele evacuate			
C _{CO}	86,38	mg/m ³ _N	(valoarea limita 100 mg/m ³ _N)

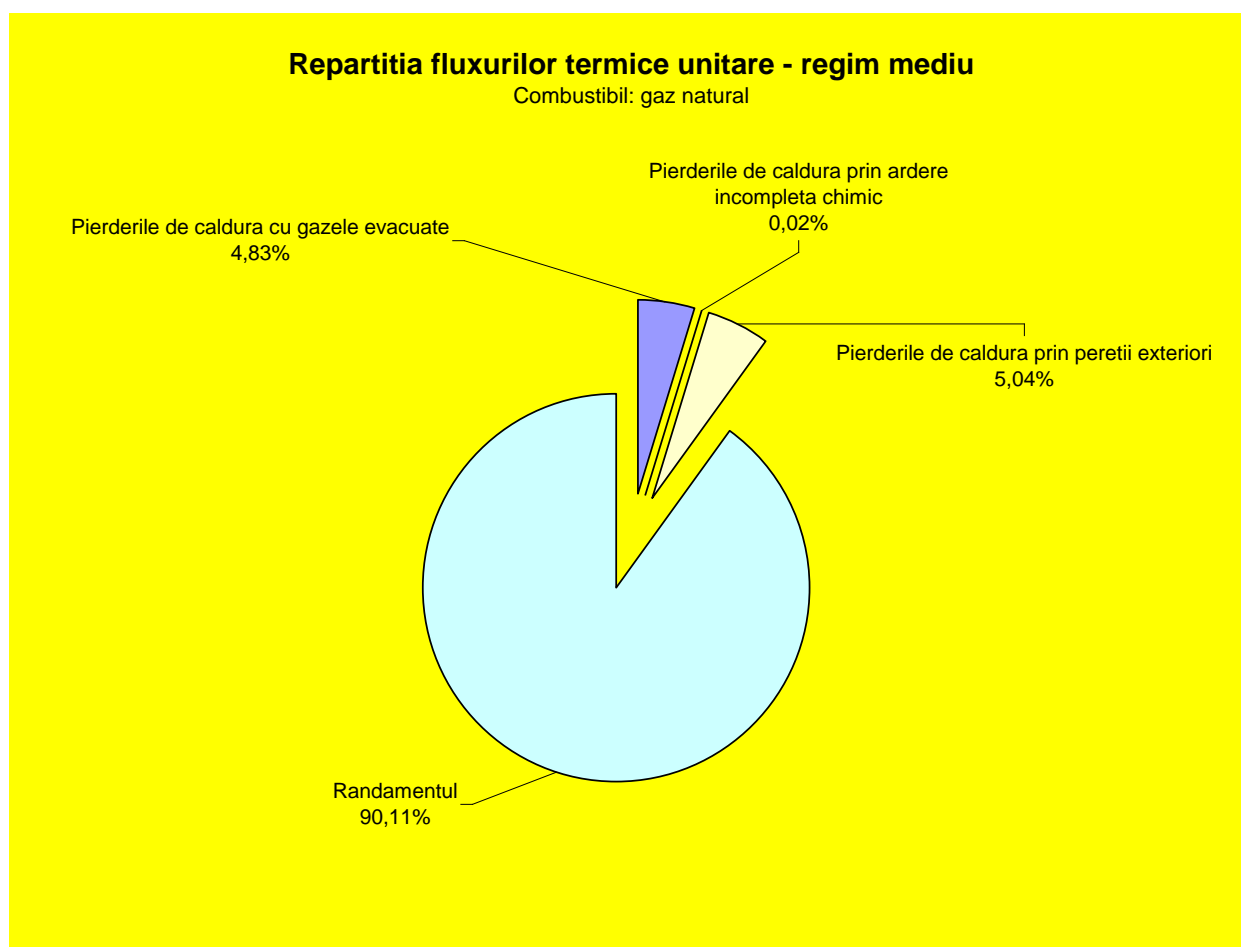
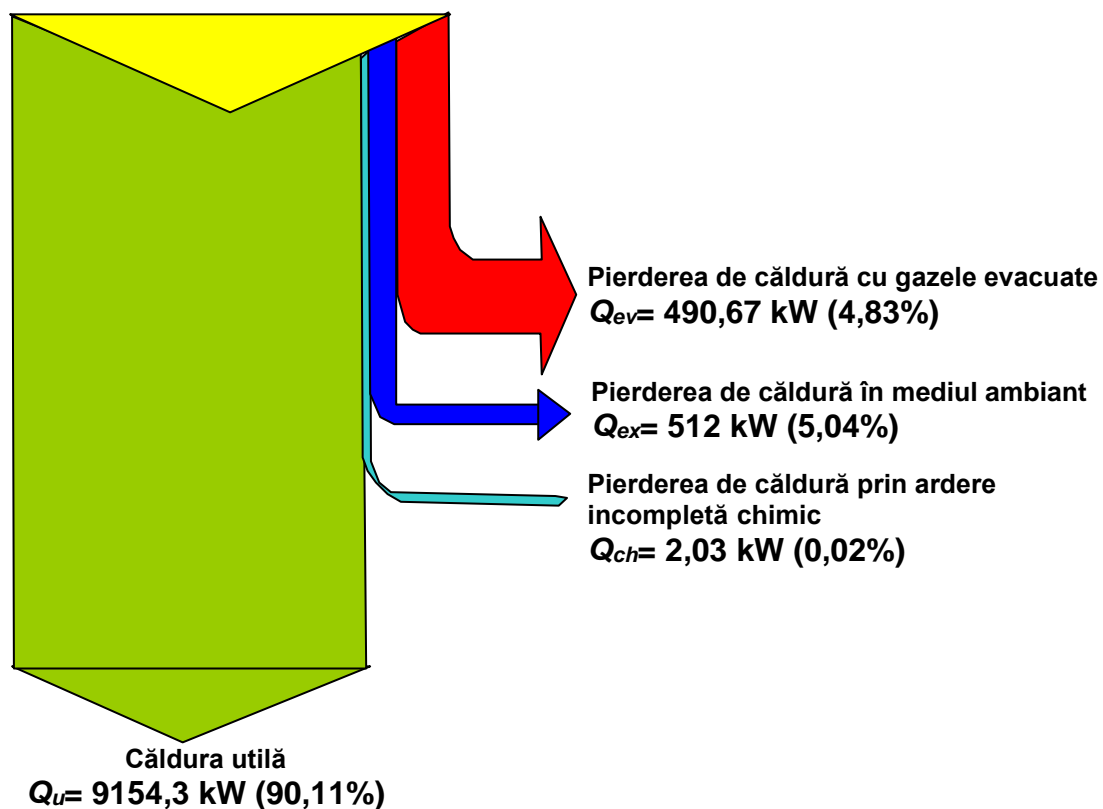


Diagrama Sankey corespunzătoare bilanțului cazanului funcționând pe gaz natural la sarcină medie de lungă durată

Căldura intrată (energie chimică combustibil + energie electrică contur bilant)

$$Q_{\text{int}} = B \cdot H_i^i + P_{el} = 9969 \text{ (98,13\%)} + 190 \text{ (1,87\%)} = 10159 \text{ kW}$$



2.9. BILANȚUL LA SARCINĂ MAXIMĂ

Arderea completă combustibil gazos

Date de intrare

CH ₄ ^c (%)	96,026
C ₂ H ₆ ^c (%)	1,58
C ₃ H ₈ ^c (%)	0,213
C ₄ H ₁₀ ^c (%)	0,021
C ₅ H ₁₂ ^c (%)	0,015
C ₆ H ₁₄ ^c (%)	0,007
CO ^c (%)	0
CO ₂ ^c (%)	0,153
H ₂ ^c (%)	0
N ₂ ^c (%)	1,976
O ₂ ^c (%)	0,009
Suma	100
d (g/m ³ _N)	12
x (g/kg)	10

Masuratori

CO ₂ (%)	9,9
CO (%)	0,0082
O ₂ (%)	3,6
SO ₂ (%)	0
NO (%)	0,0058
NO ₂ (%)	0
N ₂ (%)	86,486
α	1,21
t _{ev} (°C)	101,8
t ₀ (°C)	20,9
t _{cb} (°C)	2
i _{cb} (kJ/m ³ _N)	3,09
CO _{2max}	11,95

D _{apa}	453,42	t/h
	460,00	m ³ /h
t _{tur}	65	°C
t _{retur}	45	°C
i _{tur}	272,19	kJ/kg
i _{ret}	188,06	kJ/kg
Q _u	10595,32	kW
	9,11	Gcal/h
Sarcina	91,1	%
p _{tur}	9	bar
p _{retur}	12	bar
B	1114,4	m ³ _s /h
P _{el}	190	kW

Constante combustibil

Q _i (kJ/m ³ _N)	35747,46
K	3,53
C	0,6
b	0,18

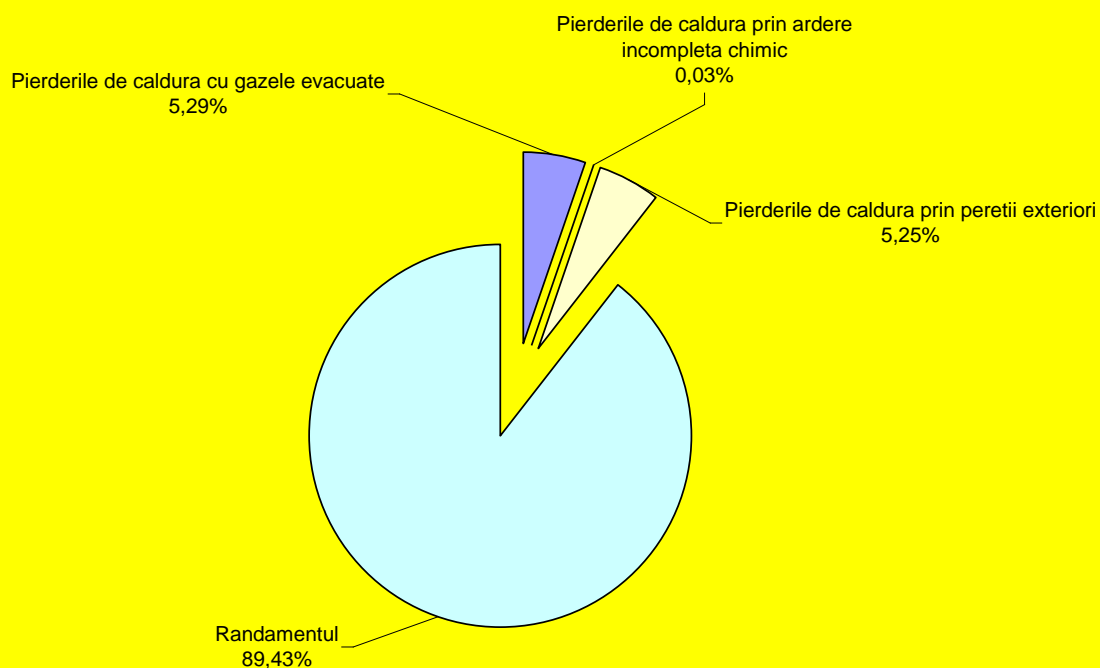
Elemente de calcul		
Volumul teoretic de aer uscat necesar arderii combustibilului		
V ⁰ _a	9,14	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real de aer (umed)		
V _a	11,24	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de azot din gazele de ardere		
V ⁰ _{N₂}	7,24	m ³ _N /m ³ _N
Volumul gazelor de ardere triatomice uscate		
V ⁰ _{RO₂}	0,96	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al gazelor de ardere uscate (anhidre)		
V ⁰ _{gu}	8,21	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H₂O}	2,08	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de gaze de ardere umede		
V ⁰ _g	10,29	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al gazelor de ardere uscate		
V ⁰ _{gu}	10,13	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H₂O}	2,11	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real al gazelor de ardere (arderea cu exces de aer)		

V_g^0	12,24	m^3_N/m^3_N			
Calculul arderii reale					
Volumul gazelor de ardere uscate rezultate efectiv din arderea reala					
V_{gu}	9,71	m^3_N/m^3_N	V_{RO2}	0,96179	m^3_N/m^3_N
Volumele de aer uscat si umed efectiv introduse in instalatie					
V_a	10,60	m^3_N/m^3_N			
$V_{a,um}$	10,77	m^3_N/m^3_N			
Volumul vaporilor de apa din gazele de ardere					
V_{H_2O}	2,11	m^3_N/m^3_N			
Volumul de gaze de ardere umede rezultate din arderea reala a combustibilului					
V_g	11,81	m^3_N/m^3_N			
Coeficientul de exces in aer din gazele de ardere (calculat)					
α	1,19				
Volumul strict necesar de oxigen					
V_{Omin}	1,92043	m^3_N/m^3_N			
Caracteristica combustibilului					
β	0,79				
Calculul randamentului cazanului si a consumului de combustibil					
Pierdere de caldura cu gazele evacuate					
q_{ev}	5,29	%			
Pierdere de caldura prin ardere incompleta chimic					
q_{ch}	0,03	%			
Pierdere de caldura in exterior					
q_{ex}	5,25	%			
Randamentul cazanului					
η_{direct}	89,31	%			
$\eta_{indirect}$	89,43	%			
Consumul de combustibil					
B	887,73	kg/h			
	1194,80	m^3_N/h			
	1132,60	m^3_s/h			
Eroarea pentru debitul de combustibil					
ε	1,64	%			
Consumul specific de combustibil					
b	2,635	m^3_N/t apa			
Consumul specific de caldura					
q	92,72	MJ/t apa			
Analiza emisii					
Puterea calorifica inferioara a gazului natural					
Q_i	48112	kJ/kg			
Continutul de carbon din combustibil					
C	72,06	%			
Factorul de emisie pentru CO_2					
ε_{CO_2}	50033	g/GJ			
Cantitatea de CO_2 evacuata in atmosfera					
E_h	2136,9	kg/h			
Concentratia de CO_2 în gazele evacuate					

c	151,40	g/m ³ _N	
Factorul de emisie pentru NO			
ε _{NO}	118	g/GJ	
Cantitatea de NO evacuată în atmosferă			
E _{h,NO}	4,96	kg/h	
Concentrația de NO în gazele evacuate			
C _{NO}	351,2	mg/m ³ _N	(valoarea limită 350 mg/m ³ _N)
Concentrația de CO în gazele evacuate			
C _{CO}	121,08	mg/m ³ _N	(valoarea limită 100 mg/m ³ _N)

Repartiția fluxurilor termice unitare - regim maxim 1

Combustibil: gaz natural



2.10. BILANȚUL OPTIMIZAT

Bilantul termic optimizat este un bilanț teoretic de comparatie si a fost întocmit pentru sarcina maxima a cazanului in conditiile realizarii unei arderi corespunzatoare reducerii oxidului de carbon la limita minima indicata de normativele în vigoare pentru combustibilul gazos natural și anume la $CO_{max} = 0,01\%$ si a unui exces de aer normalizat de $\alpha = 1,1$.

Ardere completă combustibil gazos

Date de intrare combustibil

CH ₄ ^c (%)	96,026
C ₂ H ₆ ^c (%)	1,58
C ₃ H ₈ ^c (%)	0,213
C ₄ H ₁₀ ^c (%)	0,021
C ₅ H ₁₂ ^c (%)	0,015
C ₆ H ₁₄ ^c (%)	0,007
CO ^c (%)	0
CO ₂ ^c (%)	0,153
H ₂ ^c (%)	0
N ₂ ^c (%)	1,976
O ₂ ^c (%)	0,009
Suma	100
d (g/m ³ _N)	12
x (g/kg)	10

Date optimizate

CO ₂ (%)	11,5
CO (%)	0,01
O ₂ (%)	2
SO ₂ (%)	0
NO (%)	0
NO ₂ (%)	0
N ₂ (%)	86,49
α	1,1
t _{ev} (°C)	115
t ₀ (°C)	20,9
t _{cb} (°C)	2
i _{cb} (kJ/m ³ _N)	3,09
CO _{2max}	12,71

Valori masurate la regim maxim

D _{apa}	447,58	t/h
	458,00	m ³ /h
t _{tur}	82	°C
t _{retur}	60	°C
i _{tur}	344,36	kJ/kg
i _{ret}	251,09	kJ/kg
Q _u	11596,79	kW
	9,97	Gcal/h
Sarcina	99,7	%
p _{tur}	9	bar
p _{retur}	12	bar
B	1219	m ³ _s /h
P _{el}	190	kW

Constante combustibil

Q _i (kJ/m ³ _N)	35747,46
K	3,53
C	0,6
b	0,18

Elemente de calcul		
Volumul teoretic de aer uscat necesar arderii combustibilului		
V ⁰ _a	9,14	m ³ _N /m ³ _N
Volumul real de aer (umed)		
V _a	10,22	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de azot din gazele de ardere		
V ⁰ _{N2}	7,24	m ³ _N /m ³ _N
Volumul gazelor de ardere triatomice uscate		
V ⁰ _{RO2}	0,96	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al gazelor de ardere uscate (anhidre)		
V ⁰ _{gu}	8,21	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic al vaporilor de apa din gazele de ardere		
V ⁰ _{H2O}	2,08	m ³ _N /m ³ _N
Volumul teoretic de gaze de ardere umede		

V_g^0	10,29	m^3_N/m^3_N						
Volumul real al gazelor de ardere uscate								
V_{gu}^0	9,12	m^3_N/m^3_N						
Volumul real al vaporilor de apa din gazele de ardere								
$V_{H_2O}^0$	2,10	m^3_N/m^3_N						
Volumul real al gazelor de ardere (arderea cu exces de aer)								
V_g^0	11,22	m^3_N/m^3_N						
Calculul arderii reale								
Volumul gazelor de ardere uscate rezultate efectiv din arderea reala								
V_{gu}	8,36	m^3_N/m^3_N	V_{RO_2}	0,96179	m^3_N/m^3_N			
Volumele de aer uscat si umed efectiv introduse in instalatie								
V_a	9,12	m^3_N/m^3_N						
$V_{a,um}$	9,27	m^3_N/m^3_N						
Volumul vaporilor de apa din gazele de ardere								
V_{H_2O}	2,08	m^3_N/m^3_N						
Volumul de gaze de ardere umede rezultate din arderea reala a combustibilului								
V_g	10,44	m^3_N/m^3_N						
Coeficientul de exces in aer din gazele de ardere (calculat)								
α	1,10							
Volumul strict necesar de oxigen								
V_{0min}	1,92043	m^3_N/m^3_N						
Caracteristica combustibilui								
β	0,79							
Calculul randamentului cazanului si a consumului de combustibil								
Pierdere de caldura cu gazele evacuate								
q_{ev}	4,35	%						
Pierdere de caldura prin ardere incompleta chimic								
q_{ch}	0,03	%						
Pierdere de caldura in exterior								
q_{ex}	4,80	%						
Randamentul cazanului								
$\eta_{indirect}$	90,82	%						
Consumul de combustibil								
B	956	kg/h						
	1286	m^3_N/h						
	1219	m^3_s/h						
Consumul specific de combustibil								
b	2,873	m^3_N/t apa						
Consumul specific de caldura								
q	100,37	MJ/t apa						

Repartitia fluxurilor termice unitare - bilant optimizat

Combustibil: gaz natural

