

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA" DIN TIMIȘOARA
FACULTATEA DE MECANICĂ

224.124
181 C-

ing. POP IOAN GHEORGHE

GAZIFICAREA ȘI ARDEREA LIGNIȚILOR

TEZĂ DE DOCTORAT

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

Coordonator științific
Prof. dr. ing. CORNELIU UNGUREANU

TIMIȘOARA
1998

ing. POP IOAN GHEORGHE

GAZIFICAREA ȘI ARDEREA LIGNIȚILOR

TEZĂ DE DOCTORAT

024.124
181 C

Coordonator științific
Prof. dr. ing. **CORNELIU UNGUREANU**

TIMIȘOARA
1998

CUVÂNT ÎNAINTE

Teza de doctorat abordează tematica complexă a gazificării cărbunilor, domeniu cu o largă aplicabilitate pe termen mediu atât din punct de vedere energetic cât și al carbochimiei.

Resursele de combustibili fosili actuali, balanța energetică și previziunile referitoare la producerea și consumul energetic, indică reabilitarea cărbunelui care apare ca o garanție a satisfacerii cerințelor pe un interval de ordinul secolelor - estimativ până în anii 2500, până la apariția și dezvoltarea de noi surse. Actualele tehnologii precum și capacitățile de producție permit satisfacerea necesităților energetice pe termen mediu prin utilizarea cărbunelui, care devine o sursă latentă energetică extrem de importantă. De asemenea, se constată orientarea cercetării spre tehnologii de producție și consum cu grad redus de poluare, în vederea diminuării efectelor negative ale compușilor sulfului, oxizilor de azot și bioxidului de carbon din gazele de ardere, precum și a masei minerale necombustibile, respectiv cenușii asupra mediului ambiant.

Agregatele energetice convenționale, bazate pe arderea combustibililor solizi se confruntă cu acute dificultăți tehnico-economice determinate de deprecierea continuă a calității cărbunilor, datorate ponderii și efectelor negative ale balastului, fiind la limita utilizării economice. În consecință, dificultățile implicate de utilizarea convențională a cărbunilor și în principal a ligniților, conduc la concluzia că forma solidă prezintă dezavantaje în cazul marilor centrale energetice, la micii consumatori, fiind total inutilizabilă în unele domenii energetice sau ca materie primă în chimie. Pe de altă parte, înlocuirea hidrocarburilor nu este previzibilă într-un viitor apropiat, nu numai datorită marilor investiții și a tehnologiilor de prelucrare și utilizare bine puse la punct, cât mai ales datorită calităților reale ale acestora.

În concluzie, rezultă necesitatea valorificării superioare a cărbunilor prin chimizare, în vederea conferirii acestora a avantajelor combustibililor lichizi sau gazoși. Referitor la chimizarea cărbunilor prognozele precum și preocupările intense din unele țări ca S.U.A., Germania, Japonia, țările Pieței Comune indică ca principale direcții gazificarea și lichefierea prin hidrogenare a acestora.

La nivel național, chimizarea cărbunelui a fost pe un plan secundar datorită resurselor de hidrocarburi lichide și gazoase, cât și datorită calității inferioare a ligniților autohtoni, în ceea ce privește exploatarea convențională a acestora. De remarcat că, în cazul cărbunilor tineri reactivitatea ridicată a acestora îi face atractivi din punctul de vedere al utilizării prin chimizare. Pe plan național există puține generatoare de gazificare a cărbunilor, acestea având un caracter "istoric". Anii '80 indică o abordare a cercetărilor în domeniu, care însă au fost abandonate în actualul context economic.

Teza de doctorat și-a propus analiza posibilităților gazificării ligniților autohtoni prin adordarea unui procedeu "neconvențional" bazat pe gazificarea acestora utilizând umiditatea proprie. Utilizarea umidității proprii, indică ca principale avantaje față de tehnologiile clasice: calitatea sensibil superioară a gazului brut, în condițiile eliminării costului oxigenului utilizat ca agent de gazificare, majorarea eficienței termice globale a procesului determinată de bilanțul material și energetic al umidității cărbunelui, precum și simplificarea instalației globale atât în ceea ce privește pregătirea cărbunelui, prepararea agentului de gazificare și tratarea gazului brut și a subprodusilor secundari. De asemenea, s-a studiat posibilitatea utilizării energetice a combustibilului gazos rezulat în urma gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, prin analiza teoretică și experimentală a caracteristicilor cinetice ale arderii acestora.

Autorul ține să-și exprime sincere mulțumiri coordonatorului științific, dl. prof. dr. ing. Corneliu Ungureanu pentru sprijinul deosebit acordat pe parcursul desfășurării cercetării și elaborării tezei, prin îndrumările domniei sale în indicarea direcțiilor și a elucidării dificultăților inerente oricărei cercetări științifice. Totodată,

Înțeleg să-mi exprim gratitudinea față de coordonatorul științific pentru solicitudinea manifestată în soluționarea tuturor aspectelor survenite pe parcursul studiului teoretic și experimental, precum și pentru încrederea și susținerea pe care mi le-a acordat.

*Doresc să menționez, colaborarea deosebită atât în ceea ce privește elementele teoretice cât și cele experimentale referitoare la gazificarea cărbunilor, cu dl. **prof. dr. chim. Gavril Niac**, aducându-i, pe această cale deosebite mulțumiri.*

*În contextul studiului experimental referitor la analiza arderii combustibililor gazoși, doresc să remarc colaborarea în realizarea standului experimental cu Institutul de Tehnologie Izotopică și Moleculară Cluj-Napoca, în mod deosebit cu dl. **dr. fiz. Petru Mercea**.*

*În încheiere, dar nu în ultimul rând doresc să-mi exprim mulțumirile față de dl. **prof. dr. ing. Gheorghe Badea** și a colegilor din Catedra de Instalații în Construcții pentru sprijinul și sfaturile acordate în elaborarea prezentei lucrări.*

Autorul

CAPITOLUL I GENERALITATI

Declanșarea crizei gazelor naturale în S.U.A., urmată în 1973 de criza petrolului, determinate de scăderea rezervelor de combustibili convenționali și de creșterea continuă, până în perioada începutului anilor '90, a prețului energiei primare, a implicat orientarea energeticienilor spre reabilitatea cărbunelui, precum și spre utilizarea pe scară tot mai largă a energiilor neconvenționale și regenerabile. Dintre energiile neconvenționale, fisiunea nucleară este exploatată în prezent pe baza uraniului și toriului, în schimb referitor la fuziunea nucleară nu se întrezărește data posibilei utilizări, în pofida efortului depus în cadrul cercetărilor intense în domeniu. Alternativele energetice regenerabile: energia solară, energia eoliană, energia valurilor și mareelor, energia calorică a oceanelor, energia geotermală, biomasa, etc. au în condițiile tehnologice actuale o aplicabilitate limitată de caracterul aleator și de dispersia ridicată a fluxului incident, ceea ce conduce la investiții mari, actualmente neeconomice.

Corespunzător balanței energetice și a previziunilor referitoare la producerea și consumul energetic, în condițiile anilor '70-'90, reabilitarea pe termen mediu al cărbunelui apare ca o garanție a satisfacerii cerințelor, până la apariția și dezvoltarea de noi surse. Afirmția este argumentată de estimările referitoare la resursele de combustibili fosili. Zăcămintele de cărbuni sunt estimate la $9 - 10,1 \cdot 10^{12}$ t.c.c. ajungând în cazul estimărilor geologice maxime la $15,8 \cdot 10^{12}$ t.c.c. Referitor la gazele naturale estimările sunt de $280 \cdot 10^9$ t.c.c. cu valori maxime de $330 \cdot 10^9$ t.c.c., respectiv în cazul hidrocarburilor lichide $415 \cdot 10^9$ t.c.c. până la $1.180 \cdot 10^9$ t.c.c./1.1/. La aceste estimări se adaugă recente descoperiri de țiței din zona Mării Caspice estimate la $36,5 \cdot 10^9$ barili până la $60 \cdot 10^9$ barili, care echivalate în combustibil convențional reprezintă $7,5 - 12,5 \cdot 10^9$ t.c.c. Estimările rezervelor de cărbuni din țara noastră sunt relativ vechi, fiind situate în jurul valorii de $1.980 \cdot 10^6$ t.c.c., fără a fi cuprins ultimele descoperiri ale sfârșitului anilor '80, dintre acestea circa 85 % o constituie ligniții.

Cu toate controversele asupra actualelor estimări, prevederile indică relativ constant anii 2020-2030 ca limită a epuizării rezervelor de petrol și 2050-2060 în cazul gazelor naturale. Referitor la cărbuni, se consideră că aceștia pot satisface nevoile energetice pe un interval de ordinul secolelor, estimativ până în anii 2500.

La nivelul anilor '70 consumul energetic mondial era de circa $9 \cdot 10^9$ t.c.c., crescând la nivelul anilor '90 la circa $18 \cdot 10^9$ t.c.c., urmând conform previziunilor a se majora în anul 2000 la circa $23,5 \cdot 10^9$ t.c.c. Evoluția și previziunile defalcate pe diferiți combustibili ai producției energetice mondiale în perioada 1972-2020 este prezentată în tabelul 1.1. Cea mai surprinzătoare creștere o reprezintă energia nucleară urmată de cărbune și sursele neconvenționale, în detrimentul producției energetice de hidrocarburi lichide, conform previziunilor sintetice prezentate în figura 1.1.

Producția, sursele și consumul energetic sunt puternic determinate de decizii politice și de protecție a mediului ambiant. De o importanță majoră este orientarea administrației Clinton, conform planului global Energy Star, spre consumuri energetice diminuate atât în cazul proceselor tehnologice industriale cât și la micii consumatori,

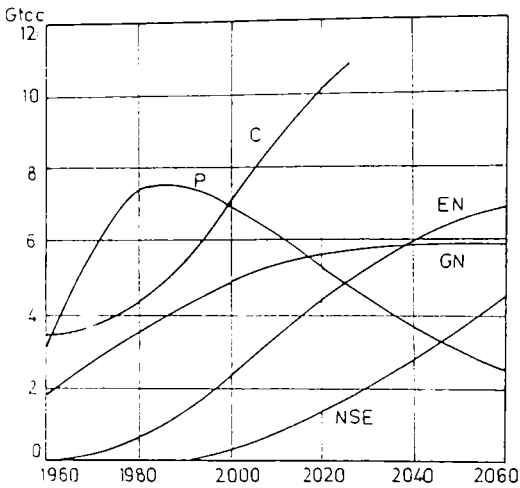


Figura 1.1 Evoluția și previziunile producției mondiale de energie:

C - cărbune; GN - gaze naturale; EN - energie nucleară;
P - petrol; NSE - noi surse energetice

politică energetică urmată de Comunitatea Europeană prin planul Energie 2000. De asemenea, se constată orientarea energeticienilor spre tehnologii de producție și consum cu grad redus de poluare, în vederea diminuirii efectelor negative ale compușilor sulfului, oxizilor de azot și bioxidului de carbon asupra mediului ambiant. Necesitatea protecției mediului ambiant, coroborată cu riscurile accidentelor nucleare de tipul Three Mile Island, dar în special Cernobâl, au alimentat tendințele de reducere a ponderii energiei nucleare, tendințe accentuate în zilele noastre în Germania și Franța.

Nr. crt.	SURSA	U.M.	PRODUCȚIA MONDIALĂ DE ENERGIE			
			1972	1985	2000	2020
1	Cărbune	Mtcc	2.240	3.910	5.780	8.810
		%	24,5	23,6	24,6	25,9
2	Petrol	Mtcc	3.910	7.340	6.630	3.600
		%	42,8	44,4	28,3	10,6
3	Gaze naturale	Mtcc	1.560	2.600	4.860	4.250
		%	17,1	15,7	20,7	12,5
4	Energie nucleară	Mtcc	70	780	2.990	10.670
		%	0,8	4,7	12,7	31,4
5	Energie hidrotehnică	Mtcc	470	800	1.150	1.910
		%	5,2	4,8	4,9	5,6
6	Hidrocarburi sintetice	Mtcc	--	--	140	1.360
		%	--	--	0,6	4,0
7	Surse neconvenționale	Mtcc	880	1.120	1.900	3.400
		%	9,6	6,8	8,2	10,0
8	Total	Mtcc	9.130	16.550	23.450	34.000

Tabelul 1.1 Evoluția producției mondiale de energie /1.2/

În concluzie, se constată orientarea energeticienilor spre necesitatea perfecționării actualelor procedee precum și descoperirea de noi tehnologii cu grad redus de poluare a mediului ambiant. De asemenea, pe termen mediu se estimează că și ca materie primă pentru industria chimică. Actualele tehnologii precum și capacitățile de producție permit satisfacerea necesităților energetice pe termen mediu

prin utilizarea cărbunelui, care devine o sursă latentă energetică extrem de importantă.

Agregatele energetice convenționale, bazate pe arderea combustibililor solizi sunt confruntate cu acute probleme tehnico-economice determinate de deprecierea continuă a puterii calorifice inferioare a acestora. Puterea calorifică scăzută a ligniților, determinată de conținutul ridicat de balast accentuează până la a fi prohibitive pentru utilizare efectele provocate de umiditate și masa minerală necombustibilă: balast la transport, eroziunea și coroziunea utilajelor, transportul și depozitarea cenușii, poluarea mediului ambiant, etc. Pe lângă diminuarea caracteristicilor energetice ale cărbunilor, balastul are un efect inertizant asupra aprinderii și stabilității arderii. Structura petrografică /1.3/, în cazul unui amestec intim al masei cărbunoase cu cenușa îngreunează degajarea volatilelor, ceea ce conduce la întârzierea aprinderii și la instabilitatea arderii. De asemenea, unele componente lemnoase, grupa de macerale huminite, în speța textinitul și xilita neputând fi macinate în mod convenabil, ard incomplet în suspensie. Pe de altă parte, energia de activare necesară ridicării temperaturii masei combustibilului în vederea aprinderii, este preluată într-o pondere semnificativă de celelalte componente aflate în zona de combustie, ceea ce determină frânarea aprinderii. De asemenea, unii constituenți ai cenușii, în speța componentele alcaline au un efect inhibitor asupra stabilității arderii cărbunelui. Trebuie menționat că, ligniții datorită conținutului ridicat de volatile - 55 - 69 %, raportat la masa cărbunoasă - au o reactivitate ridicată, conducând la temperaturi relativ scăzute de aprindere.

Arderea în strat, cel mai vechi procedeu utilizat în prezent, se pretează la cărbunii superiori. Datorită rezervelor autohtone de ligniți inferiori, arderea acestora implică răscolirea intensă a stratului de cărbune, fiind adoptată varianta împingerii răsturnate, în vederea reducerii pierderilor prin nearse /1.4, 1.5/. Optimizarea arderii cărbunilor în strat este realizabilă prin recircularea unei fracțiuni din gazele rezultate ale arderii, prelevate de la baza coșului, ceea ce favorizează uscarea, devolatilizarea și aprinderea combustibilului, evitându-se aglomerarea masei minerale necombustibile /1.6/. Randamentul arderii în strat, sensibil redus față de valorile obținute la arderea pulverizată a determinat răstrângerea domeniului de utilizare a arderii în strat.

Arderea cărbunelui pulverizat oferă posibilitatea utilizării în practica industrială a cărbunilor inferiori, cu conținut ridicat de balast și de asemenea a prafului de cărbune rezultat din extracție, depozitare și prelucrare, care anterior era considerat deșeu. Funcționarea instalației de ardere este influențată de calitatea combustibilului, care poate fi ameliorată prin îmbogățirea acestuia, în cazul ligniților prin sortare uscată și umedă, conducând la creșterea puterii calorifice cu circa 1.000 kJ/kg /1.7/. Instalațiile pentru prepararea prafului de cărbune în circuit închis funcționează în condiții optime în cazul cărbunilor cu umiditate redusă, cauza care a determinat adoptarea de variante modificate sau înlocuirea lor în cazul utilizării cărbunilor cu umiditate marită. Modificarea schemei cu insuflare directă s-a realizat prin introducerea unui turbionator care permite separarea și dirijarea unei fracțiuni a prafului de cărbune spre arzătorul principal, restul prafului împreună cu componentele inerte ajungând la arzătorul amplasat deasupra /1.8/. În vederea eliminării componentelor inerte, rezultate în urma uscării apare ca rațională utilizarea preparării prafului de cărbune în instalații cu circuit deschis, cu buncăr intermediar /1.9/ sau semideschis, arderea în arzătorul principal a prafului de cărbune separat prin turbionare fiind susținută de arzătorul suport utilizând particulele fine rezultate în urma desprăfuirii /1.10/. Optimizarea arderii este posibilă prin asigurarea unui amestec intim între praful de cărbune și aerul necesar arderii realizabil prin turbionarea amestecului carburant sau prin efectul impactului reciproc al jeturilor de praf de

cărbune și aer /1.11/. Experimentări promitatoare impun înzestrarea arzătoarelor pentru praf de cărbune cu generatoare de ultrasunete care permit intensificarea transferului termic și de masă între mediul din focar și combustibil /1.12/. Reducerea pierderilor prin ardere incompletă din punct de vedere mecanic este realizabilă fie prin continuarea arderii pe un gratar de postardere, prin însuflarea aerului terțiar în pâlnia rece a focarului sau prin recircularea fracțiunii cenușii cu putere calorică ridicată /1.13/.

Arderea în strat fluidizat prezintă ca principale avantaje: concentrarea combustibilului în focar, mărirea vitezei relative dintre particula de cărbune și aerul de combustie și reducerea considerabilă a poluării mediului ambiant prin introducerea de reactivi în combustibil care permit purificarea gazelor arse direct în focar.

Dificultățile implicate de utilizarea convențională a cărbunilor conduc la concluzia că forma solidă prezintă dezavantaje în cazul marilor centrale energetice, la micii consumatori, fiind total inutilizabilă în unele domenii energetice sau ca materie primă în chimie. Pe de altă parte, înlocuirea hidrocarburilor nu este previzibilă într-un viitor apropiat, nu numai datorită marilor investiții și a tehnologiilor de prelucrare și utilizare bine puse la punct, cât mai ales datorită calităților reale ale acestora: putere calorică ridicată, densitate relativ ridicată în gazele de ardere, facilitați în manipulare și transport, poluare relativ redusă a mediului ambiant și ușurința depoluării în cazul accidentelor, întrebuințări multilaterale, etc.

În concluzie, rezultă necesitatea valorificării superioare a cărbunilor prin chimizare, obținându-se gaze combustibile care anterior rezultau din țiței sau gaze naturale. Referitor la chimizarea cărbunilor, prognozele precum și preocupările intense din unele țări ca S.U.A., Germania, Japonia, țările Pieței Comune, etc., indică ca principale direcții gazificarea și lichefierea prin hidrogenare a acestora.

Gazificarea cărbunilor ofera avantaje economice și energetice importante, gazul brut fiind utilizabil în condiții economice într-o multitudine de domenii majore:

- în energetică, aplicabil în cadrul ciclurilor mixte de producere a energiei electrice sau ca substitut de gaze naturale (S.N.G.);
- în chimie, ca materie primă pentru sinteza amoniacului, metanolului, hidrocarburilor superioare sau în vederea obținerii hidrogenului;
- în siderurgie, ca agent reducător;
- în multe sectoare industriale, ca de exemplu: metalurgia pulberilor, industria sticlei, ceramicii, etc., unde forma solidă nu este utilizabilă datorită riscului de impurificare a materialelor folosite.

CAPITOLUL 2

BAZELE TERMOCHIMICE ALE GAZIFICĂRII CĂRBUNIIOR

Gazificarea cărbunilor reprezintă procesul termochimic complex de transformare, pe cât posibil integrală a masei organice a combustibililor solizi în gaze combustibile sub acțiunea agentului de gazificare. Ca agenți de gazificare sunt utilizați: aer, aer îmbogățit, oxigen, abur, bioxid de carbon, hidrogen sau amestecul acestora. Combustibilii solizi utilizați la gazificare sunt: cărbunii, semicocsul, cocsul, lemnul, rezultând ca subproduși, pe lângă gaze combustibile, gudroane, uleiuri ușoare și mijlocii, compuși fenolici și de asemenea cenușa sau zgura rezultată din calcinarea sau topirea masei minerale necombustibile.

În urma gazificării rezultă amestecuri de gaze combustibile: CO, CH₄, H₂ și H₂S și gaze inerte din punct de vedere al arderii: CO₂, N₂, H₂O_v și de asemenea O₂, cu predominarea unora sau a altora, funcție de parametrii procesului: temperatura, presiunea, agentul de gazificare și modul de conducere al procedurii utilizat. În practică se disting următoarele categorii de gaze obținute prin gazificarea cărbunilor:

- gaz combustibil sărac, rezultat prin gazificarea cu aer și abur sau bioxid de carbon, având o putere calorifică inferioară sub 6.000 kJ/m³N, datorită conținutului ridicat de azot și bioxid de carbon, care diluează componentele combustibile: oxid de carbon, hidrogen și puțin metan. Gazul sărac se pretează la ardere în vecinătatea zonei de producție.

- gaz combustibil mijlociu, rezultat din gazificarea cărbunilor cu oxigen și abur sau bioxid de carbon, având puteri calorifice inferioare de 10.000 - 14.000 kJ/m³N, sensibil majorate față de gazul combustibil sărac datorită lipsei azotului coroborată cu creșterea conținutului de metan. Gazul mijlociu datorită conținutului de hidrogen și oxid de carbon se pretează la utilizarea ca materie primă în chimie.

- gaz combustibil bogat rezultat prin hidrogazificarea cărbunilor sau metanarea gazului brut mijlociu, având puteri calorifice inferioare apropiate de cele ale metanului 30.000 - 35.000 kJ/m³N, utilizabil ca substitut de gaze naturale (S.N.G.), ca materie primă în chimie sau energetic pretându-se la transportul la distanță.

Principalele reacții termochimice care apar la gazificare, împreună cu efectele lor termice sunt redate pe baza elementelor chimice pure:

Reacții heterogene solid-gaz:

- reacția de oxidare totală - ardere completă:



- reacția de oxidare parțială - ardere incompletă:



- reacția Boudouard - reducerea bioxidului de carbon:

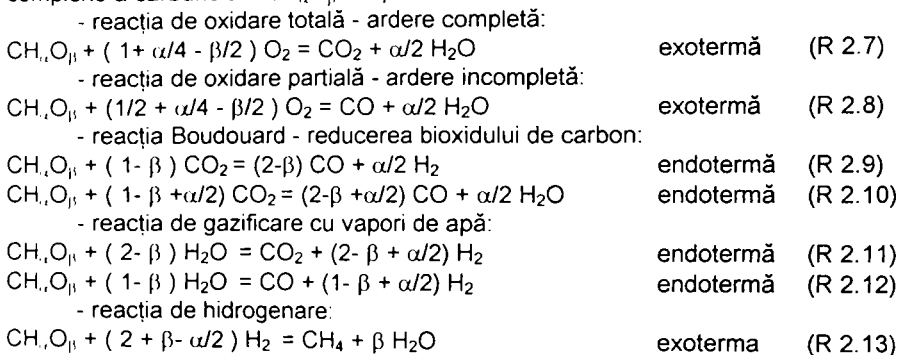


- reacția de gazificare cu vapori de apă:

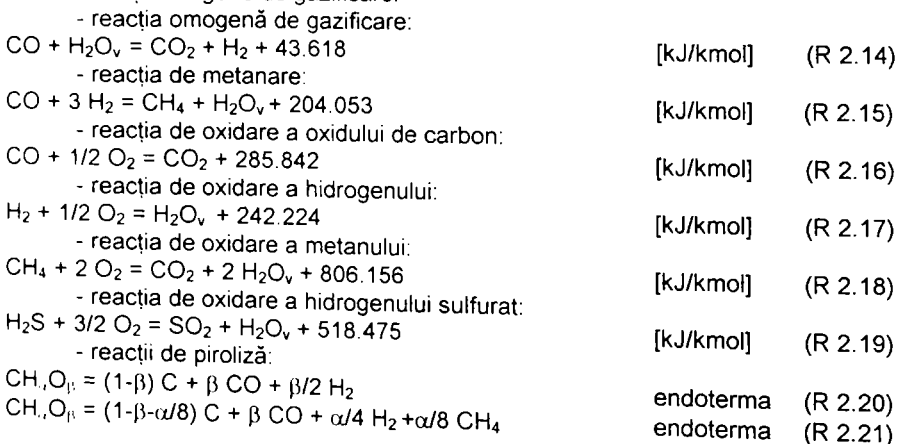




Reacțiile heterogene solid - gaz pot fi scrise și pe baza formulei chimice complexe a cărbunului - $CH_{\alpha}O_{\beta}$ - după cum urmează:



Reacții omogene de gazificare:



Desfășurarea proceselor termodinamice complexe de gazificare este determinată de următoarele reacții de bază: oxidarea completă și incompletă a carbonului (R 2.1) și (R 2.2), reacția de hidrogenare (R 2.5), reacția de gazificare (R 2.4) și reacția Boudouard (R 2.3) și combinații ale acestora.

Pe baza reacțiilor termodinamice de bază, funcție de agentul de gazificare se obține comportarea teoretică a gazogenului.

A Gazificarea cu aer

În cazul în care agentul de gazificare este aerul, reacția de gazificare este (R 2.2), care se desfășoară la temperaturi mai mari de $900^{\circ}C$, conform relației:

$$2 C + O_2 + 3,76 N_2 = 2 CO + 3,76 N_2 + 246.624 \quad [kJ/kmol] \quad (R 2.22)$$

rezultând compoziția teoretică a gazului de aer:

$$CO = 34,7 \% \quad N_2 = 65,3 \%$$

cu puterea calorică inferioară:

$$Q_i = 4.395,3 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

și volumul de gaze rezultat din unitatea de carbon:

$$V_g = 5,38 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

B. Gazificarea cu oxigen

Gazificarea cu oxigen se bazează pe reacția (R 2.2), gazul rezultat fiind compus din CO 100 %, cu puterea calorifică inferioară:

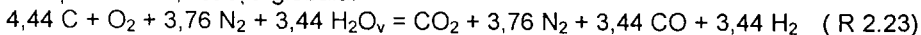
$$Q_i = 12.752,8 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

într-o cantitate, raportată la unitatea de carbon:

$$V_g = 1,87 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

C. Gazificarea cu aer și abur

Având în vedere caracterul endoterm al reacției heterogene de gazificare (R 2.4), aportul termic este furnizat de oxidarea carbonului (R 2.1), rezultând, pe baza bilanțului termic, reacția globală:



cu compoziția teoretică a gazului mixt:

$$\text{CO} = 29,55 \% \quad \text{H}_2 = 29,55 \% \quad \text{CO}_2 = 8,6 \% \quad \text{N}_2 = 32,3 \%$$

având puterea calorifică inferioară:

$$Q_i = 6.962 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

și volumul de gaze obținut din unitatea de carbon:

$$V_g = 4,89 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

De menționat că, gazificarea cu aer și abur poate fi realizată în două etape, prima în care se insuflă aer având loc combustia carbonului, urmând ca la insuflarea aburului să rezulte gazul de apă care se recoltează separat.

D. Gazificarea cu oxigen și abur

Gazificarea cu oxigen și abur se bazează pe reacțiile (R 2.1) și (R 2.4), rezultând reacția globală:



compoziția teoretică a gazului brut fiind:

$$\text{CO} = 43,65 \% \quad \text{H}_2 = 43,65 \% \quad \text{CO}_2 = 12,7 \%$$

cu puterea calorifică inferioară:

$$Q_i = 10.283,8 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

într-un debit specific:

$$V_g = 3,31 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

Procesele de gazificare anterior prezentate sunt autoterme, energia termică fiind furnizată de arderea unei fracțiuni din carbonul introdus, ceea ce conferă autonomie termică procesului complex.

Procesele alloterme, bazate pe furnizarea din exterior a fluxului termic necesar reacțiilor endoterme de gazificare apar într-o pondere tot mai mare în conformitate cu previziunile referitoare la generația a III-a de generatoare.

E. Gazificarea cu bioxid de carbon

Utilizarea bioxidului de carbon ca agent de gazificare, pe baza reacției Boudouard (R 2.3), având loc la temperaturi de peste 800 °C, determină obținerea unui gaz compus din CO 100 %, având puterea calorifică inferioară:

$$Q_i = 12.752,8 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

într-un debit specific:

$$V_g = 3,76 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

necesitând fluxul termic din exterior:

$$Q_e = 3.625,6 \text{ kJ/m}^3\text{N gaz} = 13.544,2 \text{ kJ/kg cărbune}$$

F. Gazificarea cu abur

Gazificarea cu abur are loc în conformitate cu relația (R 2.4), gazul rezultat având compoziția:

$$\text{CO} = 50 \% \quad \text{H}_2 = 50 \%$$

cu puterea calorică inferioară:

$$Q_i = 11.779,8 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

într-un debit specific:

$$V_g = 3,74 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

consumând un flux termic exterior:

$$Q_e = 2.652,6 \text{ kJ/m}^3\text{N gaz} = 9.909,3 \text{ kJ/kg cărbune}$$

Datorită puterii calorifice ridicate a metanului, apare rațională conducerea procesului termochimic în vederea desfășurării pe baza reacțiilor (R 2.5) și (R 2.15), rezultând gaze combustibile cu puteri calorifice majorate utilizabile ca substitut de gaze naturale

G. Obținerea metanului

În vederea obținerii unui gaz de generator bogat în metan, procesul termochimic rezultă din combinarea reacțiilor: (R 2.8) cu (R 2.4) și (R 2.14), pe baza reacției globale:



De asemenea, prin combinarea reacției de hidrogenare (R 2.5) cu (R 2.15), desfășurată în sens invers și (R 2.14) se obține gaz de generator bogat în metan, pe baza aceleiași reacții globale (R 2.25), rezultând compoziția teoretică a gazului:

$$\text{CH}_4 = 50 \% \quad \text{CO}_2 = 50 \%$$

cu puterea calorică inferioară:

$$Q_i = 17.983,3 \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}]$$

într-un debit specific:

$$V_g = 1.87 \quad [\text{m}^3\text{N/kg}]$$

Determinarea parametrilor pe baza bilanțului masic și termic, prezentată anterior oferă indicii de ansamblu asupra posibilităților de gazificare pe baza carbonului, funcționarea reală a generatorului deosebindu-se de cea teoretică, în special prin următoarele elemente:

a. Combustibilul de gazificat nu este format din elemente chimice pure, ci din combinații ale acestora, precum și din compușii masei minerale necombustibile;

b. Reacțiile care au loc la gazificare nu sunt atât de simple, depinzând de temperatura și presiune, de posibilitatea atingerii echilibrului, cinetica reacțiilor care au loc la suprafața de separație solid-gaz depinzând de granulația și porozitatea cărbunelui, de viteza de insuflare a agentului de gazificare;

c. Gazificarea este însoțită de apariția unor subproduse secundare ca gudroane, uleiuri grele și mijlocii și fenoli.

În vederea analizei unui procedeu de gazificare este necesară determinarea influențelor condițiilor de desfășurare, practic asigurarea parametrilor termici - fizico - chimici - cinetici, în vederea conducerii reacțiilor spre produșii dorțiți.

CAPITOLUL 3

STADIUL ACTUAL AL TEHNOLOGIILOR DE GAZIFICARE A CĂRBUNILOR ȘI A INSTALAȚIILOR DE ARDERE UTILIZÂND GAZ DE GAZOGEN

3.1. CLASIFICAREA TEHNOLOGIILOR DE GAZIFICARE A CĂRBUNILOR

Stadiul actual al tehnologiilor de gazificare a cărbunilor indică faptul că din cele peste 30 de procedee și variante derivate majoritatea sunt germane, americane și câteva japoneze, țări care dispun de posibilități tehnologice și, de asemenea, de rezerve importante de combustibili solizi. Dintre acestea doar câteva sunt în stadiu comercial, ca de exemplu: Wellman - Galusha, Winkler, Koppers - Totzek, marea majoritate fiind în stadiu de pilot demonstrativ sau de dimensiuni cvasiindustriale cu capacități de prelucrare zilnică a 12 - 500 t cărbune /3.1, 3.2, 3.3/.

Criteriul fundamental de caracterizare al tehnologiilor de gazificare a cărbunilor este determinat de modul de furnizare a fluxului termic necesar proceselor endoterme complexe, clasificându-se în procedee autoterme, alloterme și procedee de hidrogazificare, desfășurate în generatoare, respectiv metode de gazificare subterană a cărbunilor.

Procedeele autoterme - practic cele mai frecvent utilizate, aflate în stadiu comercial sau de piloți demonstrativi - se caracterizează prin faptul că fluxul termic necesar reacțiilor endoterme de gazificare este furnizat de combustia unei fracțiuni a cărbunelui introdus. Agentul de gazificare, în general abur, mai rar bioxidul de carbon, conține, de asemenea, aer sau oxigen, astfel încât arderea carbonului la mono- sau bioxid de carbon să acopere energia termică necesară gazificării. Tehnologiile actuale optează spre oxigen, în vederea obținerii unui gaz brut fără azot și pentru diminuarea lucrului mecanic consumat la compresie, în cazul gazificării sub presiune.

Procedeele alloterme se bazează pe furnizarea din exterior a fluxului termic necesar gazificării, utilizând ca agent abur sau bioxid de carbon. Energia termică este furnizat prin intermediul schimbătoarelor de căldură prin agenți termogeni de transport, fie prin preîncălzirea agentului de gazificare. Previiziunile indică o pondere însemnată a variantelor alloterme prin utilizarea căldurii furnizate de reactoarele nucleare de temperatură ridicată, procedeele fiind în stadiu de cercetare la nivel de laborator sau stații pilot de dimensiuni reduse.

Hidrogazificarea cărbunilor se bazează pe reacția exotermă a carbonului cu hidrogenul, eventual obținut prin gazificare și prelucrarea ulterioară a gazului brut, rezultând un gaz combustibil de calitate cu conținut ridicat de metan. Procedeele de hidrogazificare sunt în stadiu de instalații pilot de dimensiuni reduse sau demonstrative /3.4, 3.5/.

Gazificarea subterană permite transformarea termochimică, pe cât posibil integrală, a masei organice a cărbunelui din zăcământ în gaze combustibile sărace. Principiul de bază, cel mai frecvent adoptat, constă în realizarea unui canal între două foraje situate la adâncimi de 50 - 800 m și distanțe de câteva zeci de metri. Printr-un foraj se insuflă aer, aer îmbogățit sau oxigen care determină combustia masei cărbunoase adiacente canalului, oferind suportul termic necesar gazificării cu aburul

rezultat în urma vaporizării umidității din zăcământ, sau introdus din exterior. Gazul combustibil sărac este colectat prin celalat foraj /3.6, 3.7, 3.8/.

Tehnologiile de gazificare pot fi clasificate, în mod convenabil funcție de modul de realizare a contactului dintre cărbune și agentul de gazificare, practic în concordanță cu starea caracteristică a amestecului material solid - agent de gazificare. în procedee în strat, în pat fluidizat și în pat antrenat - suspensie.

Generatoarele de gazificare a cărbunilor au fost grupate, funcție de criterii istorice și parametrii funcționali în: generatoare istorice și moderne, care la rândul lor pot fi clasificate în trei generații, criteriile de clasificare fiind neclare. Generatoarele de gaz istorice - utilizate încă din secolul trecut - permiteau gazificarea cu aer, rezultând un gaz compus din oxid de carbon și azot, fie prin alternarea introducerii aerului cu aburul, rezultând gaze de ardere, respectiv gaz de apă, alternare la care s-a renunțat în cazul generatoarelor moderne /3.9, 3.10/.

Generatoarele din prima generație, dezvoltate în anii '50, se caracterizează prin temperaturi de operare cu valori maxime de 800 - 1.300 °C și presiuni apropiate de cea a mediului ambiant, valori sensibil diminuate față de generația următoare.

Generația a II-a, dezvoltată după anii '70, se caracterizează, fără excepție prin presiuni ridicate de operare - 20 - 70 bar, ajungându-se până la 100 bar, care permit temperaturi înalte de până la 1.500 - 2.000 °C. O caracteristică cvasicomună o constituie divizarea procesului în două sau mai multe etape, fie în cadrul aceleiași reactor, fie în reactoare diferite. Relativ frecvent, generatoarele sunt prevăzute cu mai multe racorduri de colectare a gazului din diferitele stadii ale procesului.

Previțiunile indică, în cazul generației a III-a, generatoare alloterme bazate pe utilizarea căldurii furnizate de reactoarele nucleare. Estimările prevăd centrale nucleare de puteri mari care vor produce parțial energie electrică și gaze combustibile, rezultate în urma gazificării cărbunilor, oferind posibilitatea stocării subterane, precum și a implementării energiei nucleare în domeniul termice /3.11/.

3.2. GAZIFICAREA CĂRBUNILOR ÎN STRAT

3.2.1. GAZIFICAREA CĂRBUNILOR ÎN STRAT LA PRESIUNE AMBIANTĂ

Gazificarea cărbunilor în strat fix sau rotativ, reprezintă soluția constructivă cea mai simplă atât în cazul generatorului cât și a instalațiilor auxiliare de preparare a cărbunelui și de tratare a gazului brut. Tehnologiile de gazificare în strat permit prelucrarea cărbunilor neaglutinanți cu granulația de 20-80 mm, utilizând ca agent de gazificare amestec de aer, aer îmbogățit, mai rar oxigen, cu abur în vederea obținerii unui gaz combustibil sărac.

Gazificarea decurge autoterm, cu circulația pe verticală, în contracurent a agentului de gazificare față de cărbune, conducând la o eficiență termică relativ ridicată. Cărbunele, introdus prin partea superioară este succesiv: preîncălzit, uscat, devolatilizat, iar semicocsul rezultat este gazificat cu abur. Suportul termic este furnizat de arderea, la baza gazogenului a cocsului rămas nereacționat. Agentul de gazificare, introdus prin partea inferioară parcurge succesiv zona de ardere, în care este consumat practic integral oxigenul. În drumul lor ascendent, amestecul de gaze rezultate ale arderii și aburului, introdus ca agent de gazificare, asigură fluxul termic necesar reacțiilor de reducere, iar odată cu scăderea temperaturii, determină descompunerea termică, uscarea și preîncălzirea cărbunelui.

Gazogenele în strat la presiune ambiantă, prezentate principal în figura 3.1, prelucrează circa 20-80 t cărbune zilnic, valori modeste, practic cu un ordin de mărime mai mic comparativ cu generatoarele primei generații. Gazogenele cele mai simple (v. fig. 3.1 a) sunt dotate la bază cu grătar fix, respectiv varianta Riley-Morgan

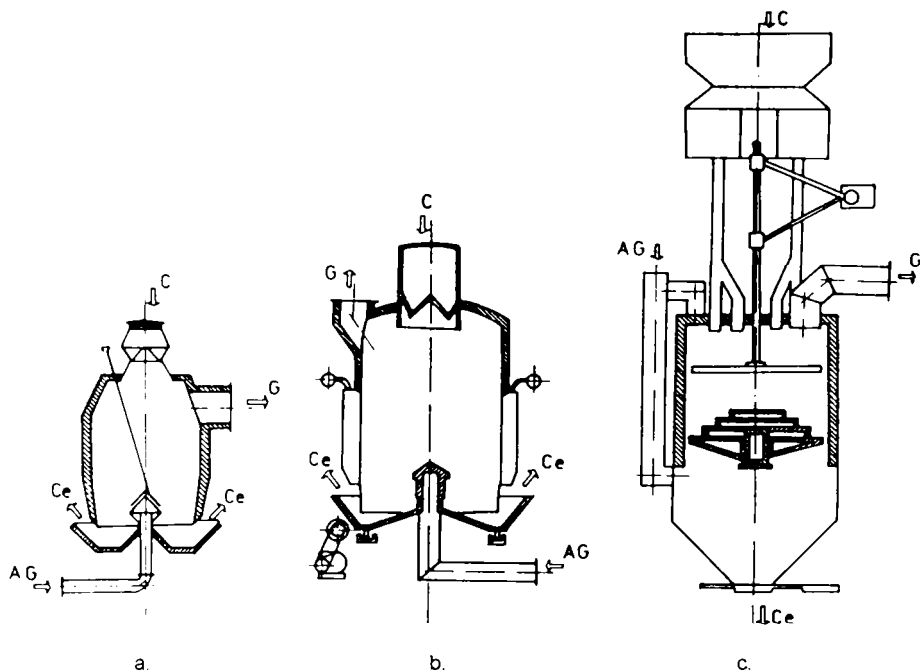


Figura 3.1. Tehnologi de gazificare în strat la presiune normală
 a. gazogen cu grătar fix; b. Ghiproang, Riley Morgan; c. Wellman-Galusha
 AG - agent gazificare; C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen

sau Ghiproang (v. fig. 3.2.b.) cu grătar rotativ, conducând la mărirea productivității generatoarelor. Specific variantei Wellman - Galusha (v. fig. 3.2.c.) este evacuarea cenușii într-un buncăr prevăzut cu ecluză. Evitarea aglomerării cărbunelui se realizează prin intermediul unui agitator care determină răscolirea acestuia. Gazul sărac produs într-un debit de circa 25.000 - 100.000 m³N/zi, are compoziția: 20 - 24 % CO, 13 - 17 % H₂, 7 - 10 % CO₂, 2 - 4 % CH₄ și puterea calorifică inferioară de 3.700 - 6.500 kJ/m³N, în cazul gazificării cu amestec de aer și abur.

Gazificarea cărbunilor în strat la presiune normală prezintă ca avantaje posibilitatea prelucrării cărbunilor neaglutinanți, evitându-se măcinarea fină a acestora, în condițiile unui randament termic satisfăcător. Dezavantajele sunt determinate de calitatea scăzută a gazului produs, prezența subprodușilor în gazul brut, productivitatea redusă, precum și dificultățile implicate de utilizarea cărbunilor slab aglutinanți sau a granulațiilor sub 5 mm.

3.2.2. TEHNOLOGII DE GAZIFICARE ÎN STRAT CU RECIRCULAREA GUDROANELOR ÎN ZONA DE COMBUSTIE

Producerea prin gazificare a unui gaz combustibil cu conținut redus de metan - utilizabil ca materie primă în chimie - respectiv fără subproduși secundari - fenoli și gudroane - este realizabilă prin prelevarea gazului direct din zona de gazificare. Gazul extras din zona superioară a gazogenului, conținând volatilele cărbunelui și subprodușii secundari este fie amestecat cu "gazul curat", după o prealabilă purificare, fie recirculat în generator în vederea descompunerii termice a gudroanelor.

Generatorul Foster - Wheeler, prezentat principal în figura 3.2, este din punct de vedere constructiv, funcțional și al succesiunii proceselor termochimice similar

gazogenului clasic în strat, cu deosebirea că permite prelevarea gazului atât în zona superioară cât și în cea mediană. Practic gazificarea este o combinație între piroliza cărbunelui - desfășurată în partea superioară a generatorului - și gazificarea cocsului cu abur - desfășurată în zona inferioară.

Testele efectuate în cadrul Universității Minnesota, la Duluth, arată că în cazul gazificării cu aer și abur a unui cărbune cu analiza elementară: 85,92 % C^a, 7,92 % H^a, 4,18 % O^a, 1,05 % N^a, 0,22 % S^a, 0,11 % A^a și 0,6 % W^a, rezultă un gaz combustibil cu compoziția: 29-30 % CO^{anh}, 14-16 % H₂^{anh}, 2,6-3 % CH₄^{anh}, 3-4 % CO₂^{anh}, 47,6-51,4 % N₂^{anh}. Randamentul termic global în cazul gazului fierbinte, ținând cont de subprodușii secundari, este de 85-93 %, respectiv în cazul gazului rece, fără gudroane de 69-76 % [3.12].

Firma Kohlegas - Nordrhein a dezvoltat gazificarea în strat la presiune atmosferică pentru obținerea unui gaz fără gudroane prelevat direct din zona de gazificare, construind în 1979 la Huckelhoven o stație pilot cu capacitatea de prelucrare a unei tone de cărbune.

Generatorul K.G.N., prezentat în figura 3.3, este practic similar gazogenului Foster - Wheeler, cu deosebirea că gazul rezultat din zona de devolatilizare și prelevat la partea superioară este recirculat în zona de gazificare. Prin introducerea gudroanelor în zona de combustie sau gazificare, la temperaturi de 700 - 900 °C, are loc cracarea practic completă a acestora, rezultând un gaz lipsit de subprodușii secundari. Datorită acestui avantaj, procedeul se pretează la producerea de gaz de sinteză, utilizabil ca materie primă în chimie, sau de gaz combustibil sărac fără efecte negative importante asupra mediului ambiant.

3.2.3. GAZIFICAREA CĂRBUNELUI ÎN STRAT SUB PRESIUNE

Gazificarea sub presiune în generatorul Lurgi este un procedeu autoterm, în strat, care se desfășoară în contracurent la presiuni de 20 - 35 bar, permițând prelucrarea cărbunilor neaglutinanți, în vederea obținerii de gaze combustibile utilizabile energetic sau pentru sinteza. Tehnologia de gazificare Lurgi a fost dezvoltată de firma germană Lurgi Mineraloltehnick GmbH în perioada anilor '20 - '30, devenind comercială spre

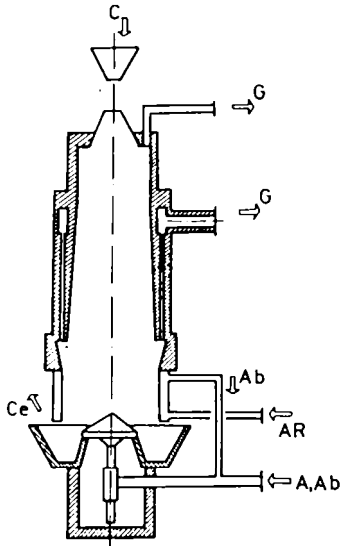


Figura 3.2 Generatorul Foster - Wheeler
A - aer Ab - abur. AR - apă de răcire.
C - cărbune. Ce - cenușă. G - gaz de gazogen

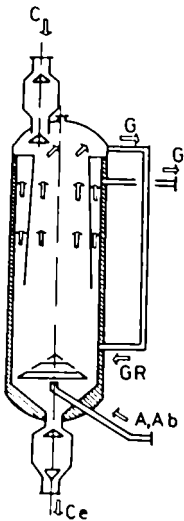


Figura 3.3 Generatorul K.G.N.
A - aer Ab - abur C - cărbune.
Ce - cenușă G - gaz de gazogen.
GR - gaz recirculat

sfârșitul anilor '30. Actualmente se construiesc generatoare Lurgi tipul Mark IV, având diametrul interior de 3.850 mm, care permite producerea unui debit orar de gaz de 60.000 m³N, acestea echipând instalațiile Sasol I și Sasol II - Republica Africa de Sud - în vederea obținerii pe baza sintezei Fischer - Tropsch, a benzinei sintetice. Varianta Mark V are diametrul interior de 4.700 mm, având capacitatea de prelucrare orara a 75 t cărbune, în vederea producerii a 100.000 m³N gaz. În S.U.A., instalația denumită Great Plains utilizând generatoare Lurgi produce zilnic 3.900.000 m³N gaz de sinteză. De menționat, cele 5 generatoare Lurgi Mark V care echepează termocentrala de 170 MW de la Lunen, unde s-a experimentat arderea sub presiune a gazului și ciclul mixt de producere a energiei electrice.

Generatorul Lurgi, prezentat în figura 3.4 este un recipient cilindric vertical, cu manta dublă, fiind pre-văzut în partea superioară cu sistemul cu ecluza dublă de intrare a cărbunului și cu racorul de colectare a gazului brut. La baza gazogenului este amplasat grătarul rotativ, care permite evacuarea cenușii prin intermediul unei ecluze duble și racordul de admisie a agentului de gazificare. În interior, generatorul este prevăzut cu un sistem rotativ de amestecare care permite distribuția uniformă a cărbunului pe suprașea și evita-rea aglomerării [3.13].

Cărbunele cu granulația 6 - 40 mm, circulă în contracurent cu agentul de gazificare, respectiv gazul brut, fiind succesiv preîncălzit, uscat, devolatilizat la 450 - 750 °C și apoi gazificat cu abur la temperaturi de 700 - 850 °C, procesul desfășurându-se la presiuni de 20 - 35 bar. Fluxul termic necesar proceselor endoterme este furnizat de arderea

fracțiunii nereacționate a cocsului, într-o zonă redusă de combustie, situată la baza reactorului. Agentul de gazificare: amestec de aer, aer îmbogățit sau oxigen cu abur

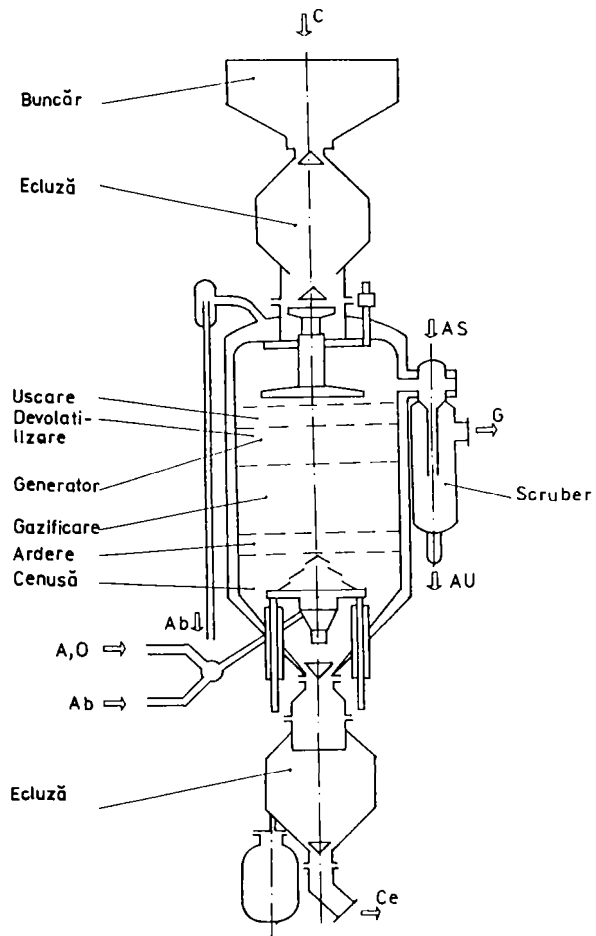


Figura 3.4. Generatorul Lurgi

A - aer; Ab - abur; AS - apă de spălare; AU - apă uzată; C - cărbune
Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; O - oxigen

este introdus la bază, prin fantele grătarului, gazul de gazogen fiind colectat la partea superioară a generatorului.

Principali parametri funcționali ai procedurii Lurgi sunt prezentați în tabelul 3.1

Avantajele tehnologiei Lurgi sunt determinate de gradul ridicat de conversie al carbonului datorită reziduurilor reduse de cocs nereacționat, în condițiile unui randament termic ridicat. De asemenea, generatorul Lurgi permite productivități ridicate corespunzător unității de volum a reactorului, gazul rezultat, relativ bogat în metan nu necesită tratamente ulterioare costisitoare.

Actualele tendințe de dezvoltare ale procedurii Lurgi elimină principalele deficiențe determinate de necesitatea pretratării cărbunilor aglutinanți precum și necesitatea măririi sortului granulometric al cărbunelui. De asemenea, modificările aduse își propun diminuarea consumului de abur, debitul acestuia fiind determinat de menținerea cenușii sub temperatura de înmuiere, precum și de mărirea productivității generatorului prin creșterea presiunii de operare.

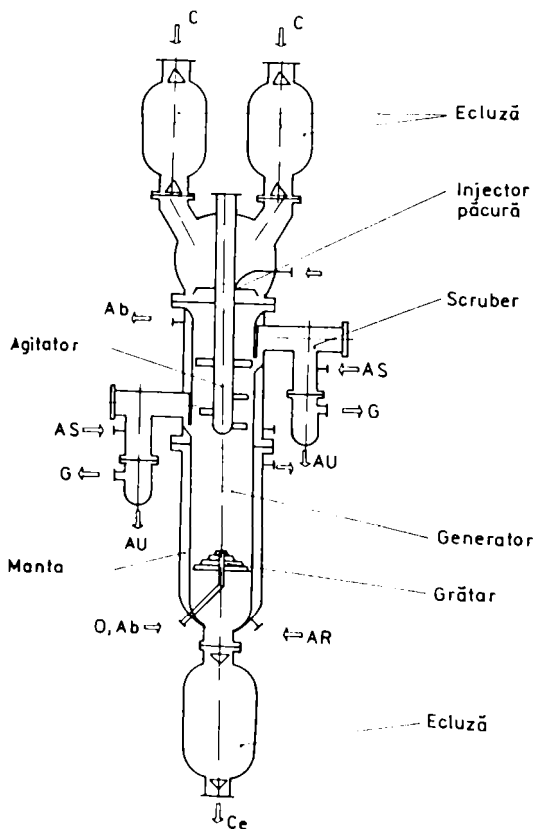


Figura 3.5 Generatorul Lurgi - Ruhr 100

Ab - abur AR - apă răcire, AS - apă de spălare, AU - apă uzată
C - cărbune, Ce - cenușă, G - gaz de gazogen, O - oxigen

colectarea unui gaz de calitate, lipsit de gudroane, la temperaturi de circa 800 °C, respectiv cel de-al doilea racord amplasat în partea superioară colectează gazul

Generatorul Lurgi-Ruhr 100, bazat pe principiile tehnologiei Lurgi, reprezintă dezvoltarea acesteia prin mărirea presiunii de operare până la 100 bar, în scopul majorării productivității, fiind rezultatul colaborării firmelor Ruhrgas A.G., Ruhrkohle A.G. și Steag A.G., pe baza experienței firmelor Lu.g. Mineraloltechnik GmbH. În 1979 la Dorsten a fost pus în funcție generatorul Lurgi-Ruhr 100 având diametrul de 1.500 mm și capacitatea de prelucrare orară a 10 t cărbune. În perioada 1979 - 1981 s-au efectuat pilotări la medie presiune și începând din 1982 presiunea de operare a fost ridicată la 100 bar.

Generatorul Lurgi - Ruhr 100, prezentat în figura 3.5, are ca principale modificări constructive față de varianta clasică, dotarea cu 2 prize de colectare a gazului și un agitator rotativ care evită aglomerarea cărbunelui și asigură recircularea în zona de gazificare a cocsului nereacționat. Racordul de gaze de reducere amplasat deasupra zonei de gazificare permite

rezultat din devolatilizarea cărbunelui la temperaturi de 300 - 650 °C, care conține gudroane și fenoli /3.14/.

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	VALORI		
			LURGI		B.G.L.
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE					
1.	Cărbune				
2.	- debit	kg/h	50.000		600
3.	- granulație	mm	3 - 30		4-6
4.	- compoziție - C	%	70,8 ¹		40,6 ²
5.	- H	%	3,0 ¹		6,9 ²
6.	- S	%	--		8,8 ²
7.	- N	%	--		0,5 ²
8.	- O	%	5,2 ¹		44,7 ²
9.	- W	%	5,7 ¹		--
10.	- A	%	15,0 ¹		6,2 ²
Agent de gazificare					
11.	- debit aer	kg/m ³ N gaz	0,714	--	--
12.	- debit oxigen	kg/m ³ N gaz	--	0,2	0,23
13.	- debit abur	kg/m ³ N gaz	0,65	1,05	0,15
PARAMETRII MĂRIMILOR IEȘITE					
14.	Gaz de generator				
15.	- debit anhidru	m ³ N/kg car	2,85	2,13	1,74
16.	- compoziție CO ^{anh}	%	13,75	21,5	54,4
17.	- H ₂ ^{anh}	%	24,3	38,0	28,5
18.	- CO ₂ ^{anh}	%	18,36	28,5	10,5
19.	- N ₂ ^{anh}	%	35,56	--	0,1
20.	- H ₂ S ^{anh}	%	1,0	1,0	0,1
21.	- CH ₄ ^{anh}	%	7,03	11,0	6,1
22.	- C ₂ H ₆ ^{anh}	%	--	--	0,3
23.	- putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	6.890	10.770	12.190
24.	Prođuși secundari				
25.	- gudroane	kg/h	2.900		28
26.	- uleiuri uşoare	kg/h	1.300		--
27.	- uleiuri mijlocii	kg/h	635		--
28.	- fenoli	kg/h	400		--
29.	Carbon nereacționat	%	4,5 - 6,5		--

Tabelul 3.1. Principalii parametrii funcționali și de compoziție ai tehnologiei Lurgi și British - Gas - Lurgi; ¹ - proba inițială, ² - combustibil anhidru

Tehnologia de gazificare Lurgi - Ruhr 100 permite obținerea unui gaz brut cu compoziția: 30-34 % H₂, 21-23 % CO, 16-18 % CH₄ și urme de H₂S și N₂, rezultând o eficiență a conversiei termice a cărbunelui de 81-83 %, în condițiile dublării productivității specifice a generatorului.

Principalul dezavantaj al generatorului Lurgi constă în consumul ridicat de abur - raportul abur/oxigen 6-10 m³N/m³N - al agentului de gazificare determinat de obligativitatea menținerii cenușii sub punctul de înmuiere. Întrucât cea mai mare parte

624.124/136

a aburului se regăsește nereacționat în gazul brut, aceasta influențează în mod defavorabil randamentul termic global al instalației.

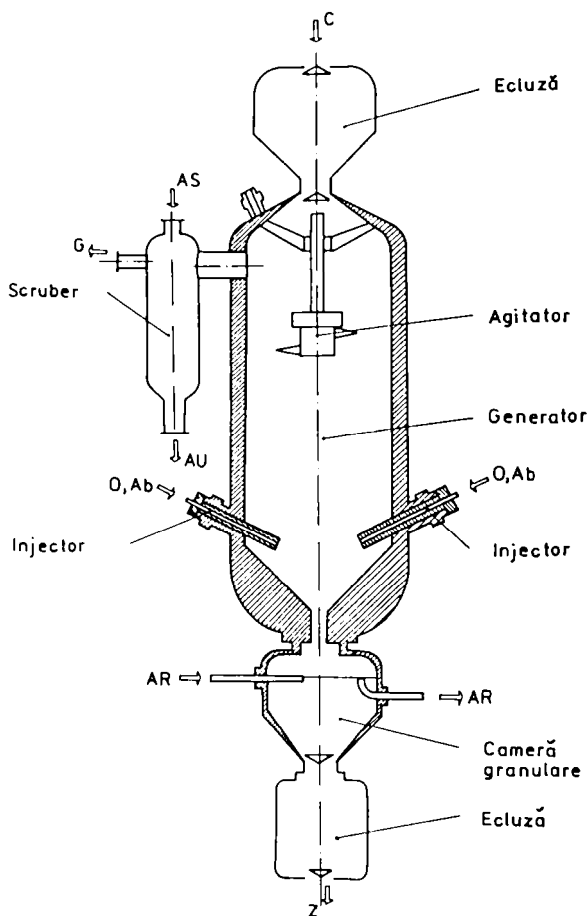


Figura 3.6 Generatorul British - Gas - Lurgi
 Ab - abur, AS - apă de spălare; AU - apă uzată; C - cărbune
 G - gaz de gazogen, O - oxigen, Z - zgură

Bazat pe principiul gazificării Lurgi, British - Gas - Corporation, a dezvoltat procedeul prin reducerea raportului abur/oxigen la circa $1 \text{ m}^3 \text{N/m}^3 \text{N}$, ceea ce determină ridicarea temperaturii din zona

... punctul de topire al cenușii, permițând totodată prelucrarea cărbunilor aglutinanți. Ca rezultat al cercetărilor, British - Gas - Corporation a construit în anii '60 un pilot ... zilnică de prelucrare a 100 t cărbune, u.mat. de realizarea în 1974 la Westfield a unui generator cu baie de zgură topită, având diametrul interior de 1.800 mm și capacitatea zilnică de prelucrare a 350 t cărbune. Din 1984 a fost pus în funcție un generator cu capacitatea zilnică de prelucrare a 500 t cărbune.

Generatorul

Lurgi cu baie de zgură topită, prezentat în figura 3.6, este din punct de vedere constructiv similar variantei clasice, cu modificările aferente sistemului de evacuare a cenușii topite și a sistemului de insuflare a agentului de gazificare la presiuni de 25 bar. În consecință, generatorul este dotat în zona de combustie cu mai multe ajutaje care permit insuflarea agentului de gazificare - amestec de oxigen și abur, iar la bază este prevăzut cu racordul de evacuare a zgurii în stare lichidă, urmat de camera de răcire și ecluza dublă. Temperaturile ridicate de peste $1.250\text{-}1.300 \text{ }^\circ\text{C}$ determină topirea cenușii care cade într-o baie de apă, fiind evacuată sub formă granulară. Recircularea gudroanelor asigură cracarea termică a acestora reducându-se subprodusii secundari, respectiv recircularea particulelor antrenate conduce la creșterea gradului de conversie al carbonului [3.15, 3.16].

Principalii parametri ai tehnologiei de gazificare Lurgi cu baie de zgură topită precum și compoziția cărbunelui și a gazului produs sunt prezentați în tabelul 3.1.

Utilizarea băii de zgură topită determină principalele avantaje ale procedurii constând în posibilitatea prelucrării cărbunilor aglutinanți fără pretratament, reducerea considerabilă a consumului de abur și a cantității de subprodusi secundari, în condițiile măririi productivității pe unitatea de suprafață transversală a generatorului.

3.3. GAZIFICAREA CĂRBUNILOR ÎN PAT FLUIDIZAT

Bazele gazificării cărbunilor în pat fluidizat au fost puse de procedeul Winkler, a cărui dezvoltare a permis elaborarea procedurii Hochtemperatur - Winkler și o mare diversitate a soluțiilor constructive dintre care sunt prezentate tehnologiile caracteristice. Specific gazificării în pat fluidizat este caracterul autoterm în condițiile unei siguranțe ridicate în exploatare, a unui control facil al fluxurilor materiale și termice precum și o productivitate specifică ridicată.

3.3.1. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE WINKLER ȘI HOCHTEMPERATUR-WINKLER

Procedeul în pat fluidizat Winkler permite gazificarea autotermă a cărbunilor neaglutinanți la presiune atmosferică și temperaturi de circa 800 - 900 °C, în cazul cărbunilor bruni, respectiv până la 1000 °C pentru hule, în mătate de punctul de înmuiere al cenușii.

Procedeul în pat fluidizat a fost brevetat în 1922 de F. Winkler, prima instalație pilot fiind construită la Leuna în 1928, utilizând ca agent de gazificare amestec de oxigen cu abur pentru obținerea unui gaz fără azot, necesar sintezei amoniacului. Începând din anii '60, două generatoare Winkler, cu o producție orară de 17.000 m³N gaz brut fiecare, funcționează la Wesseling în cadrul Union-Kraftstoff.

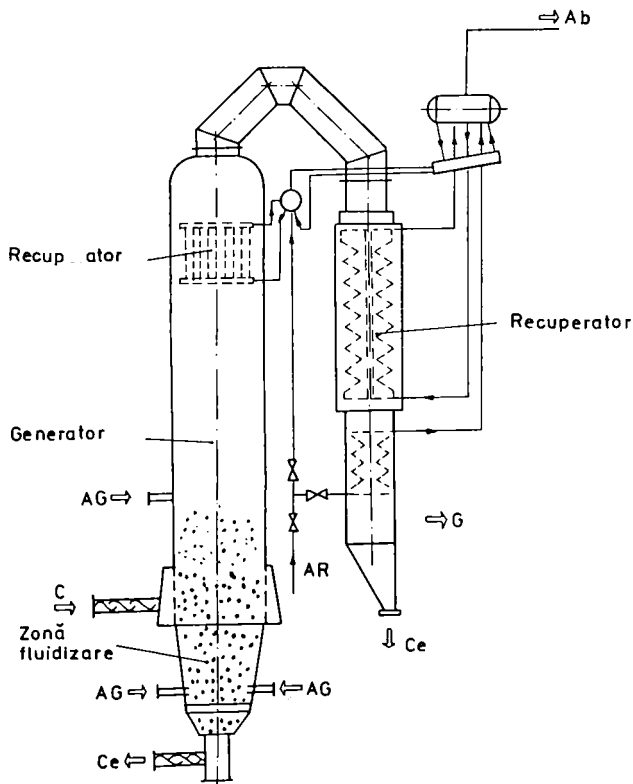


Figura 3.7. Generatorul Winkler

Ab - abur; AG - agent de gazificare; AR - apă de răcire;
C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen

Generatorul Winkler, prezentat în figura 3.7, este practic un recipient cilindric vertical în care prin intermediul unui șneac transportor se introduce în partea superioară cărbunele având granulația de 0-10 mm. Agentul de gazificare, amestec de aer sau oxigen cu abur determină fluidizarea particulelor, fiind insuflat în diferite zone ale reactorului. Frațiunea cu ponderea cea mai mare este insuflată la bază în vederea fluidizării și implicit a amestecului intim al reactanților. De asemenea, are loc vederea fluidizării și implicit a amestecului intim al reactanților. De asemenea, are loc vederea fluidizării și implicit a amestecului intim al reactanților. De asemenea, are loc vederea fluidizării și implicit a amestecului intim al reactanților.

Principali parametri de compoziție și energetici ai gazificării în strat fluidizat prin procedeul Winkler sunt prezentați în tabelul 3.2.

Eliminarea principalelor deficiențe ale procedurii Winkler a condus la re proiectarea gazogenului pentru presiuni de 10 bar, implicând majorarea temperaturii la 1.000-1.100 °C, rezultând procedeul Hochtemperatur - Winkler. Rheinische Braunkohlewerke A.G. în colaborare cu politehnica din Aachen, începând din 1965 au efectuat experimentări preliminare care au arătat că adaosul de calcar, piatră de var sau dolomită permite

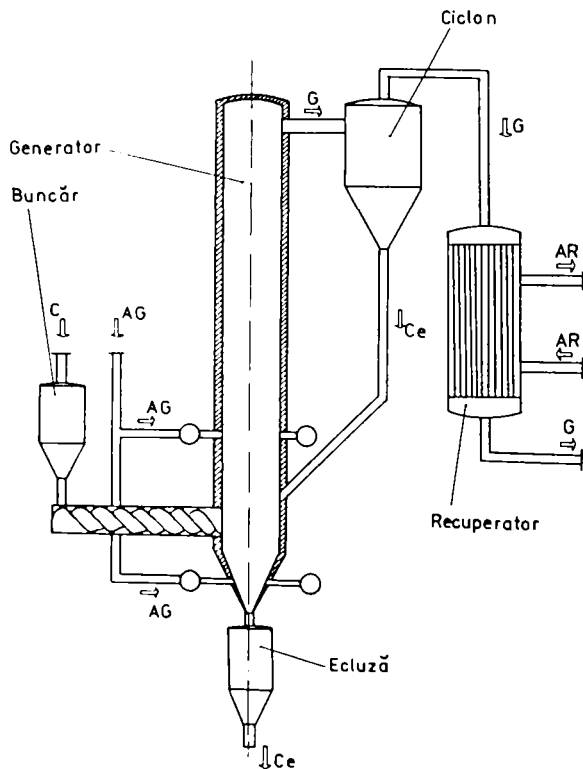


Figura 3.8 Generatorul Hoch-Temperatur-Winkler
 AG - agent de gazificare, AR - apă de răcire, C - cărbune,
 Ce - cenușă G - gaz de gazogen

ridicarea unctului de înmuiere al cenușii făcând posibilă utilizarea patului fluidizat la temperaturi de 1.000-1.100 °C, eventual mai ridicate, precum și reținerea în cenușă a sulului din cărbune. Pilotarea instalației experimentale H.T.W. de la Aachen cu capacitatea orară de 50 kg cărbune a determinat construirea de către firma Uhde a stației pilot cu un consum de 1,3 - 2 t/h la Frenchen, funcțională din vara anului 1978. Bazat pe experiența câștigată, Rheinische Braunkohlewerke a decis construirea la Berrenrath a unei instalații demonstrative cu un consum orar de 30 t cărbune, funcțională din 1885, ...mată de alte 3 instalații demonstrative, gazul brut fiind utilizat la sinteza amoniacului.

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE - VALORI				
			WINKLER	U - GAS	SYNTHANE ¹		
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE							
1.	Cărbune - debit	kg/h	13.755	360	780	2.410	2.450
2.	- granulatie	mm	6	6	6	--	--
3.	- compoziție C ¹	%	59,2	68,8	69,6	66,4	68,1
4.	- H ¹	%	3,8	4,1	4,4	4,4	5,0
5.	- S ¹	%	0,3	3,7	3,0	0,9	3,8
6.	- N ¹	%	0,5	1,1	1,2	1,0	1,2
7.	- O ¹	%	19,9	7,9	6,7	15,9	9,1
8.	- W ¹	%	8,0	3,9	3,1	--	--
9.	- A ¹	%	8,3	10,5	12,0	11,4	12,8
10.	Putere calorifică inferioară	kJ/kg	21.500	28.590	29.160	27.880	29.440
11.	Agent de gazificare - aer	m ³ N/m ³ N gaz	--	0,395	--	--	--
12.	- oxigen	m ³ N/m ³ N gaz	0,245	--	0,240	0,78	0,62
13.	- abur	m ³ N/m ³ N gaz	0,245	0,195	0,780	1,45	1,18
14.	Agent pretratament - oxigen	kg/kg carb.	--	--	--	--	0,08
15.	- abur	kg/kg carb.	--	--	--	--	1,48
PARAMETRII MĂRIMILOR IEȘITE							
16.	Gas de generator - debit	m ³ N/h	21.000	2.000	2.200	3.200	3.450
17.	- compoziție CO ^{anh}	%	41,2	18,8	26,0	18,49	20,73
18.	- H ₂ ^{anh}	%	35,9	16,4	43,0	59,14	48,48
19.	- CO ₂ ^{anh}	%	17,4	10,9	26,9	--	--
20.	- N ₂ ^{anh}	%	1,5	52,9	0,6	--	--
21.	- H ₂ S ^{anh}	%	0,2	--	--	--	--
22.	- CH ₄ ^{anh}	%	3,8	1,0	3,5	22,37	30,79
23.	Putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	10.700	4.520	9.210	16.700	17.730
24.	Eficiență conversie - carbon	%	89-91	92	89-92	65-80	65-80
25.	- gazificare	%	76	--	--	--	--
26.	- termică	%	84	--	--	--	--

Tabelul 3.2 Parametrii de compoziție și energetici ai tehnologiei Winkler, U-Gas și Synthane; ¹ compoziție gaz purificat de CO₂, H₂S, N₂.

3.3.2. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE U - GAS

Tehnologia de gazificare U - GAS este un procedeu autoterm în pat fluidizat care permite prelucrarea unei game mari de cărbuni în vederea obținerii unui gaz combustibil mijlociu fără, subprodusi secundari, desfășurându-se la presiuni de 25 bar și temperaturi de 950-1050 °C. Institute of Gas Technology a construit în 1974 la Chicago instalația pilot cu capacitatea orară de 1 t cărbune, urmată în 1986 de realizarea unei stații pilot demonstrative de dimensiuni industriale cu capacitatea zilnică de 2.800 t cărbune la Shelby County.

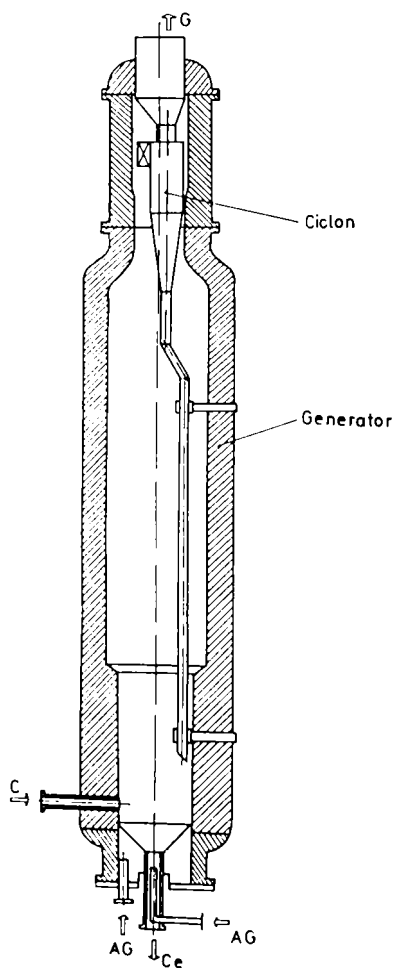


Figura 3.9 Generatorul U - GAS
AG - agent de gazificare, C - cărbune,
Ce - cenușă, G - gaz de generator

Generatorul U - GAS, prezentat în figura 3.9, este un recipient cilindric vertical (diametru interior 900 mm, înălțimea 7.600 mm), dotat la bază cu un grătar conic, iar în zona superioară cu un ciclon interior prevăzut cu racordul de colectare al gazului brut. Gazificarea cărbunilor se desfășoară în pat fluidizat, într-un singur stadiu sub acțiunea agentului de gazificare - amestec de aer sau oxigen cu abur - care constituie totodată și mediul de fluidizare, permițând aglomerarea și implicit separarea cenușii. Agentul de gazificare este insuflat la baza reactorului, atât prin zona centrală de evacuare a cenușii cât și prin zona laterală a sistemului conic de fluidizare. Frațiunea insuflată prin zona centrală, datorită vitezei sale, determină străpungerea patului fluidizat, formându-se "jgheabul" de descărcare a cenușii. Datorită raportului aer sau oxigen/abur temperatura adiacentă este superioară restului patului fluidizat, depășind limita de înmuiere a cenușii. Aceasta determină aglomerarea particulelor de cenușă, ceea ce conduce la evacuarea cenușii cu un conținut de maxim 1 % carbon nereacționat [3.20, 3.21].

Principalii parametri energetici și de compoziție ai tehnologiei de gazificare U-GAS sunt prezentați în tabelul 3.2.

Tehnologia de gazificare U - GAS este caracterizată de gradul ridicat de conversie al carbonului datorat de aglomerare a cenușii, de posibilitatea prelucrării tuturor tipurilor de cărbuni, indiferent de ponderea particulelor fine în vederea obținerii unui gaz brut lipsit de subprodusi secundari.

3.3.3. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE CATALITICĂ EXXON (C.C.G.)

Procedul de gazificare Exxon permite, pe baza catalizatorilor de săruri slab acide de metale alcaline, gazificarea cărbunilor în vederea obținerii unui gaz cu conținut ridicat de metan, care în urma separării criogenice a oxidului de carbon și a hidrogenului reprezintă un substitut de gaze naturale.

Cercetările preliminare efectuate în perioada 1976 -1978 de Exxon Research and Engineering Company, s-au axat pe 2 direcții, pe de-o parte, analiza aspectului chimic al gazificării și posibilitățile recuperării catalizatorului precum și studiul cinetic al proceselor. În consecință, s-a construit o instalație experimentală de dimensiuni reduse, iar pe baza experienței câștigate s-a realizat, în perioada 1978-1981 la Dayton, un pilot cu capacitatea zilnică de prelucrare a 1 t cărbune, urmată de construcția instalației de dimensiuni industriale, în 1982 la Rotterdam, având capacitatea zilnică de prelucrare a 20 t cărbune.

Schema instalației pilot, prezentată în figura 3.10, cuprinde generatorul în pat fluidizat, instalația de desprăfuire, purificare și separare criogenică a metanului precum și instalația de recuperare a catalizatorului. Generatorul este un reactor în pat fluidizat cu diametrul de 250 mm și înălțimea de 36 m, necesară măririi duratei de

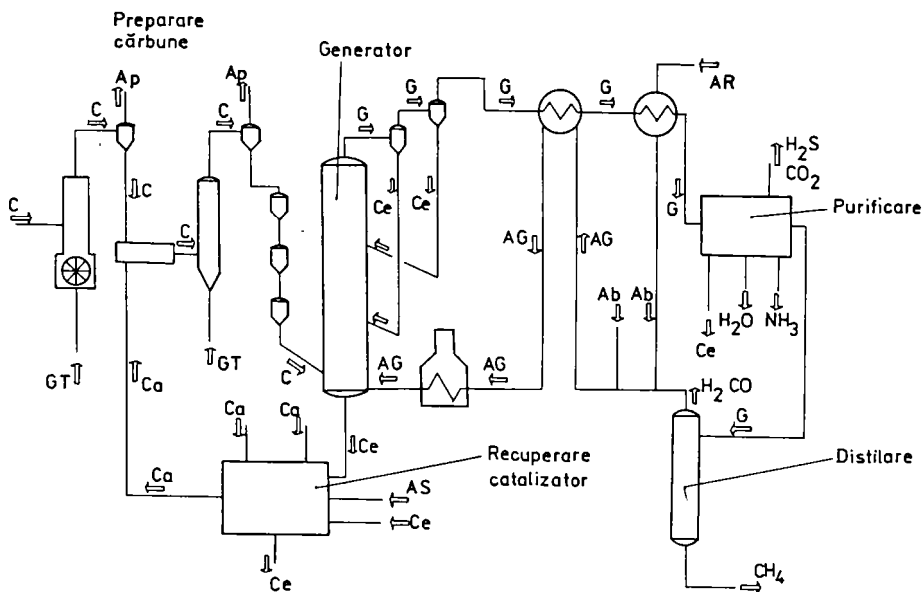


Figura 3.10. Tehnologia de gazificare catalitică Exxon

Ab - abur; AG - agent de gazificare; AR - apă de răcire; AS - apă de spălare; C - cărbune;
Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; GT - gaz de transport

staționare a particulelor de cărbune la circa 10 ore, prevăzut în interior cu distribuitorul agentului de gazificare - amestec de abur cu hidrogen și oxid de carbon, recirculat din gazul brut - care totodată este și mediu de fluidizare. Datorită catalizatorului din carbonat de potasiu, carbonul reacționează cu aburul la temperaturi relativ scăzute 650 - 750 °C, și presiuni de 35 bar, rezultând oxid de carbon și hidrogen, care formează în continuare metan și bioxid de carbon. Alimentarea cărbunelui fin măcinat în amestec cu catalizatorul (15-20 %) se face la baza patului fluidizat, în timp ce recircularea particulelor reținute de cicloane se efectuează la diferite nivele ale generatorului, conducând la un grad de conversie al carbonului de

circa 90 %. Gazul brut colectat la partea superioară a reactorului are un conținut ridicat de metan, circa 40 %, care după separarea criogenică permite obținerea substitutului de gaze naturale conținând circa 99,9 % metan, conform parametrilor de compoziție prezentați în tabelul 3.3 /3.22/.

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	COMPOZIȚIA GAZULUI			
			CH ₄	CO	H ₂	N ₂
1.	Gaz brut ¹	%	41	12	45	4
2.	Gaz după separare	%	99,9	0,1	--	--
3.	Gaz de recirculare	%	10	18	66	6

Tabelul 3.3 Compoziția gazului brut, substitutului de gaze naturale și a gazelor recirculate; ¹ - anhidru și purificat de H₂S, NH₃, CO₂

Tehnologia de gazificare catalitică Exxon permite obținerea de substitut de gaze naturale, practic metan în condiții avantajoase determinate de acțiunea catalizatorului, gazul brut fiind lipsit de subproduși secundari, ceea ce simplifică considerabil instalația de tratare a acestuia.

3.3.4. PROCEDEUL DE GAZIFICARE TRI - GAS

Procedeul de gazificare Tri-Gas este un procedeu autoterm în pat fluidizat, utilizând orice calitate de cărbuni, caracterizat prin faptul că procesele termochimice sunt separate în 3 etape distincte realizabilă în 3 reactoare înseriate, ale căror corelare permite conducerea procesului spre producții finali doriți.

Pilotul experimental construit de Bituminos Coal Research Incorporation începând din 1975, prezentat schematic în figura 3.11, este compus din 3 reactoare

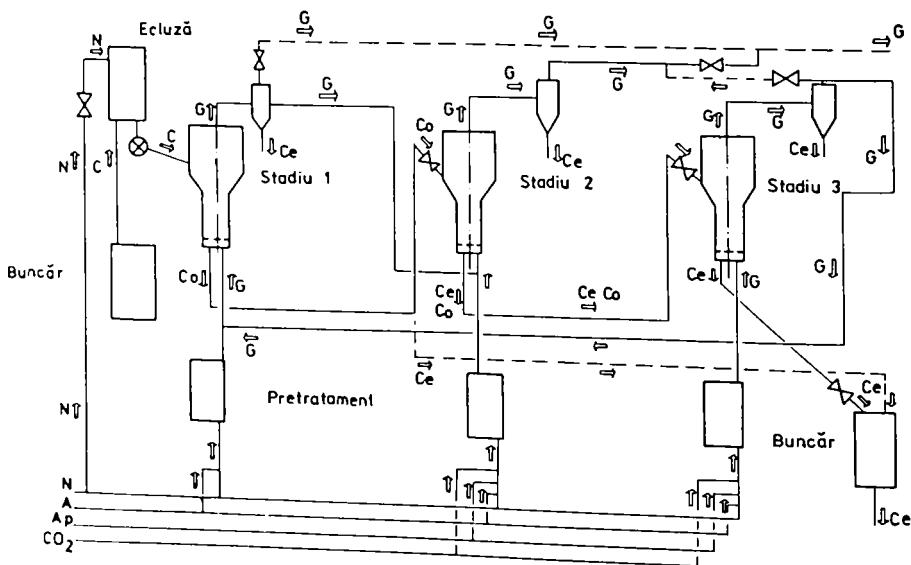


Figura 3.11. Tehnologia de gazificare TRI - GAS
 A - aer Ap - apă, C - cărbune, Ca - catalizator, Ce - cenușă, Co - cocs; G - gaz de gazogen; N - azot

În pat fluidizat, relativ similare din punct de vedere constructiv, fiecare având un rol funcțional distinct. Reactoarele sunt recipiente cilindrice verticale prevăzute la bază cu o grilă din oțel refractar având orificii de insuflare a mediului de fluidizare. Reactoarele sunt prevăzute în zona mediană, adiacentă patului fluidizat, cu racordul de acces al cărbunelui, semicocsului sau amestecului de cenușă cu cocs, în zona inferioară cu racordul de evacuare al cenușii, situat în centrul grilei de insuflare, respectiv în zona superioară cu racordul de colectare a gazului brut.

Procesul global, desfășurat la presiuni de 18 bar, cuprinde în prima etapă pretratarea cărbunelui până la temperaturi de 350-600 °C pe baza aportului termic al gazului rezultat din cel de-al treilea reactor. Semicocsul rezultat este gazificat la temperaturi de circa 1.100 °C, în cel de-al doilea reactor cu amestec de aer cu abur și cu gazul brut rezultat din devolatilizarea desfășurată în primul reactor. Amestecul de cenușă cu cocsul rămas nereacționat este gazificat în continuare în cel de-al treilea reactor sub acțiunea amestecului de aer sau oxigen cu abur, în vederea obținerii conversiei practic totale a carbonului /3.23/.

Principalele avantaje ale procedurii Tri-Gas constau în conversia practic integrală a cărbunelui, indiferent de calitatea sa, precum și în flexibilitatea și controlul facil al procesului prin divizarea gazificării în cele 3 etape.

3.3.5. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE SYNTHANE

Tehnologia de gazificare Synthane este un procedeu auto-term în pat fluidizat care se desfășoară la temperaturi de 800 - 850 °C și presiuni de 40-70 bar, utilizând cărbuni neaglutinanți sau aglutinanți, după tratarea prealabilă a acestora, în vederea obținerii unui gaz combustibil mediu fără subproduși secundari.

Pittsburg Research Center a construit în 1976 la Bruceton, pilotul cu capacitatea orară 2-3 t cărbune, prezentat schematic în figura 3.12. Pretratamentul cărbunelui, realizat în instalația anexă a generatorului la temperaturi de 400-450 °C reduce tendințele de aglutinare ale acestuia, fiind însoțit de degajarea volatilelor și oxidarea superficială a particulelor de cărbune. Generatorul este practic un recipient cilindric vertical, având diametrul interior de 1.500 mm și înălțimea de 30 m, cuprinzând în partea superioară, reactorul de gazificare și la bază zona de răcire a cenușii. Partea inferioară, care reprezintă reactorul propriu-zis, permite fluidizarea cărbunelui prin insuflarea agentu-

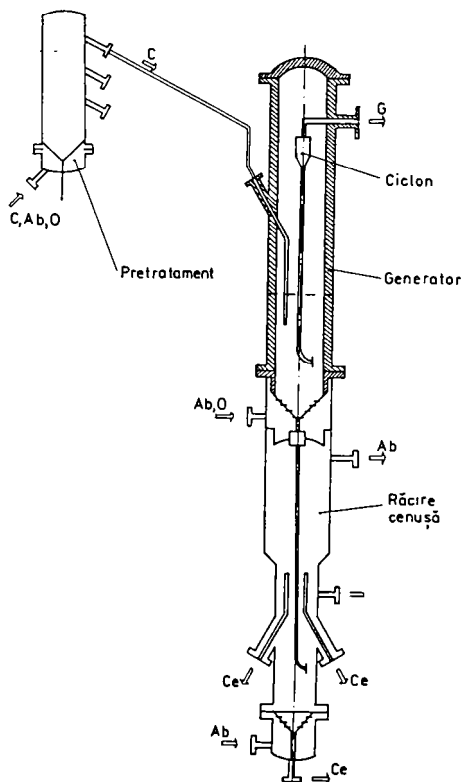


Figura 3.12. Generatorul Synthane
Ab - abur; C - cărbune; Ce - cenușă;
G - gaz de gazogen; O - oxigen

lui de gazificare - amestec de oxigen cu abur, gazul brut fiind colectat în partea superioară a generatorului prin intermediul unui ciclon interior, care permite recircularea particulelor antrenate. În interiorul reactorului are loc combustia unei fracțiuni din cărbunele introdus în vederea acoperirii necesarului termic al gazificării. Cenușa este descărcată prin centrul părții inferioare a reactorului intrând în zona de răcire cu abur, după care este evacuată la baza generatorului /3.24/.

Principalii parametri energetici și de compoziție ai tehnologiei Synthane sunt prezentați în tabelul 3.2.

Principalul avantaj al procedurii Synthane constă în posibilitatea prelucrării oricărei calități de cărbune în vederea obținerii unui gaz mediu cu conținut relativ ridicat de metan, având ca inconvenient gradul redus de conversie al carbonului cu efecte defavorabile asupra eficienței termice globale.

3.4. TEHNOLOGII DE GAZIFICARE ÎN PAT ANTRENAT

3.4.1. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE KOPPERS-TOTZEK ȘI VARIANTELE DERIVATE

Tehnologia Koppers-Totzek permite gazificarea în pat antrenat a prafului de cărbune sub acțiunea amestecului de aer sau oxigen cu abur, la presiune ambientă și temperaturi înalte, care determină topirea cenușii. Primul generator realizat de firma H. Koppers GmbH în 1939 a fost urmat de prima instalație de dimensiuni cvasiindustriale din Finlanda în 1952, având producția orară de 5.000 m³N gaz brut.

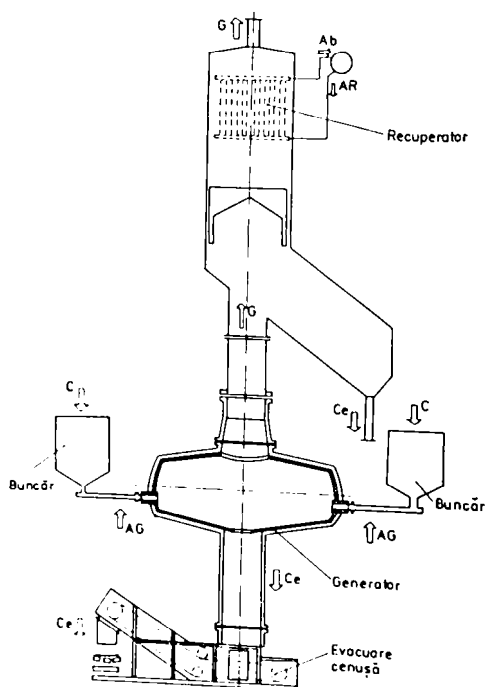


Figura 3.13 Tehnologia Koppers - Totzek
Ab-abur AG-agent de gazificare AR - apă de răcire
C - cărbune Ce - cenușă G - gaz de gazogen

Gazogenul, prezentat principal în figura 3.13, este practic în recipient cilindric, prevăzut în partea superioară cu racordul de colectare a gazului brut, respectiv la bază cu racordul de evacuare a zgurii topite. Intrarea pulberii de cărbune, cu granulația sub 0,1 mm în amestecul cu agentul de gazificare se realizează prin 2, respectiv 4 arzătoare dispuse diametral opus. La ieșirea din arzătoare are loc arderea pulberii de cărbune până la consumul total al oxigenului, determinând temperaturi de circa 1.300 - 1.500 °C, în unele zone până la 2.000 °C, ceea ce conduce la topirea cenușii și aglomerarea picăturilor de zgură care sunt evacuate prin racordul inferior al generatorului. Cocsul nereacționat împreună cu bioxidul de carbon, rezultă în urma arderii și aburul, introdus ca agent de gazificare, accede prin racordul superior într-un recuperator vertical unde, odată cu scăderea temperaturii se obțin condițiile necesare desfășurării proceselor endoterme de gazificare /3.25/.

Principalii parametri funcționali și de compoziție corespunzători procedurii de gazificare Koppers - Totzek, la presiune normală, sunt prezentați în tabelul 3.4.

Avantajele tehnologiei de gazificare Koppers - Totzek sunt determinate de temperatura ridicată de operare, care permite gazificarea în condiții de eficiență ridicată a oricărui tipuri de cărbuni în vederea producerii de gaze combustibile lipsite de hidrocarburi și subproduși secundari, gaz utilizabil ca materie primă în chimie.

Tehnologia de gazificare Shell - Koppers se bazează pe principiul gazogenului Koppers - Totzek, reprojctat în vederea gazificării la presiuni de 30 - 40 bar și temperaturi de 1.700 - 2.000 °C, ceea ce permite conversia practic completă a carbonului. Procedul a fost pus la punct ca urmare a colaborării din perioada 1974-1981 dintre Krupp - Koppers GmbH, care a furnizat principiul generatorului la presiune normală și experiența dobândită de Shell Internationale Petroleum în gazificarea sub presiune a șteiului. În 1976 la Amsterdam s-a construit un pilot cu capacitatea de prelucrare zilnică a 6 t cărbune, urmat de pilotul industrial de la Hamburg cu capacitatea zilnică de prelucrare a 150 t cărbune. Generatorul este practic similar constructiv și funcțional cu varianta clasică Koppers - Totzek, cu modificările implicate de presiunea ridicată de operare de 30-40 bar, conducând la temperaturi de 1.700 - 2.000 °C, în unele zone chiar mai mari. Principalii parametri ai procedurii Shell - Koppers sunt prezentați în tabelul 3.4 /3.26, 3.27/.

Tehnologia de gazificare Prenflo reprezintă o etapă evolutivă a procedurii Koppers - Totzek în scopul mării capacității specifice a gazogenului prin creșterea presiunii de operare. Procedul a fost pus la punct de Krupp - Koppers prin construirea unui pilot cu capacitatea zilnică de prelucrare a 48 t cărbune, urmat de generatorul standard cu capacitatea zilnică de 1.000 t cărbune, care va fi pus la punct spre sfârșitul anilor '90. Gazogenul, prezentat schematic în figura 3.14, este un

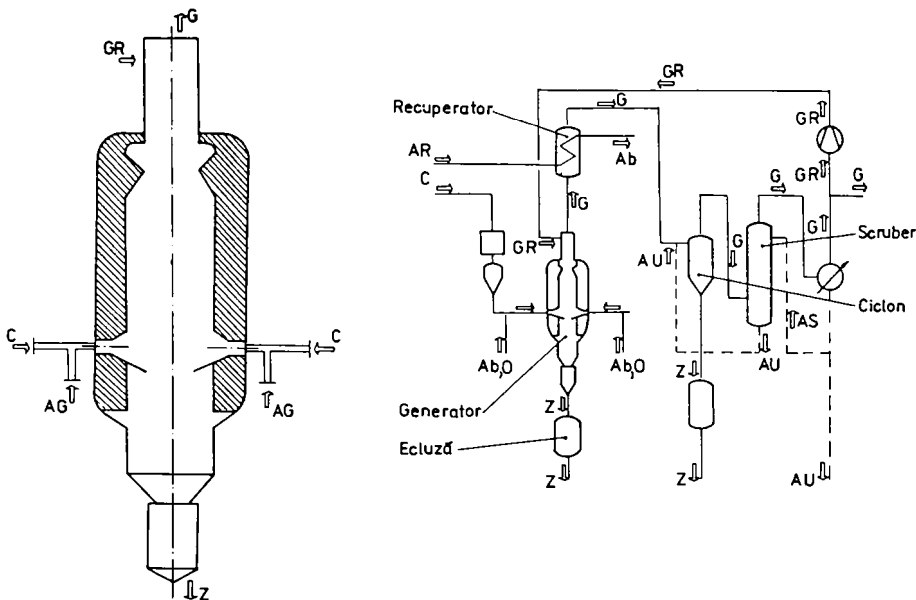


Figura 3.14. Tehnologia de gazificare Prenflo

Ab - abur; AG - agent de gazificare; AR - apă de răcire; AS - apă de spălare; AU - ape uzate;
C - cărbune; G - gaz de gazogen; GR - gaz recirculat; O - oxigen; Z - zgură;

recipient cilindric vertical cu manta dublă de răcire, spațiul tubular permițând producerea aburului necesar gazificării. Funcționarea generatorului este similară gazogenelor Koppers - Totzek, respectiv Shell - Koppers, ținând cont de efectul presiunii ridicate de operare. Un element deosebit al instalației complexe de gazificare consta în recircularea particulelor antrenate și a apei uzate prin pulverizarea acestora în curentul de gaz fierbinte în ciclon, ceea ce conduce la eliminarea uscată a particulelor de zgură antrenate /3.28, 3.29/.

Nr crt.	PARAMETRII	U.M.	VALORI			
			K. - T.	S. - T.	S. - O.	TEXACO
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE						
1	Cărbune - debit	kg/h	25.000	6.000	11.000	6.900
2.	- granulație	mm	0,1	0,09	3	0,09
3.	- compoziție C	%	63,6 ⁱ	74,7 ^a	72,8 ^a	85,4 ^{anh}
4.	- H	%	4,4 ⁱ	5,0 ^a	4,7 ^a	4,0 ^{anh}
5.	- S	%	3,5 ⁱ	1,4 ^a	1,4 ^a	0,8 ^{anh}
6.	- N	%	1,0 ⁱ	1,5 ^a	1,6 ^a	1,6 ^{anh}
7.	- O	%	8,8 ⁱ	8,9 ^a	9,0 ^a	2,6 ^{anh}
8.	- W	%	12,0 ⁱ	0,5 ^a	2,0 ^a	0,0 ^{anh}
9.	- A	%	6,7 ⁱ	8,0	8,5 ^a	5,6 ^{anh}
10.	Putere calorifică	kJ/kg	25.800	31.470	28.800	33.860
11.	Agent gazificare - oxigen	kg/kg car	1-1,1	1,1	1,0	0,8
12.	- abur	kg/kg car	0,4-0,45	0,09	0,4	0,35
PARAMETRII MĂRIMILOR IEȘITE						
13.	Gaz de generator - debit	m ³ N/kg car	2,0	2,0	2,1	11.200
14.	-compoziție CO ^{anh}	%	59,4	65,1	54,0	46
15.	- H ₂ ^{anh}	%	28,2	25,6	31,4	34
16.	- CO ₂ ^{anh}	%	10,1	8,1	13,2	19
17.	- N ₂ ^{anh}	%	1,8	0,8	0,8	0,6
18.	- H ₂ S ^{anh}	%	0,4	0,4	0,4	0,3
19.	- CH ₄ ^{anh}	%	0,1	--	0,2	0,1
20.	Putere calorifică	kJ/m ³ N	10.650	11.045	10.400	9.560
21.	Eficiență - conversie C	%	--	99,0	99,5	98-99
22.	- gazificare	%	72	77,5	73	72
23.	- termică	%	86	94,5	88-94	90

Tabelul 3.4 Parametrii energetici și de compoziție ai tehnologiilor de gazificare în pat antrenat: procedeul Koppers-Totzek, Shell-Koppers, Saarberg-Otto, Texaco

3.4.2. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE SAARBERG - OTTO

Procedeul de gazificare Saarberg - Otto utilizează un generator în pat antrenat, permițând prelucrarea unei game calitative și granulometrice largi de cărbune, deasupra unei băi de zgură topită care conduce la temperaturi înalte de

circa 1.600 - 2.400 °C și presiuni de 25 bar. Procedul se bazează pe generatorul Rummel - Otto, la presiune normală, realizat la Wesseling în 1950, dezvoltat de firma Dr. C. Otto împreună cu Saarberg A.G. prin realizarea în 1979, la Volkingen-Furstenhausen, a unei instalații demonstrative cu capacitatea orară de 11 t cărbune și o producție de gaz brut de 22.800 m³N/h.

Generatorul Saarberg - Otto, prezentat în figura 3.15, este practic un recipient cilindric vertical cu diametrul interior de 1.400 mm, divizat constructiv și funcțional în 3 zone: camera de topire, zona de gazificare și cea de răcire. Camera de topire, amplasată la bază este în contact cu baie de zgură topită, deasupra căreia prin 4 ajutaje se insuflă amestecul cărbunelui (granulație sub 3 mm) cu agentul de gazificare format din oxigen, mai rar aer îmbogățit, și abur. Deasupra băii de zgură topită are loc arderea cărbunelui până la epuizarea completă a oxigenului, ceea ce conduce la temperaturi de 1.650-2.400 °C, precum și gazificarea particulelor de cocs cu vaporii de apă. Trecerea spre zona superioară este marcată de o strangulare, care permite reținerea particulelor grosiere de zgură și cocs în vederea gazificării complete a acestora. Amestecul trifazic format din gaze, zăbură și cocs urcă în zona mediană a reactorului unde la temperaturi de circa 1.200 - 1.600 °C se desfășoară reacția Boudouard și reacția omogenă și heterogenă de gazificare. În partea superioară a reactorului se insuflă gaz brut. Pentru a evita solidificarea picăturilor de zgură, evitându-se depunerea ulterioară pe tubulatura instalației de tratare a gazului brut /3.30, 3.31/.

Principalii parametri energetici și de compoziție ai procedului Saarberg - Otto sunt prezentați în tabelul 3.4.

Avantajele procedului Saarberg - Otto sunt determinate de utilizarea băii de zgură topită care face posibilă temperaturile ridicate de reacție conferind posibilitatea gazificării particulelor relativ mari de cărbune, ceea ce conduce la diminuarea sensibilă a cheltuielilor de preparare a acestuia, determinând o productivitate specifică ridicată a gazogenului.

Principali similare sunt și procedeele de gazificare în baie de fier topit, în stadiu de cercetare, caracterizate prin desfășurarea gazificării la suprafața băii de fier topit la temperaturi de 1.350 - 1.450 °C și presiuni variind între cea atmosferică și 10 bar. În principiu, gazul produs conține după tratament doar oxid de carbon și hidrogen, circa 99 %, practic fără compuși ai sulfului și subprodusi secundari /3.32/.

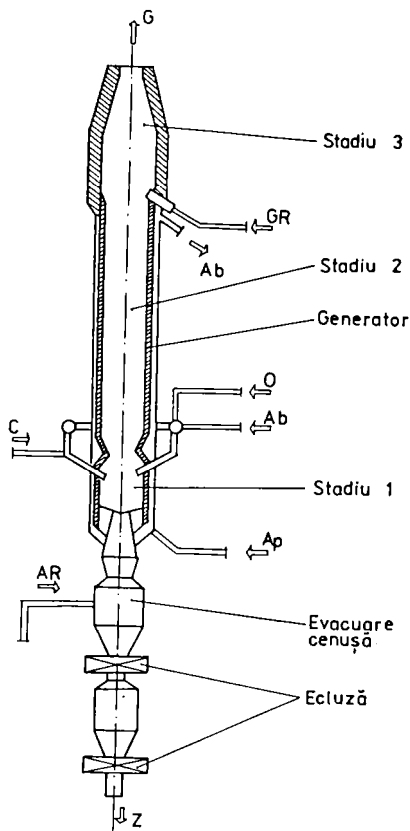


Figura 3. 15. Generatorul Saarberg-Otto
 Ab - abur; Ap - apă; AR - apă de răcire
 C - cărbune; G - gaz de gazogen;
 GR - gaz recirculat; O - oxigen; Z - zgură

3.4.3. TEHNOLOGIA DE GAZIFICARE TEXACO și VARIANTA R.A.G.-R.C.H.

Caracteristica procedurii Texaco constă în gazificarea suspensiei de cărbune fin măcinat cu apă, la presiuni de 20-80 bar și temperaturi de 1.300-1.500 °C, utilizând ca agent de gazificare oxigenul și aburul rezultat în urma vaporizării umidității suspensiei și eventual, ca moderator termic, exces de abur. Procedul dezvoltat inițial pentru gazificarea fracțiunilor grele de petrol, a condus la construirea de către Texaco, la Montebello a 2 gazogene cu capacitatea zilnică de prelucrare a 15-20 t cărbune. Ruhrkohle A.G. (R.A.G.) și Ruhrchemie (R.C.H.), în colaborare cu Texaco Development Corporation au decis dezvoltarea procedurii prin realizarea în 1978 a unui pilot la Oberhausen - Holten, care permite gazificarea zilnică a 150 t cărbune, la presiuni de până la 40 bar în vederea obținerii a 10.000 m³N/h gaz. Succesele au determinat construirea la Muscle Shoals a unui generator similar, respectiv Texaco și Southern California Edison au realizat la Barstow o centrală termoelectrică de 90 MW, pe baza ciclului mixt, utilizând gazul produs de instalația Texaco cu capacitatea zilnică de prelucrare a 1.000 t cărbune.

Generatorul Texaco, prezentat schematic în figura 3.16, este practic un

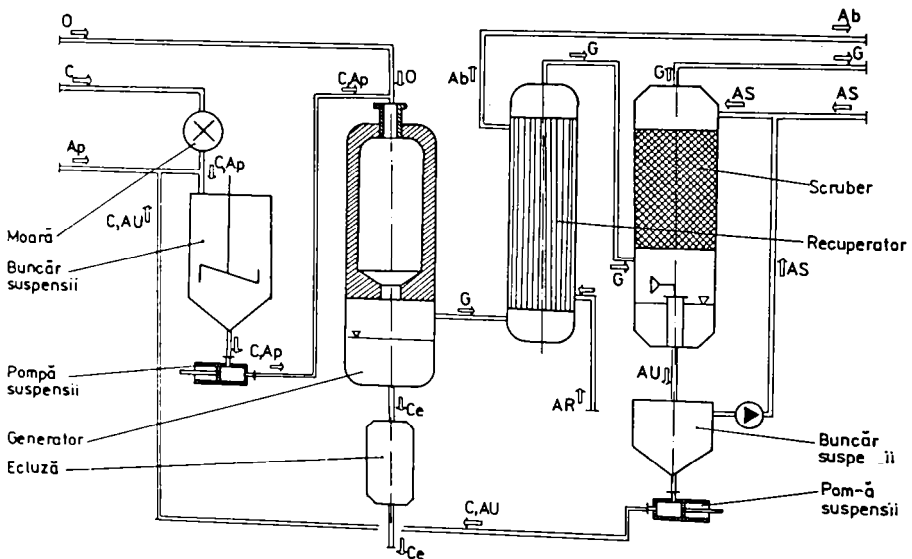


Figura 3.16 Tehnologia de gazificare Texaco, varianta R.A.G.-R.C.H.
 Ab - abur, Ap - apă, AR - apă recirculată, AS - apă de spălare, AU - apă uzată;
 C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; O - oxigen;

recipient cilindric vertical conținând în partea superioară camera de reacție și la bază baia de granulare a zgurii. Cărbunele fin măcinat având granulația sub 0,09 mm în suspensie cu apă este introdus în generator prin partea superioară, prin intermediul unui arzător special care permite amestecul intim al suspensiei cu oxigenul necesar arderii. În camera de reacție la temperaturi de 1.300 - 1.500 °C și presiuni de 20-80 bar are loc uscarea și arderea parțială a cărbunelui, până la consumarea integrală a oxigenului. Arderea oferă suportul termic al proceselor endoterme de gazificare, în

timp ce vaporizarea umidității asigură necesarul de abur pentru reacția omogenă și heterogenă de gazificare /3.33, 3.34, 3.35/.

Principalii parametri energetici și de compoziție ai gazificării Texaco, în varianta R.A.G./R.C.H. sunt prezentați în tabelul 3.4.

Avantajele tehnologiei Texaco determinate de temperatura și presiunea ridicată de operare precum și recircularea particulelor antrenate constau în calitatea gazului produs lipsit de hidrocarburi superioare și subprodusi secundari, în condițiile unui grad ridicat de conversie al carbonului.

3.5. GENERAȚIA A III-A DE GENERATOARE

Conform previziunilor generația a III-a de generatoare este caracterizată prin procedee alloterme bazate pe utilizarea fluxului termic produs de reactoarele nucleare de temperaturi ridicate. Dezvoltarea procedeeelor de gazificare pe baza energiei nucleare a început în 1978 în Germania în cadrul proiectului Prototypanlage Nukleare Prozesswärme. Cercetarea s-a axat pe procedeele de gazificare și hidrogazificare a cărbunilor pentru obținerea substitutului de gaze naturale și în vederea dezvoltării reactorului nuclear de temperaturi ridicate cu toriu.

Rezultatele incurajatoare au permis realizarea la Essen a unui pilot, prezentat schematic în figura 3.17, care permite gazificarea cărbunilor în pat fluidizat pe baza

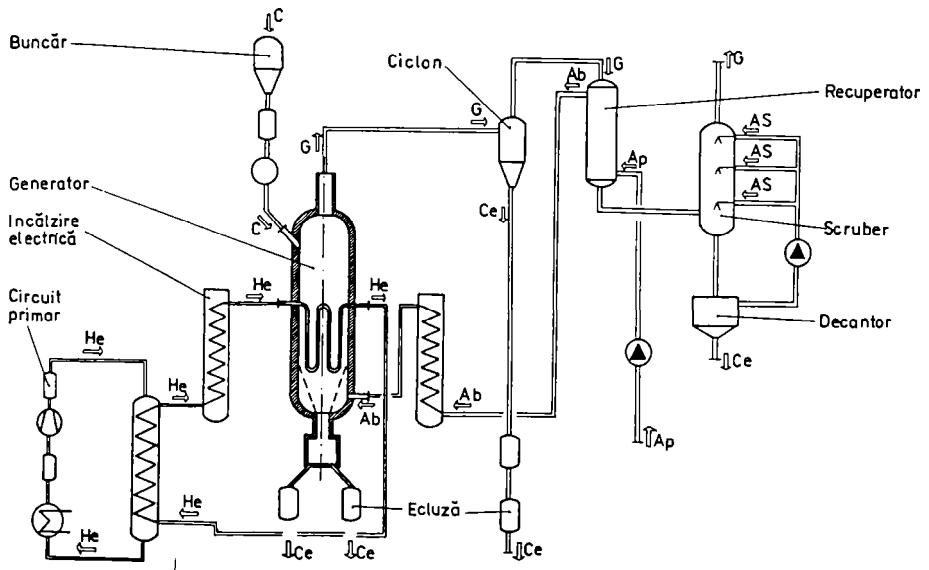


Figura 3.17. Instalație pilot de gazificare a cărbunilor pe baza energiei nucleare

Ab - abur, Ap - apă; AS - apă de spălare; C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; He - heliu

energiei nucleare, simulate prin încălzirea electrică a heliului. Reactorul cu secțiune rectangulară de 800 x 900 mm și înălțimea de circa 4 m, este prevăzut în partea superioară cu racordul de colectare al gazului brut, în lateral cu cel de acces a cărbunelui (granulatia 0,5 mm), respectiv la bază cu sistemul de fluidizare de formă conică care permite, prin centru, evacuarea cenușii într-un buncăr cu ecluză dublă. Cărbunele este inițial semicocsificat la temperaturi de 450-550 °C și ulterior gazificat cu abur la temperaturi de 800-820 °C, pe baza fluxului termic furnizat de fasciculul de serpentine din interiorul generatorului /3.36, 3.37, 3.38, 3.39/.

Principalii parametri de compoziție și energetici ai gazificării cărbunilor în pat fluidizat cu abur sunt prezentați în tabelul 3.5.

PARAMETRII DE INTRARE	U.M.	VALORI	PARAMETRII DE IEȘIRE	U.M.	VALORI
Cărbune - debit	kg/h	200	Gaz de generator - debit ^{anh}	m ³ N/h	175
- granulație	mm	0,5-1	-compoziție H ₂ ^{anh}	%	59
-compoziție C ^a	%	73,8	- CO ^{anh}	%	20
- H ^a	%	4,5	- CO ₂ ^{anh}	%	18
- S ^a	%	2,7	- CH ₄ ^{anh}	%	3
- N ^a	%	1,8	Putere calorifică	kJ/m ³ N	10.000
- O ^a	%	7,2	EFICIENȚA GAZIFICĂRII	%	95 - 97
- W ^a	%	4,0			
- A ^a	%	6,0			
Putere calorifică	kJ/kg	30.670			
Agent gazificare - abur	kg/kg car	3,2			

Tabelul 3.5 Parametrii energetici și de compoziție ai gazificării cărbunilor pe baza aportului energiei nucleare.

Principalul avantaj al gazificării cărbunilor pe baza aportului termic al energiei nucleare constă în eliminarea fracțiunii de cărbune ars, cu efecte directe în calitatea gazului brut produs. Aceste procedee prezintă interes major în țări ca Germania unde pretul cărbunelui este dublu față de energia nucleară.

3.6. CERCETĂRI AUTOHTONE PRIVIND GAZIFICAREA CĂRBUNILOR

Prin prisma utilizării raționale a cărbunilor, în vederea înlocuirii produselor ce anterior se obțineau din țiței sau gaze naturale cât și în vederea diminuării impactului cărbunilor asupra mediului ambiant, s-au accentuat cercetările autohtone axate pe gazificarea cărbunilor în strat și în pat fluidizat.

3.6.1 CERCETĂRI PRIVIND GAZIFICAREA CĂRBUNILOR ÎN STRAT

În cadrul I.C.S.I.T.E.E. București a fost analizată posibilitatea gazificării în strat la presiune normală a ligniților autohtoni în gazogene cu grătar rotativ, practic prin aplicarea variantelor Ghiproang sau Riley - Morgan. Pe baza cercetărilor efectuate începând din 1983 a fost proiectat și construit, în vederea testărilor un gazogen cu grătar rotativ având diametrul interior de 1.200 mm, care a dat satisfacție. Experiența câștigată a permis proiectarea gamei de gazogene având diametrul interior de: 1.200 - 1 500 - 2 600 - 3 600 mm și sarcini utile în domeniul: 0,5 - 3,5 Gcal/h, funcție de calitatea cărbunelui prelucrat /3.40, 3.41, 3.42/.

Gazogenele cu grătar rotativ la presiune normală, caracterizate prin simplitatea constructivă a gazogenului și a instalațiilor auxiliare necesare pregătirii cărbunelui și tratării gazului brut. permit prelucrarea cărbunilor neaglutinanți cu granulația cuprinsă în domeniul 10 - 120 mm, divizat în mai multe sorturi granulometrice. Ca agent de gazificare s-a utilizat amestecul de aer, mai rar aer îmbogățit, cu abur, rezultând un gaz sărac cu puteri calorifice de 5.000 - 5.850 kJ/m³N.

Principalii parametri de compoziție și funcționali ai testelor efectuate în cadrul I.C.S.I.T.E.E București sunt prezentați în tabelul 3.6.

În cadrul SIETA (I.C.S.I.T.E.E.) Cluj-Napoca a fost proiectată și realizată o instalație pilot complexă de gazificare a cărbunilor în strat sub presiune, în vederea analizei posibilităților aplicării tehnologiei Lurgii la ligniții autohtoni. Instalația pilot, prezentată în figura 3.18, constă dintr-un complex de utilaje destinat îndeplinirii următoarelor funcții tehnologice: descărcarea, stocarea, sortarea și dozarea ligniților, producerea aburului și a agentului, gazificarea sub presiune, răcirea și purificarea gazului, precum și prelucrarea subprodușilor secundari. Gazogenul este principal similar generatorului Lurgi având diametrul interior de 750 mm, utilizând ca agent de gazificare amestec de aer, aer îmbogățit, eventual oxigen cu abur /3.43/.

Rezultatele testărilor efectuate la presiuni de 5-7-9 bar utilizând ligniți de Voivozi și Rovinari și cărbune brun de Borozel sunt prezentate în tabelul 3.6.

Concluziile cercetărilor indică performanțele energetice ale gazificării ligniților autohtoni la presiune ambiantă și sub presiune, subliniind posibilitatea utilizării pe scară largă a tehnologiilor de gazificare în strat.

3.6.2. CERCETĂRI AUTOHTONE PRIVIND GAZIFICAREA CĂRBUNILOR ÎN PAT FLUIDIZAT

În cadrul I.C.S.I.T.E.E București s-au efectuat cercetări la nivel de laborator și pe un pilot de dimensiuni semi-industriale în vederea gazificării ligniților autohtoni în pat fluidizat la presiune normală, conform procedurii Winkler. În paralel, s-a realizat un pilot în vederea gazificării în pat fluidizat la presiuni de până la 10 bar, utilizând ca agent de gazificare amestec de oxigen cu abur.

Pe baza testelor efectuate la nivel de laborator, s-a realizat un pilot cu sarcina de 0,1-0,2 Gcal/h, urmat de generatorul cu sarcina de 0,5 Gcal/h. Generatorul este un recipient cilindric vertical constând, la bază, din camera de reacție cu diametrul de 500 mm și în partea superioară din zona de destindere având diametrul de 1.500 mm. Generatorul este prevăzut, deasupra zonei de reacție cu racordul de alimentare a

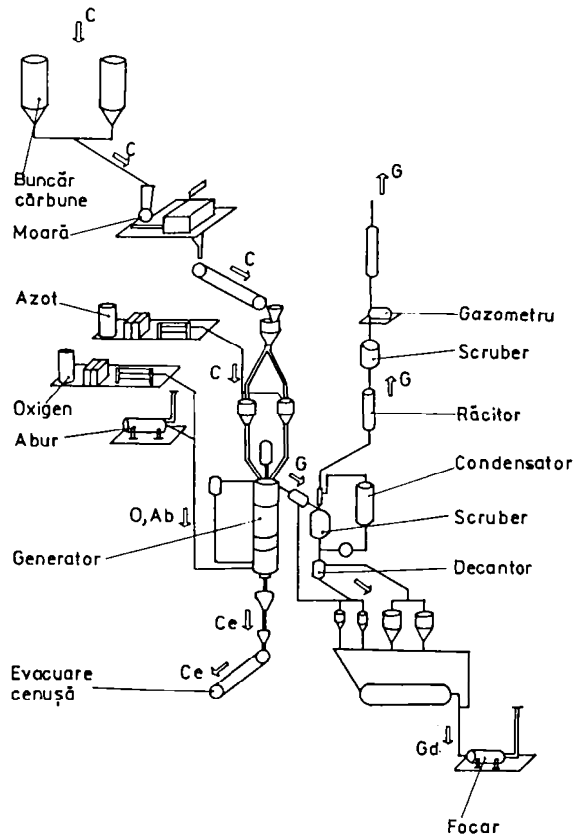


Figura 3.18. Schema instalației pilot de gazificare Lurgi
Ab - abur; C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen
Gd - gudroane; O - oxigen

cărbunelui, prin intermediul unui șnec, cu racordul de recirculare a particulelor separate din gazul brut, precum și priza secundară de insuflare a agentului de gazificare. La bază, generatorul este prevăzut cu racordul de acces a agentului de gazificare prin intermediul sistemului de fluidizare, respectiv în zona centrală cu racordul de evacuare a cenușii. În partea superioară a gazogenului este dispus racordul de colectare al gazului brut /3.44, 3.45, 3.46/.

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	VALORI EXPERIMENTALE			
			presiune normală ¹		7 ²	9 ²
1.	Presiunea de operare	bar	presiune normală ¹		7 ²	9 ²
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE						
2.	Cărbune - debit	kg/h	180	350	210	140
3.	- granulație	mm	5-30	14-40	10 - 30	
4.	- compoziție C ¹	%	25,84		24,72	
5.	H ¹	%	2,34		2,24	
6.	S ¹	%	2,0		1,21	
7.	N ¹	%	0,42		0,55	
8.	O ¹	%	11,3		11,39	
9.	W ¹	%	43,6		43,78	
10.	A ¹	%	14,5		16,11	
11.	- putere calorifică inf.	KJ/kg	8.560		8.900	
12.	Agent gazificare - aer	kg/h	167,9	353,3	160	85
13.	- oxigen	kg/h	--	--	--	6
14.	- abur	kg/h	22,5	43,9	63	50
PARAMETRII MARIMILOR IEȘITE						
15.	Gaz de gazogen - debit	m ³ N/h	205,7	463,1	250	150
16.	- compoziție CO ^{anh}	%	21,0	23,5	18,5	19,8
17.	H ₂ ^{anh}	%	15,0	14,0	17,7	19,5
18.	CO ₂ ^{anh}	%	10,6	8,0	10,5	12,5
19.	O ₂ ^{anh}	%	0,2	0,2	1,6	1,6
20.	N ₂ ^{anh}	%	48,2	51,2	49,9	44,5
21.	CH ₄ ^{anh}	%	4,0	2,6	1,8	2,1
22.	C _m H _n ^{anh}	%	0,6	0,2	--	--
23.	H ₂ S ^{anh}	%	0,4	0,3	--	--
24.	- putere calorifică inf.	KJ/m ³ N	6.150	5.610	4.910	5.380
25.	- nereactionate cenușa	%	24	20	14	11,8
26.	- gudroane	kg/h	3,24	5,25	18,3	14,5
27.	Eficiență gaz cald	%	72,0	76,0	65,6	64,9
28.	Eficiență gaz cald+gud.	%	75,2	78,3	69,8	69,2
29.	Randament termic	%	72,3	75,3	88,2 ³	88,2 ³

Tabelul 3.6 Parametrii de compoziție și energetici ai gazificării ligniților autohtoni în strat - ¹ experimentari I.C.S.I.T.E.E. București, ² experimentari SIETA (I.C.S.I.T.E.E.) Cluj-Napoca, ³ valori determinate teoretic conform posibilităților de optimizare

Testările experimentale efectuate la presiune normală au permis proiectarea și realizarea unui pilot care permite gazificarea ligniților autohtoni în pat fluidizat la presiuni de 10 bar - conform procedurii Hochtemperatur Winkler. Constructiv, pilotul

este similar variantei la presiune normală cu modificările impuse de majorarea presiunii de operare. Analiza setului datelor experimentale a evidențiat posibilitatea obținerii unui combustibil gazos de calitate cu puteri calorifice de circa $9.800 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, în condițiile unui randament termic de 69 - 73 %.

Concluzia cercetării relevă că gazificarea ligniților autohtoni în pat fluidizat reprezintă o premiera mondială, impunându-se necesitatea optimizării proceselor prin preîncălzirea agentului de gazificare și uscarea prealabilă a cărbunelui.

3.7. CONCLUZII

Stadiul actual al gazificării cărbunilor indică preocupările intense depuse în acest domeniu în vederea valorificării superioare a cărbunilor cu scopul de a transfera combustibililor solizi o parte din proprietățile combustibililor lichizi sau gazoși. Utilizarea pe scară industrială a tehnologiilor de gazificare sau hidrogazificare a cărbunilor este determinată, pe de-o parte de reducerea impactului asupra mediului ambiant, comparativ cu soluția clasică bazată pe arderea cărbunilor. De asemenea, ținând cont de faptul că rezervele de cărbune sunt sensibil mai mari comparativ cu cele de țiței și gaze naturale, pe termen mediu apare ca probabilă utilizarea hidrocarburilor sintetice în energetică, chimie, siderurgie sau alte sectoare industriale.

Analiza stadiului actual scoate în evidență eforturile materiale, investiția de materie primă cenușie și ingeniozitatea inginerescă depuse în vederea optimizării tehnologiilor clasice sau a creerii de procedee noi.

Direcțiile de dezvoltare a tehnologiilor de gazificare a cărbunilor, din punctul de vedere al funcționalității generatorului constau în: utilizarea pe cât posibil integrală a întregii game calitative a cărbunelui, majorarea parametrilor de operare - temperatură și presiune, desfășurarea proceselor termochimice complexe în două sau mai multe etape - în cadrul aceluiași generator divizat în interior sau în reactoare diferite. Scopul fundamental constă în creșterea gradului de conversie al carbonului, mărirea productivității specifice a generatorului, precum și în flexibilitatea procesului în vederea conducerii acestuia spre producții finali doriți.

De o importanță deosebită, în dezvoltarea și implicat în adoptarea tehnologiilor de gazificare o constituie cerințele referitoare la calitatea gazului brut produs - determinantă fiind utilizarea ulterioară a acestuia, precum și caracteristicile cărbunilor disponibili. Caracteristicile cărbunilor, relevante din punctul de vedere al gazificării sunt redate de: analiza elementară, puterea calorică, structura chimică - reactivitatea, structura petrografică, tendințele aglutinante și proprietățile tehnologice.

Conținut ridicat de balast - umiditate și masă minerală necombustibilă - a ligniților autohtoni influențează negativ eficiența procedeele clasice de gazificare, determinând totodată dificultăți în stabilitatea și operarea gazogenelor. De asemenea, este cvasiobligatorie uscarea inițială a ligniților, ținând cont de necesități tehnologice și de operare, cu efecte negative asupra caracterului economic global al procesului. În consecință, pe lângă adaptarea și optimizarea tehnologiilor clasice, apare ca necesară identificarea de procedee noi care să se preteze caracteristicilor ligniților autohtoni.

Evidențierea aplicabilității unor procedee de gazificare precum și identificarea eventualelor direcții de optimizare implică analiza teoretică, detaliată a gazificării cărbunilor în strat. Analiza gazificării în strat oferă avantajul posibilității evidențierii etapelor proceselor termochimice complexe, care în gazogenul în strat se desfășoară succesiv, permițând identificarea eventualelor deficiențe și a posibilelor soluții de optimizare.

3.8. VARIANTE CONSTRUCTIVE DE ARZĂTOARE UTILIZÂND COMBUSTIBILI GAZOȘI INFERIORI

Stadiul actual al cercetărilor pe plan național și mondial indică vaste eforturi în vederea analizei posibilităților arderii stabile a combustibililor gazoși inferiori sau rezultați ca reziduuri gazoase din diferite ramuri industriale, având puteri calorifice scăzute. eventual sub $4.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$ /3.47/.

Variantele industriale ale instalațiilor de ardere utilizând combustibili gazoși inferiori, se bazează pe majorarea caracteristicilor gazului sărac prin aportul unui combustibil de calitate, fie prin preîncălzirea amestecului carburant, fie utilizând stabilizatori ceramici ai flăcării, fie utilizând catalizatori de platină, wolfram sau zirconiu, actualmente neaplicabile la nivel industrial datorită prețului prohibitiv al catalizatorului.

3.8.1. ARZĂTOARE PENTRU COMBUSTIBILI GAZOȘI INFERIORI CU STABILIZARE PE SUPORT CERAMIC

Frecvent în cazul arderii combustibililor gazoși extrem de săraci, având puteri calorifice sub $4.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, variantele bazate pe aportul combustibililor superiori sau preîncălzirea amestecului carburant conduc la costuri incompatibile cu ratele de amortizare actualmente admise. În consecință, în vederea arderii stabile a gazelor combustibile sărace s-au adoptat arzătoare cu stabilizarea flăcării pe suport ceramic.

Arzătorul cu suport ceramic, prezentat principal în figura 3.19 constă dintr-o cameră de destindere prevăzută frontal cu plăci ceramice realizate din materiale refractare uzuale, străbătute de amestecul carburant datorită porozității acestora. Pe suprafața exterioară a plăcilor ceramice se formează o

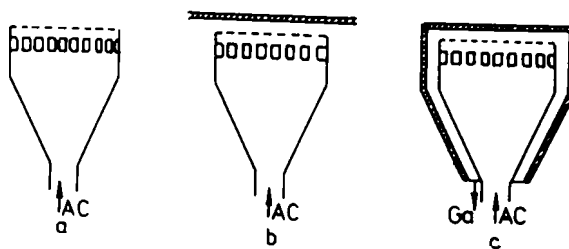


Figura 3.19. Arzător cu suport ceramic pentru gaze sărace
AC - amestec carburant; Ga - gaze de ardere

rețea de microflăcări stabilizate datorită temperaturilor relativ ridicate ale suportului ceramic, cu efecte favorabile asupra majorării vitezei de propagare a frontului flăcării și implicit în asigurarea stabilității arderii /3.48/. O variantă similară o constituie arzătoarele de formă cilindrică cu suport din fibre ceramice Pyrocore realizate de Alzeta Corporation, supuse testărilor pe cazane de abur cu tub de flacără. Concluzia cercetării indică arderea stabilă a gazelor combustibile reziduale cu puteri calorifice de $2.500 - 10.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$ prin intermediul arzătoarelor cu suport ceramic. Varianta industrială concepută modular, modulele fiind asamblate în panouri cu suprafețe totale de până la 10 m^2 , determinând sarcini termice de $500 - 1.000 \text{ kW}$ /3.49/.

O altă variantă constructivă este cea a arzătorului ciclon bazată pe realizarea unui grad ridicat de turbionare care permite creșterea vitezei de propagare a frontului flăcării pentru obținerea arderii stabile a combustibililor gazoși inferiori /3.50, 3.51/.

Principal, arzătoarele ciclon utilizând combustibili gazoși inferiori sunt o incintă cilindrică realizată din materiale înalt refractare prevăzute la partea superioară cu ajutoare tangențiale de introducere a gazului și aerului necesar arderii, conform figurii 3.20. Arderea amestecurilor bogate, conform figurii 3.20.a, este stabilizată în zona racordului de ieșire din ciclon, datorită aerului secundar și a gradului ridicat de

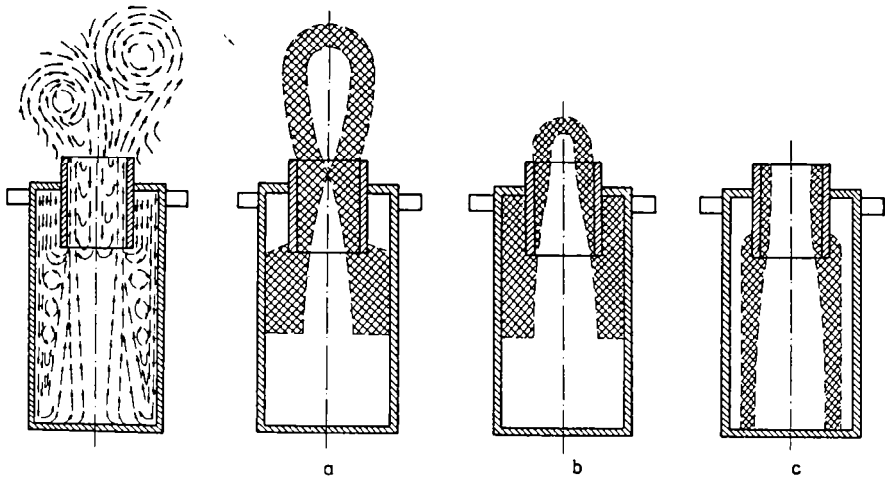


Figura 3.20. Arzătoare ciclon

a - amestecuri bogate; b - amestecuri stoichiometrice; c - amestecuri sărace

turbulentă, care poate fi considerată ca al doilea stadiu al unui arzător etajat. Arderea stoichiometrică începe în zona ajutoarelor, continuând spre racordul de evacuare, și în consecință zona inferioară nu este utilizată datorită debutului rapid al arderii determinat de stoichiometria inițială, conform figurii 3.20.b. Arderea cu excese mari de aer este caracterizată printr-un front al flăcării de formă inelară localizat în interiorul ciclonului, conform figurii 3.20.c. În zona de evacuare postarderea este nesemnificativă, eventualele urme ale flăcării fiind o consecință a turbulenței ridicate.

Concluziile cercetărilor indică avantajele arzătorului ciclon, care permite arderea în condiții de stabilitate a unei game vaste de combustibili gazoși în cadrul aceleiași instalații, variind între metan și gaze sărace - $2.800 - 3.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$. De menționat că, în condițiile combustibililor gazoși conținând hidrogen limita inferioară se diminuează datorită vitezei ridicate de ardere a acestuia. Aerodinamica arzătorului ciclon permite încărcări termice volumetriche de până la 25 MW/m^3 , determinând diminuarea volumului față de camera de ardere convențională de circa 3-4 ori.

3.8.2. ARZĂTOARE UTILIZÂND GAZE COMBUSTIBILE SĂRACE

O variantă constructivă de arzătoare utilizând gazele combustibile sărace, cu puteri calorifice de $3.100 - 8.800 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, o constituie arzătoarele fantă caracterizate principal prin prezența unui sistem de distribuție din țevi prevăzute cu ajutoare din care gazele combustibile expandează perpendicular sau sub un anumit unghi în curentul de aer. Principalele tipuri constructive de arzătoare fantă sunt prezentate schematic în figura 3.21, diferențierile constând în modul de acces și de realizare a amestecului carburant /3.52, 3.53/.

Arzătorul prezentat în figura 3.21.a este caracterizat prin două distribuitoare cilindrice prevăzute cu câte un fascicol de țevi care asigură accesul combustibilului gazos, respectiv a aerului, sub un unghi de 45° , ceea ce conduce, datorită impactului jeturilor, la realizarea unui amestec intim cu un grad ridicat de turbulență. Arzătorul cu fantă dreptunghiulară, prezentat în figura 3.21.b, conceput pentru arderea gazului de furnal sau a unor gaze combustibile sărace, este caracterizat prin jeturi concentrice de combustibil gazos și aer, incidente câte două în ambratură. O variantă similară, prezentată în figura 3.21.c, constă din camera de distribuție a gazului prevăzută cu 2

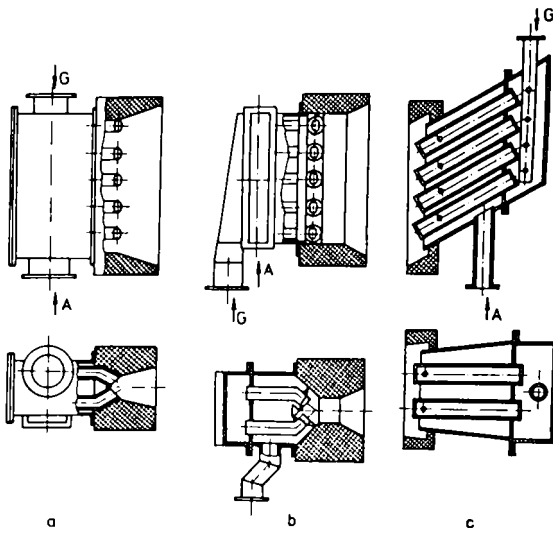


Figura 3.21. Arzătoare tip fantă;
A - aer; G - combustibil gazos

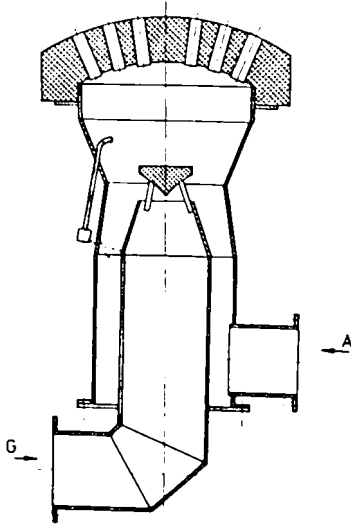


Figura 3.22 Arzător "cupercă"
A - aer; G - combustibil gazos

impactului dintre jeturile combustibilului și aerului, precum și de preîncălzirea aerului extrem de sărace, arzătorul ceașcă poate funcționa cu gaze naturale, ca suport de

Arzătorul principal, conform figurii 3.23.a, constă dintr-o ambrazură tronconică din material ceramic termorefractar prevăzută cu două rânduri de ajutoraje destinate accesului gazelor sărace, respectiv a aerului necesar arderii. Similar este arzătorul

3 rânduri de țevi, care prin intermediul orificiilor periferice, precum și a celui central permit expandarea combustibilului gazos perpendicular în curentul de aer. Soluțiile prezentate asigură omogenitatea amestecului carburant datorită impactului jeturilor și a turbulenței ridicate, conducând la stabilizarea arderii gazelor combustibile sărace.

Caracteristicile reduse - energetice și cinetice - ale arderii gazelor sărace și inferioari au determinat amplasarea arzătoarelor pe vatra focarului, ceea

determină o încălzire de s. ț. în interiorul focar și posibilitatea unui suport termic datorat arzătoarelor de sarcină amplasate pe pereții laterali ai focarului. Arzătorul "cupercă", prezentat în figura 3.22, amplasat în vatra focarului este caracterizat prin realizarea amestecului carburant în interiorul acestuia, astfel încât la expandarea prin orificiile capului arzătorului rezultă un amestec omogen, ceea ce permite arderea de gaze reziduale cu puteri calorifice de până la $1.660 \text{ kJ/m}^3 \text{ N}$ [3.54].

O soluție tehnică deosebită o constituie arzătorul, prezentat în două variante constructive în figura 3.23, rezultat prin combinarea unui arzător principal cu admisie periferică cu un arzător tip "ceașcă" având rol de stabilizare a arderii. Arzătorul tip "ceașcă" este o cameră de ardere cilindrică - prevăzută cu ajutorajele de aer, având o extremitate tronconică cu duze de acces a combustibilului gazos. Arderea stabilă este asigurată de omogenitatea amestecului carburant, datorată

etajat, prezentat în figura 23., care permite, datorită etajării, arderea a doi combustibili gazoși inferiori. Stabilizarea arderii acestora se realizează datorită arzătorului ceașcă dispus central, urmat în primul etaj de combustibilul gazos inferior cu caracteristici superioare, respectiv în etajul următor de gazele combuștile cu proprietăți defavorabile.

O importanță deosebită, o constituie utilizarea gazelor naturale sărace cu conținut ridicat de componente inerte din punctul de vedere al arderii - azot și/sau bioxid de carbon, și având puteri calorifice de 9.000 - 15.000 kJ/m³N. Arderea gazelor naturale sărace implică dificultăți deosebite legate de proprietățile reduse și a proprietăților inflamabile defavorabile - reducerea limitelor de inflamabilitate, scăderea vitezei normale de propagare a frontului flăcării.

Arzătorul tipul T.G. - Ungaria, prezentat în figura 3.24, permite arderea gazelor naturale cu conținut de inerte de până la 40 - 45 %, constă din conducta centrală a combustibilului prevăzută cu un fascicol de lănci cu ajutaje multiple, repartizate echidistant în gâtul arzătorului. Combustibilul expandează într-o multitudine de jeturi în curentul de aer, asigurând omogenitatea amestecului, care coroborată cu efectul tunelului ceramic determină stabilitatea arderii [3.56].

Arzătorul monobloc D - Automat - Ungaria, prezentat în figura 3.25, este caracterizat prin admisia centrală și periferică a gazelor sărace în curentul turbionat

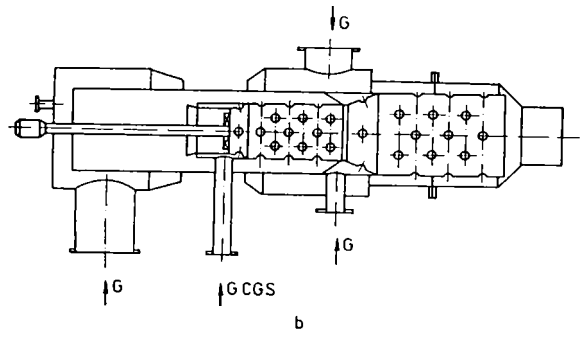
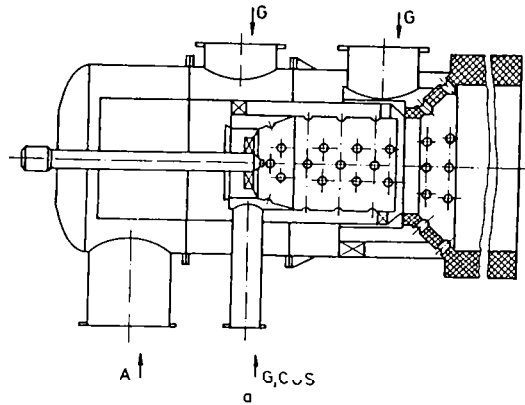


Figura 3.23. Arzător etajat cu arzător de stabilizare tip "ceașcă"
A - aer; G - combustibil gazos; CGS - combustibil gazos superior

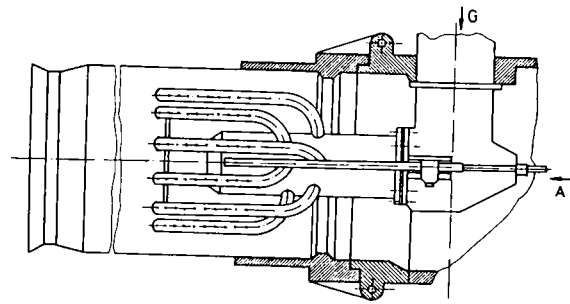


Figura 3.24. Arzător utilizând gaze naturale sărace tip TG
A - aer; G - combustibil gazos

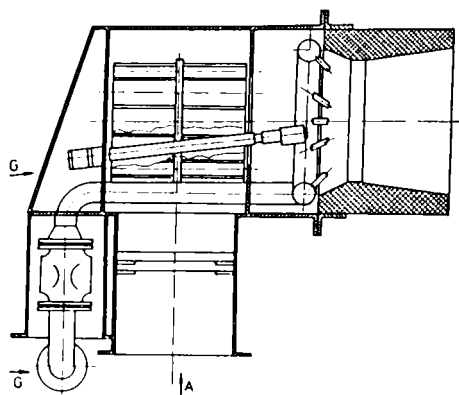


Figura 3 25 Arzător utilizând gaze naturale sărace
tip D-Automat. A - aer. G - combustibil gazos

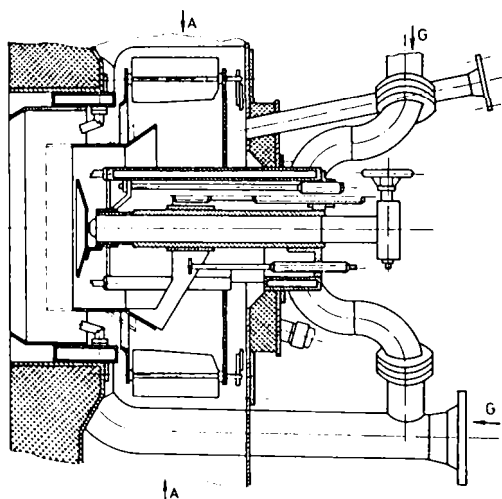


Figura 3 26 Arzător utilizând gaze naturale sărace tip BNI-16
A - aer. G - combustibil gazos

aer, asigurând omogenitatea amestecului carburant, ceea ce permite arderea stabilă a gazelor naturale conținând circa 40 % componente inerte. Ambrazura ceramică în formă de confuzor - difuzor asigură: - confuzorul intensificarea turbulenței și evitarea returului flăcării, - difuzorul stabilizarea și intensificarea arderii datorită contactului cu pereții incandescenti /3.57/.

Arzătorul B.N.I. - 16 - Ungaria, prezentat în figura 3.26, permite utilizarea gazelor naturale conținând circa 68 % N_2 , constând din două arzătoare dispuse concentric. Arzătorul interior constă dintr-un distribuitor inelar dispus pe carcasa cutiei de aer, prevăzut cu un fascicol de lași, care permit expansiunea în jeturi multiple a combustibilului în zona gâtului arzătorului. Arzătorul exterior este caracterizat prin admisia periferică a combustibilului gazos dintr-un distribuitor inelar prin intermediul mai multor ajutaje. Stabilitatea arderii este asigurată de: omogenitatea amestecului, datorată turbulenței aerului și impactului cu jeturile combustibilului, precum și de încălzirea încoșă a tubulaturii capului celor două arzătoare /3.58/.

3.8.3. ARZĂTOARE UTILIZĂND GAZE DE GAZOGEN ÎN INSTALAȚIILE DE TURBINE DE GAZE

În actualele condiții tehnologice, cea mai tentantă posibilitate de implementare a combustibililor solizi în vederea producerii energiei electrice utilizând ciclul mixt o constituie gazificarea sub presiune a acestora, urmată de arderea sub presiune a gazului de gazogen fie în focarul unui generator de abur de tipul Velox, fie în camera de ardere a unei turbine de gaze.

Camera de ardere aferentă unei turbine de 7 MW, prezentată în figura 3.27, permite arderea gazului de gazogen, fiind practic un tub de flacără cilindric realizat din oțeluri înalt refractare, prevăzută la extremitatea anterioară cu arzătorul de gaze combustibile sărace. Arzătorul cu jeturi concentrice utilizând gaze combustibile sărace

sub presune are o formă de difuzor, prevăzut în zona finală cu fante dreptunghiulare care permit expandarea unei fracțiuni a debitului combustibilului în curentul de aer. Aerul necesar arderii străbate spațiul tubular prin intermediul unei găuri de ardere și tubul de flacără, ceea ce determină atât preîncălzirea sa cât și răcirea tubului de flacără. Extremitatea posterioară a camerei de ardere este perforată, ceea ce permite diluția gazelor de ardere cu aer, necesară reducerii temperaturii acestora la valori limitate de rezistență termică a materialului.

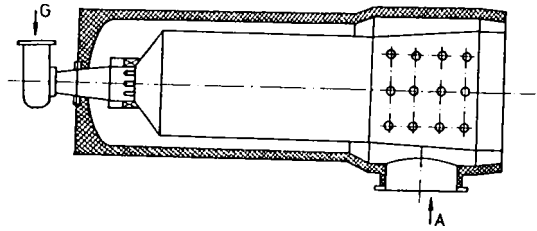


Figura 3. 27. Instalatie de turbină de gaze
A - aer; G - combustibil gazos

Adaptarea turbinelor de gaze la utilizarea gazelor sărace cu putere calorifică de 2.810 - 5.735 kJ/m³N, a implicat testarea diferitelor variante constructive de arzătoare, schematic prezentate în figura 3.28. Variantele constructive analizate se caracterizează prin preîncălzirea la nivele termice ridicate a aerului necesar arderii în urma scaldării în exterior a tubului de flacără și prin turbionarea sa prin intermediul paletelor de turbionare dispuse în zona de acces a aerului. Arzătoarele sunt prevăzute în zona centrală cu un injector de păcură utilizabil la aprindere și ca suport de flacără în cazul gazelor cu proprietăți inflamabile reduse /3.59/.

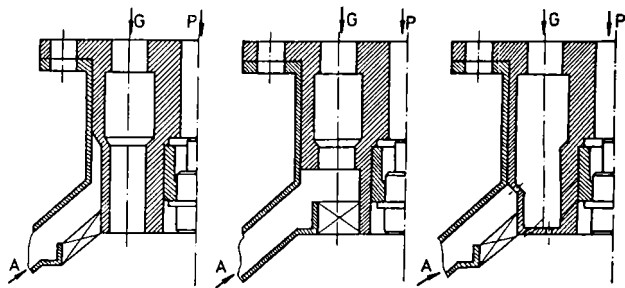


Figura 3. 28. Arzătorul turbinei de gaze utilizând gaz de gazogen
A - aer; G - gaz de gazogen; P - păcură

Prima variantă constructivă prezentată în figura 3.28.a, este un arzător cu jeturi concentrice constând din două fante inelare prin care are loc accesul gazelor sărace în interior, respectiv

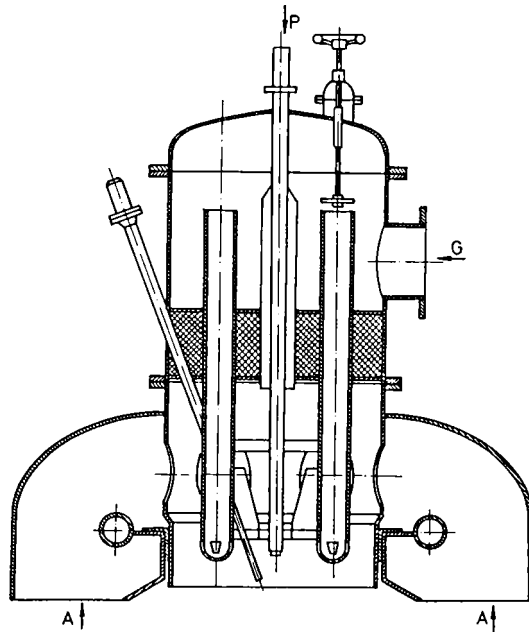


Figura 3. 29. Arzător pentru arderea sub presiune a gazului de gazogen; A - aer; G - gaz de gazogen; P - păcură

aerului necesar arderii în exterior. Arzătorul prezentat în figura 3.28.b este caracterizat prin amestecarea interioară a combustibilului și a aerului necesar arderii, constând dintr-o fantă inelară de acces a gazelor combustibile care expandează în curentul de aer. Varianta constructivă cu rezultatele cele mai promițătoare o constituie arzătorul cu ajutaje multiple - multijet - prezentat în figura 3.28.c. Principalul arzătorul cu ajutaje multiple este prevăzut cu un distribuitor inelar care permite, datorită ajutajelor dispuse echidistant în trei zone distincte obținerea jeturilor multiple ale combustibilului gazos.

Arzătorul combinat multispuj, prezentat în figura 3.29, permite arderea gazului de gazogen pe baza suportului termic al păcurii, într-o pondere de 45 %, în focarele generatoarelor de abur de tipul Velox, la presiuni de 9 bar. Injectorul de păcură amplasat central permite pulverizarea cu aer comprimat, constituind suportul de flacără destinat arderii stabile a gazelor sărace. Combustibilul gazos expandează în curentul aerului prin fantele prevăzute la extremitatea celor șase lănci, deplasabile axial în vederea obținerii geometriei adecvate a flăcării /3.60/.

3.8.4. CERCETARI AUTOHTONE PRIVIND ARDEREA GAZELOR COMBUSTIBILE SĂRACE

În cadrul I.C.S.I.T.E.E. București au fost proiectate două variante constructive de arzătoare care echipază cazanul de apă caldă CIMAC 0,4 Gcal/h, utilizând gaze combustibile sărace - $5.450 \text{ kJ/m}^3\text{N}$, rezultate în urma gazificării ligniților autohtoni în gazogene la presiune normală cu grătar rotativ. Principalul, arzătoarele sunt caracterizate prin amestecarea exterioară a combustibilului gazos cu comburantul, adoptându-se variantele monojet și multijet.

Arzătorul monojet, prezentat schematic în figura 3.30, este caracterizat prin faptul că gazul de gazogen intră în zona centrală prin intermediul unui confuzor, respectiv aerul necesar arderii este distribuit periferic prin intermediul a 20 de orificii dispuse în zona divergentă a capului arzătorului. Interacțiunea jeturilor combustibilului gazos cu cele ale aerului necesar arderii determină omogenitatea amestecului

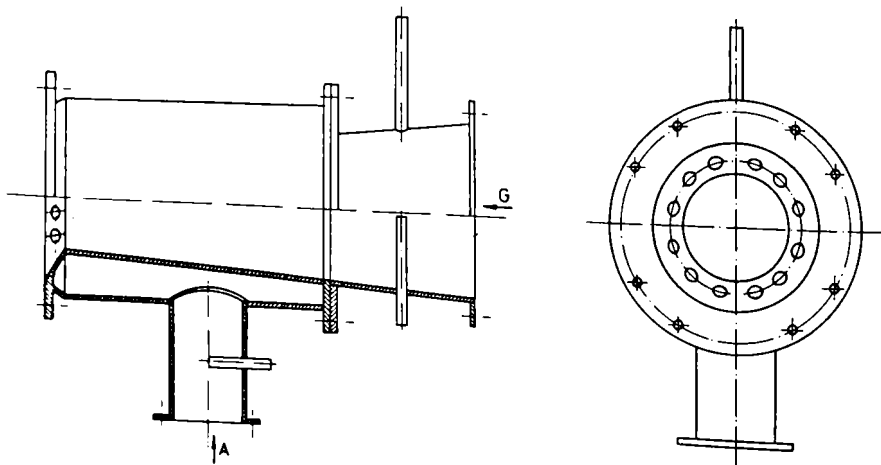


Figura 3 30 Arzător monojet utilizând gaz de gazogen
A - aer, G - gaz de gazogen

carburant, care este defavorizată în cazul diminuării debitului combustibilului și a comburantului datorită scăderii turbulenței /3.61/.

Arzătorul multijet, prezentat în figura 3.31, este caracterizat prin introducerea independentă, în două compartimente, a gazului de gazogen și a aerului de combustie. Combustibilul gazos este distribuit prin intermediul a 37 de țevi, prevăzute cu câte o spirală elicoidală de turbionare a aerului. Cercetarea, confirmă stabilitatea arderii gazului de gazogen, determinată de omogenitatea amestecului carburant asigurată de gradul ridicat de turbulență /3.62/.

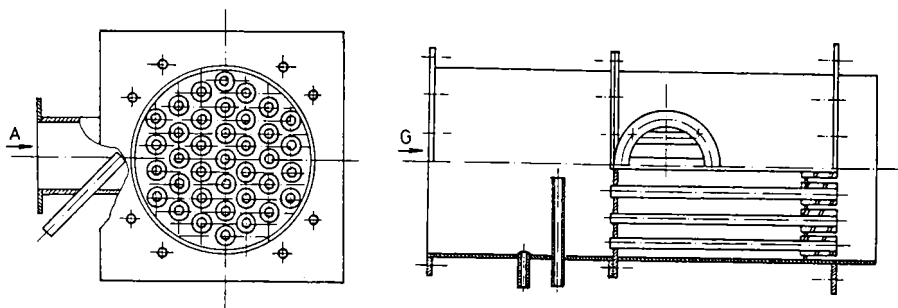


Figura 3. 31. Arzător multijet utilizând gaz de gazogen; A - aer; G - gaz de gazogen

Cercetări geologice recente au condus la descoperirea în zona bazinului Transilvaniei a unor zăcăminte de gaze naturale cu conținut relativ ridicat de componente inerte - CO_2 48 % și N_2 2 % - și puteri calorifice de $18.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$. Analiza teoretică și experimentală efectuată în cadrul C.C.P.G.M. Mediaș conduce la concluzia că principalele modificări constructive ale actualelor arzătoare constau în mărirea secțiunii ajutorului gazelor, necesar asigurării echivalenței sarcinii termice precum și prevederea unui stabilizator suplimentar în vederea evitării rupei flăcării.

Arzătoarele industriale cu recuperare TD 2, TD 3, respectiv arzătorul grup cilindric CG utilizând gaze naturale necesită mărirea secțiunii ajutorului de 2,75 ori în cazul gazelor naturale sărace, respectiv mărirea de 1,5 ori a ajutorului pentru amestec de gaze naturale cu cele sărace.

Arzătorul mixt AGP care echează cazanul CR - 16, modificat pentru gaze naturale sărace, prezentat sch m în figură 3.32, este caracterizat printr-un distribuitor cilindric la care sunt racor-

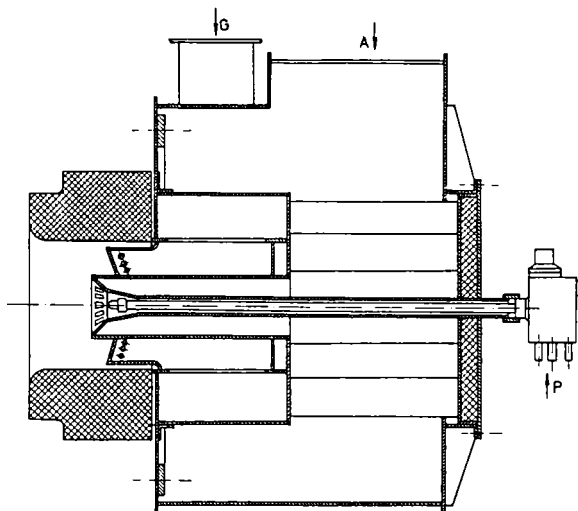


Figura 3. 32. Arzător combinat gaze naturale sărace-păcură A - aer; G - gaz de gazogen; P - păcură

date lăncile prevăzute cu ajutaje de injecție. Aerul necesar arderii, preîncălzit la 250 - 300 °C, este distribuit, o fracțiune în zona centrală aferentă injectorului de păcură, respectiv în zona periferică în spațiul dintre lăncile combustibilului gazos. Amestecul intim gaz - aer se realizează prin admisia perpendiculară a gazelor naturale sărace, stabilizarea arderii fiind asigurată de ambrazura ceramică /3.63/.

3.8.5. CONCLUZII

Variantele constructive anterior prezentate asigură arderea stabilă a gazelor combustibile inferioare, evidențiind preocupările în vederea utilizării energetice ale acestora cât și pentru diminuarea impactului asupra mediului ambiant.

Analiza stadiului actual scoate în evidență principalele soluții constructive care asigură arderea stabilă a combustibililor gazoși inferiori:

- asigurarea omogenității amestecului carburant, realizabilă prin: divizarea jetului combustibilului, impactul dintre jeturile combustibilului și curentul de aer și turbionarea aerului de combustie;
- asigurarea stabilității arderii prin intermediul ambrazurii sau a unor stabilizatori ceramici dispuși în zona nucleului flăcării;
- majorarea vitezei de propagare a frontului flăcării realizabilă prin preîncălzirea combustibilului sau a aerului necesar arderii;
- corespunzător gazelor foarte sărace este necesar suportul termic al combustibililor gazoși sau lichizi superiori.

CAPITOLUL 4

ANALIZA GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR ÎN STRAT

Tehnologiile de gazificare ale cărbunilor în strat fix sau rotativ, prezentate principial în capitolul 3, constituie soluția constructivă cea mai simplă, atât în ceea ce privește generatorul cât și echipamentele auxiliare de preparare a cărbunelui și tratare a gazului brut. Caracteristic gazificării în strat este autonomia termică a procesului, conferită de arderea unei fracțiuni a cărbunelui, în vederea furnizării fluxului termic necesar proceselor endoterme de gazificare și piroliză, precum și circulația în contracurent a combustibilului solid față de agentul de gazificare, respectiv gazul brut.

4.1. DESCRIEREA GAZIFICĂRII ÎN STRAT

Cărbunele introdus prin partea superioară a generatorului este succesiv: preîncălzit, uscat, devolatilizat și gazificat cu abur pe baza aportului termic rezultat în urma arderii fracțiunii nereacționate a cocsului, în zona de combustie. Agentul de gazificare, introdus printre barele grătarului trece prin stratul de cenușa având o circulație ascendentă în contracurent față de cărbune. În consecință, temperaturile de evacuare a gazului brut sunt relativ scăzute, variind între 250 - 300 °C, în cazul cărbunilor cu reactivitate ridicată și cu conținut sporit de umiditate - ligniți, cărbuni brunii, respectiv 600 - 650 °C în cazul cărbunilor cu reactivitate și umiditate scăzută - huile, semiantraciți /4.1, 4.2/.

Principalele reacții care au loc la gazificarea cărbunilor - reacția Boudouard (R 2.3) și reacția heterogenă de gazificare cu abur (R 2.4), prezentate în capitolul 2, au un caracter endoterm, fapt ce implică necesitatea asigurării suportului termic pe baza reacțiilor puternic exoterme de oxidare (R2.1) și (R2.2).

Condițiile de desfășurare ale procesului, practic: temperatura, presiunea și concentrația reactanților - cu influențe directe asupra cineticii reacțiilor chimice - și parametrii fizici care determină transferul de căldură și de masă au un aport decisiv asupra rezultatului final, permițând conducerea proceselor termochimice spre producții finali dorite. Temperaturile ridicate, favorizând reacțiile puternic endoterme, determină obținerea unui gaz brut bogat în oxid de carbon, respectiv în cazul temperaturilor moderate sunt favorizate reacțiile exoterme, conducând la majorarea ponderii hidrogenului și a metanului. Creșterea presiunii favorizează desfășurarea reacțiilor cu reducerea volumului, în principal reacția de hidrogenare (R 2.5) și reacția de metanare (R 2.15), conducând la majorarea conținutului de metan al gazului brut.

Gazificarea în strat, spre deosebire de procedeele în pat fluidizat sau antrenat, permite evidențierea divizării interioare a etapelor proceselor termochimice complexe, schematic prezentate în figura 4.1 /4.3/.

Mișcarea descendentă a cărbunelui și implicit creșterea temperaturii sale, pe baza căldurii sensibile a gazului brut, determină degajarea volatilelor începând de la temperaturi de circa 170 - 200 °C în cazul ligniților și cărbunilor brunii, respectiv 300 - 400 °C în cazul huilelor și semiantracitilor, corespunzând reacțiilor de piroliză (R 2 20) și (R 2.21). Circulația în contracurent, și implicit utilizarea unei fracțiuni a căldurii sensibile a produselor gazificării la pregătirea termică a cărbunelui, permite reducerea

Fluxul termic necesar proceselor endoterme de gazificare este furnizat de căldura sensibilă a gazelor rezultate ale arderii și vaporii de apă supraîncălziți, introduși ca agent de gazificare, care părăsesc zona de ardere la temperaturi de circa 1.100 - 1.300 °C, fiind limitată superior de punctul de înmuiere al cenușii.

Căldura necesară proceselor complexe endoterme care apar la gazificarea cărbunilor este furnizată de arderea semicocsului sau a cocsului nereacționat în zona de combustie, relativ îngustă pe baza oxigenului introdus în agentul de gazificare, în conformitate cu reacția de oxidare totală (R 2.1), respectiv reacția de oxidare parțială (R 2.2). De menționat că, datorită nivelelor termice ridicate are loc reducerea unei fracțiuni a dioxidului de carbon pe baza reacției Boudouard (R 2.3). Transferul termic în grosimea stratului de cărbune din generator se realizează datorită circulației ascendente a gazelor de ardere, respectiv a gazului brut produs.

Durata de staționare a cărbunelui în generator în vederea unei desfășurări pe cât posibil integrale a reacțiilor chimice din zona de gazificare este de circa 0,5-1 h, funcție de reactivitatea cărbunelui.

La baza generatorului, printre barele grătarului fix sau rotativ sau prin partea laterală a acestuia este evacuată cenușa cu un conținut relativ scăzut de carbon nereacționat. Stratul de cenușă permite preîncălzirea și distribuția relativ uniformă în secțiunea transversală, a agentului de gazificare, care datorită excesului de abur permite limitarea temperaturii cenușii sub limita de înmuiere.

Recoltarea gazului brut se realizează prin partea superioară a generatorului prin intermediul unui sau mai multor racorduri. În medie gazul de generator conține, în cazul gazificării cu amestec de aer cu abur la presiune normală, componente combustibile: CO^{anh} 20-24 %, H_2^{anh} 13-17 %, CH_4^{anh} 2-4 % și componente inerte din punct de vedere al arderii: CO_2^{anh} 7-10 % și N_2^{anh} 50-55 %, respectiv în cazul gazificării cu amestec de oxigen cu abur compoziția medie a gazului este: CO^{anh} 20-23 %, H_2^{anh} 37-39 %, CH_4^{anh} 10-12 %, CO_2^{anh} 27-30 % și urme de azot. De remarcat, umiditatea ridicată a gazului brut de circa 30-45 % determinată atât de excesul de abur introdus la baza generatorului ca moderator termic al cenușii cât și de vaporizarea umidității cărbunelui, în urma uscării acestuia, desfășurată în partea superioară a generatorului /4.4, 4.5/.

4.2. INFLUENȚA CARACTERISTICILOR CĂRBUNELUI ASUPRA GAZIFICĂRII ÎN START

Tehnologiile de gazificare în strat se pretează la prelucrarea cărbunilor neaglutinanți într-o gama granulometrică ridicată cuprinsă între 5 -100 mm, limitată în vederea optimizării proceselor termofizice și gazodinamice în sorturi granulometrice restrânse. Desfășurarea gazificării în strat este determinată în mod primordial de proprietățile cărbunelui, caracterizate prin analiza tehnică și elementară, puterea calorică, structura și reactivitatea chimică și petrografică, tendințele aglutinante și de înmuiere a cenușii, precum și proprietățile tehnologice /4.6/.

Analiza elementară sau cea tehnică - carbonul fix, volatilele, umiditatea și masa minerală necombustibilă - este relevantă pentru întocmirea bilanțului masic al gazificării, permițând aprecierea compoziției gazului brut, a subprodusilor secundari și a componentelor relevante pentru mediul ambiant. Componentele volatile, datorită desfășurării separate a pirolizei față de gazificare, au o importanță deosebită, conducând la sporirea conținutului de metan al gazului brut - mărind implicit puterea calorică a acestuia, și de hidrocarburi grele - în special gudroane, uleiuri și fenoli. Dintre acestea gudroanele și uleiurile merită a fi recuperate și valorificate energetic datorită puterii calorifice de circa 33.600 kJ/kg, respectiv fenolii trebuie îndepărtați fiind un poluant al mediului ambiant.

Umiditatea cărbunelui este inclusă în bilanțul masic și energetic al gazificării, influențând într-o pondere semnificativă randamentul global al generatorului, având însă o influență redusă asupra caracteristicilor tehnologice ale cărbunelui, relevante pentru gazificarea în strat. Desfășurarea în condiții optime a procesului, pe considerentul randamentului termic global, conform testărilor efectuate cu cărbune brun de Rin, indică umidități de 4-15 %. În consecință, este necesară limitarea umidității cărbunelui la maxim 30 %, în vederea obținerii unei eficiențe acceptabile a gazificării în strat. De o importanță deosebită, este tendința de mărunțire observată la unele calități de cărbune la pierderea intensă a apei care, cu toate că favorizează desfășurarea proceselor termochimice, determină riscul creșterii pierderilor mecanice prin particule antrenate sau evacuate printre barele grătarului, modificând gazodinamica stratului.

Masa minerală necombustibilă prezintă importanță în cazul gazificării în strat, atât datorită faptului ca este un balast, din punct de vedere energetic, cât și prin prisma temperaturii punctului de înmuiere și a eventualelor efecte catalitice ale componentelor acesteia. Asemenea umidității, masa minerală necombustibilă implică majorarea aportului termic furnizat prin arderea unei fracțiuni a cărbunelui în vederea atingerii temperaturii de operare, precum și pentru suplinirea descompunerii endoterme a unor constituenți ai cenușii, ca de exemplu carbonații. În consecință gazificarea unor cărbuni cu conținut ridicat de masă minerală necombustibilă raportată la proba anhidră de peste 30 %, determină pe lângă diminuarea eficienței gazificării și probleme deosebite de operare.

De o importanță deosebită, este temperatura punctului de înmuiere a cenușii, legată intrinsec de tendințele de aglomerare a acesteia, cu influențe majore asupra randamentului, a modului de operare și de evacuare a cenușii. De menționat că, actualele variante constructive ale generatoarelor în strat, cu excepția procedeului British - Gas - Lurgi, dotate cu grătare fixe sau rotative permit evacuarea cenușii exclusiv în stare solidă. În cazul cărbunilor cu temperaturi ridicate de topire a cenușii, de circa 1.400 - 1.500 °C, evacuarea în stare solidă nu implică probleme deosebite de operare. Cenușile cu puncte de topire de 1.200 -1.400 °C prezintă o comportare critică, influențând modul de exploatare al generatorului, determinând necesitatea introducerii unui moderator termic, în general abur, care implică majorarea ponderii consumului energetic solicitat de prepararea acestuia. Astfel, în cazul formării unor zone preferențiale de propagare a frontului reacției, determinată de aprinderea și permeabilitatea neuniformă a stratului de cărbune, apar creșteri locale ale randamentului procesului - prin creșterea ponderii particulelor nereacționate - cât și asupra modului de operare. Datorită tendințelor de aglomerare este necesară mărirea turății grătarului în vederea spargerii bulgărilor care poate conduce la diminuarea stratului de cenușă și de jar determinând instabilitatea procesului, eventual făcând imposibilă continuarea sa. Cărbuni cu cenuși cu puncte de topire scăzute de 1.100 - 1.200 °C se pretează exclusiv la evacuarea în stare lichidă a zgurii, fiind favorabili gazificării conform tehnologiei British - Gas - Lurgi, respectiv în generatoare în pat antrenat.

Masa minerală necombustibilă, funcție de compoziția sa poate acționa catalitic asupra gazificării cu abur. De exemplu, compușii alcalini accelerează viteza reacției de gazificare în cazul uilelor, determinând majorarea conținutului de metan al gazului brut. În cazul ligniților, reactivitatea ridicată a acestora se datorează în parte efectului catalitic al unor minerale fin dispersate, în special calciul.

Puterea calorifică, având o importanță similară pentru toate procedeele de gazificare, constituie elementul de bază la întocmirea bilanțului energetic al gazificării.

Structura chimică și petrografică determină în mod direct sau indirect capacitatea de reacție - reactivitatea - cărbunelui. Gazificarea în strat a cărbunelui se bazează pe reacția heterogenă a carbonului cu abur, pe reacția de metanare și, într-o pondere scăzută, pe reacția Boudouard, având ca suport termic oxidarea exotermă a carbonului, ceea ce conduce la utilizarea ca agent de gazificare a amestecului de aer, aer îmbogățit sau oxigen cu abur. Importanța reactivității și cinetica transformărilor termochimice ca: piroliza, gazificarea și arderea, este determinată de reactivitatea cu agentul și produșii parțiali ai gazificării precum și difuzia acestora în stratul limită al particulei de cărbune.

Gazificarea în strat este caracterizată prin desfășurarea succesivă a pirolizei, gazificării și arderii unei fracțiuni a cărbunelui. În zona de combustie, determinantă pentru desfășurarea procesului este difuzia oxigenului în stratul limită al particulei, datorită vitezei mari a reacției chimice - determinată de temperaturile ridicate, comparativ cu viteza scăzută a oxidantului față de particula de cărbune. În vederea simplificării criteriilor de evaluare a reactivității cărbunelui se consideră ca oxigenul introdus prin intermediul agentului de gazificare este complet consumat în urma arderii și ca reacția Boudouard poate fi neglijată datorită nivelului termic redus din zona de gazificare 700-1.100 °C. În consecință cinetica gazificării este determinată de corelarea dintre viteza reacției heterogene de gazificare a carbonului cu aburul și a reacției de metanare, comparativ cu difuzia aburului, respectiv al hidrogenului în stratul limită al particulei de cărbune.

Structura petrografică influențează procesul complex al gazificării funcție de intimitatea amestecului masei organice cu cenușa. Astfel, în cazul unui amestec intim, degajarea volatilelor și accesul reactanților - oxigen, abur, hidrogen - la masa combustibilă decurge dificil.

Granulația admisă la alimentarea cărbunelui - 5-100 mm, divizată în sorturi restrinse - necesită eliminarea subgranulației, pentru realizarea condițiilor gazodinamice solicitate de circulația agentului de gazificare, respectiv a gazului brut. Ideali, din acest punct de vedere, în cazul gazificării în strat sunt cărbunii cu friabilitate redusă, ceea ce permite evitarea fărâmițării la extracție, transport, pregătire și în interiorul generatorului.

Tendențele aglutinante influențează în mod defavorabil gazificarea, devenind dificilă realizarea condițiilor gazodinamice necesare uniformizării circulației agentului de gazificare în secțiunea transversală și străbaterea stratului de cărbune. Gazificarea în strat cu evacuarea în stare solidă a cenușii permite prelucrarea cărbunilor neaglutinanți, eventual slab și mediu aglutinanți, cu condiția unui pretratament adecvat, fapt ce influențează defavorabil eficiența și productivitatea generatorului. Utilizarea băii de zgură topită, specifică procedurii British - Gas - Lurgi permite prelucrarea cărbunilor aglutinanți fără pretratament.

4.3. INFLUENȚA AGENTULUI DE GAZIFICARE

Gazificarea cărbunilor în strat utilizează aproape în exclusivitate ca agent de gazificare amestec de aer, aer îmbogățit sau oxigen cu abur, caracteristic pentru desfășurarea procesului fiind debitul specific al oxigenului și raportul abur/oxigen /4.7/.

Debitul oxigenului introdus prin intermediul agentului de gazificare determină productivitatea generatorului pe baza fluxului termic furnizat de arderea semicocsului sau a cocsului în zona de combustie. Pe baza bilanțului energetic, căldura furnizată prin arderea unei fracțiuni a cărbunelui constituie suportul reacției heterogene de gazificare cu abur a carbonului. În consecință, debitul oxigenului reprezintă principalul

element de control al productivității procesului, prin modificarea ratei oxigenului debitul de gaz brut al generatorului poate varia între 10 % și 100 %.

Reactivitatea cărbunelui, fiind într-o corelare inversă cu temperatura de desfășurare a procesului, implicând debite specifice de oxigen într-un raport invers. Astfel, în cazul cărbunilor cu capacitate de reacție scăzută - antraciți, semiantraciți, huile, în vederea desfășurării proceselor termochimice de gazificare în condiții cinetice acceptabile, sunt necesare temperaturi de operare ridicate care implică debite majorate de oxigen de circa $0,20 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$ gaz anhidru, necesare arderii cărbunelui pentru atingerea nivelului termic implicat de procesele chimice. Cărbunii cu reactivitate marită necesită o rata de oxigen de circa $0,125 \text{ m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$ gaz anhidru.

Deși aburul este reactantul principal al agentului de gazificare - conform reacției heterogene de gazificare a carbonului (R2.4) - debitul acestuia nu este determinat pe baza bilanțului masic, ci de necesitatea diminuării temperaturii stratului de cenușă sub limita de înmuiere a acesteia. În consecință, aburul introdus în exces față de echilibrul stoichiometric apare ca moderator termic al cenușii în vederea evitării aglomerării acesteia, raportul abur/oxigen fiind practic determinat de proprietățile fizibile ale cenușii.

Efectul de moderator termic al aburului este determinat de schimbul de căldura datorat prin contactului direct cu stratul de cenușă, respectiv în zona de gazificare pe baza reacției endoterme a acestuia cu carbonul. Deoarece, caracterul endoterm al acestei reacții este net mai redus comparativ cu oxidarea carbonului - de circa 3,4 ori - are loc o creștere rapidă a temperaturii din reactor, odată cu consumarea oxigenului, care este epuizat în zona de combustie. Reacția heterogenă de gazificare se desfășoară în zona adiacentă superioară, după consumarea întregii cantități de oxigen, determinând datorită caracterului endoterm al procesului, limitarea relativ rapidă a temperaturii, conform profilului termic prezentat în figura 4.1.

Raportul

abur/oxigen, pe lângă determinarea temperaturii de operare și implicat a echilibrului chimic al reacțiilor, prezintă influențe majore asupra compoziției gazului brut. În figura 4.2 este prezentată variația compoziției gazului brut anhidru funcție de raportul abur/oxigen în cazul unui cărbune subbituminos, având analiza tehnică: C^i 42,3 %, V^i 28,3 %, A^i 8,0 %, W^i 21,4 %, corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de aer, aer îmbogățit - O_2 50 % - și oxigen cu abur.

Depinzând de limita de înmuiere a cenușii și de reactivita-

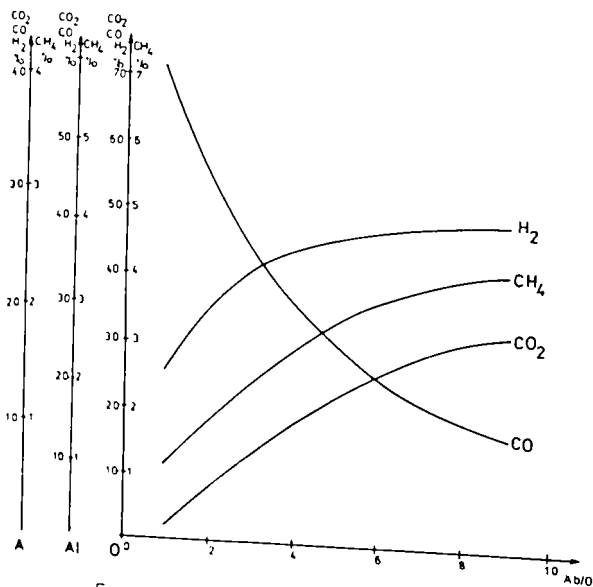


Figura 4.2 Influența agentului de gazificare asupra compoziției gazului anhidru
 A - aer Ab - abur AI - aer îmbogățit 50 % oxigen; O - oxigen;

tea cărbunelui, raportul abur/oxigen, în cazul gazificării în strat cu evacuarea cenușii în stare solidă are valoarea 6-10 m³N/m³N. De remarcă, consumul ridicat de abur cu efecte defavorabile asupra bilanțului energetic global al gazificării în strat, întrucât cea mai mare parte a acestuia se regăsește nedescompus în gazul brut. În vederea înlăturării acestei deficiențe a fost dezvoltat procedeul British - Gas - Lurgi, care datorită băii de zgură topită permite reducerea raportului abur/oxigen la circa 1 m³N/m³N.

Influențe majore asupra gazului brut are calitatea oxidantului utilizat ca agent de gazificare, care poate fi aer, aer îmbogățit sau oxigen. Mărirea gradului de îmbogățire în oxigen al aerului determină majorarea ponderii gazelor combustibile și a bioxidului de carbon, pe seama diminuării concentrației azotului până la aproximativ anularea sa, în cazul utilizării oxigenului. Implicit, are loc creșterea considerabilă a puterii calorifice a gazului brut anhidru, prezentată în figura 4.3,

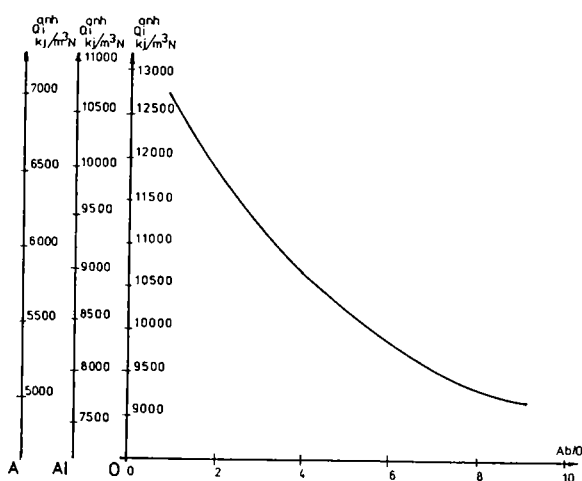


Figura 4.3. Influența agentului de gazificare asupra puterii calorifice a gazului anhidru
A - aer; Ab - abur; AI - aer îmbogățit 50 % oxigen; O - oxigen;

în cazul cărbunelui subbituminos funcție de gradul de îmbogățire în oxigen a agentului de gazificare și raportul abur/oxigen. Utilizarea ca agent de gazificare a aerului îmbogățit sau a oxigenului în amestec cu abur prezintă, pe de-o parte avantajul creșterii sensibile a calității gazului brut și a încărcării specifice a generatorului, precum și reducerea consumului energetic solicitat de presiunile ridicate de operare, respectiv dezavantajul economic al costului sporit al oxigenului.

4.4. BILANȚUL ENERGETIC AL GAZIFICĂRII ÎN STRAT

Analiza eficienței gazificării în strat a cărbunilor, evidențiată de bilanțul energetic, permite prefigurarea posibilităților evolutive ale procesului, fiind suportul soluțiilor tehnico-economice adecvate optimizării procesului.

În conformitate cu datele oferite de literatura de specialitate s-a întocmit bilanțul energetic al gazificării în strat la presiune normală și sub presiune, în cazul ligniților autohtoni, respectiv în cazul exploatării generatoarelor Lurgi cu cărbune de Rin. În prima etapă, a fost întocmit bilanțul masic al gazificării atât în cazul materialelor globale cât și al elementelor chimice /4.1, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11/.

Determinarea fluxurilor intrate în generator se bazează pe calculul căldurii chimice și sensibile a cărbunelui și a căldurii sensibile a componentelor agentului de gazificare.

Fluxul util este determinat de căldura chimică și sensibilă a gazului brut și a subprodusilor secundari, precum și fluxul termic cedat apei de răcire din mantaua dublă a generatorului. Umiditatea gazului brut provine din fracțiunea aburului rămas nereacționat din aburul introdus în exces - ca agent de gazificare și moderator termic,

precum și vaporii rezultați din vaporizarea umidității cărbunelui. Întrucât vaporii regăsiți în gazul brut, nu participă la reacțiile chimice, entalpia acestora a fost considerată ca o pierdere energetică. De menționat că, la determinarea fluxurilor s-a ținut cont de puterea calorică superioară a cărbunelui, gazului brut respectiv a gudroanelor, prin considerarea stării normale ca element de referință al bilanțului.

Pierderile specifice gazificării cărbunilor sunt determinate de căldura chimică a particulelor neare, evacuate în cenușă sau antrenate de gazul brut, căldura sensibilă a cenușii precum și fluxul termic schimbat cu mediul ambiant. În calcule s-a neglijat căldura sensibilă a particulelor antrenate datorită valorii reduse a acesteia, de circa 0.5 %, precum și căldurile chimice ale compușilor organici condensabili, cu excepția gudroanelor datorită necunoașterii ponderii acestora.

Principali parametri de compoziție și elementele bilanțului masic și energetic aferente gazificării în strat la presiune normală, respectiv sub presiune a ligniților autohtoni precum și datele oferite de literatura de specialitate corespunzătoare generatorului Lurgi sunt prezentate în tabelul 4.1, 4.2 și 4.3.

Determinarea randamentului net al generatorului necesită considerarea echivalentului termic al energiei electrice consumate în proces pentru: pregătirea cărbunelui, comprimarea agentului de gazificare, prepararea aburului și pentru acționări. În cazul utilizării aerului ca agent de gazificare, echivalentul termic al energiei electrice consumate de stația de compresoare este de circa 4-5,5 % din totalul fluxurilor intrate, regăsindu-se aproape integral în presiunea gazului la colectarea din generator, utilizabilă în cazul ciclurilor mixte de producere a energiei electrice sau în vederea transportului combustibilului gazos la consumatori situați la distanțe apreciabile. Utilizarea ca agent de gazificare a oxigenului determină, pe lângă sporirea calității gazului brut și diminuarea considerabilă a consumului energetic necesar compresiei, permițând dezvoltarea unui lucru mecanic util la destinderea gazului brut dublu față de cel consumat la comprimare, datorită dublării volumului componentelor gazoase în cazul stoichiometriei.

Analiza procedeelelor de gazificare în strat indică ca principale avantaje gradul ridicat de conversie al carbonului în produse combustibile gazoase și lichide, determinat de reziduurile reduse de cărbune nereacționat, în condițiile unui randament termic ridicat, datorat circulației în contracurent a reactanților. De asemenea, generatoarele în strat permit capacități specifice mari pe unitatea de volum sau de suprafață transversală, fiind caracterizate de simplitatea constructivă atât a generatorului cât și a instalațiilor auxiliare.

Principalele dezavantaje ale gazificării în strat - evitate în cazul tehnologiei British - Gas - Lurgi cu baie de zgură topită - constau în sensibilitatea generatorului la tendințele aglutinante și subgranulația cărbunilor, precum și consumul ridicat de abur necesar ca moderator termic.

4.5. MODELAREA MATEMATICĂ ÎN CONDIȚII DE ECHILIBRU A GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR ÎN STRAT

În vederea analizei gazificării în strat a ligniților autohtoni, apare ca rațională realizarea unui model matematic al acesteia, pentru compararea cu cazul gazificării cu umiditatea proprie. În consecință, s-a elaborat, pe baza unui algoritm similar gazificării cu umiditatea proprie, modelul matematic al gazificării în strat care să permită estimarea consumurilor specifice, a parametrilor energetici și a compoziției gazului brut [4.7, 4.8, 4.12].

Modelul matematic în condiții de echilibru termodinamic se bazează pe starea inițială - cărbune și agent de gazificare - și starea finală - gaz de generator și cenușă - neglijându-se stările intermediare determinate de cinetica proceselor fizico-chimice

Nr. crt.	PARAMETRII INTRATE	MĂRIMILOR	U.M.	GAZIFICARE ÎN STRAT				
				PRESIUNE NORMALĂ	SUB PRESIUNE	LURGI		
1.	Cărbune - analiza elementară C'		%	25,84	31,05		70,8	
2.	H'		%	2,34	2,69		3,0	
3.	O'		%	10,71	11,30		5,9	
4.	N'		%	0,42	1,66		--	
5.	S'		%	1,85	1,35		0,31	
6.	V'		%	43,6	25,35		5,7	
7.	A'		%	13,24	26,6		14,29	
8.	- putere calorică inferioară		KJ/kg	8.561	12.225		27.633	
9.	- putere calorică superioară		KJ/kg	10.194	13.481		28.454	
10.	- debit		kg/h	350	150		3.310	
11.	- temperatură		°C	20	20		20	
12.	- căldura chimică		KW	991	562		26.161	
			%	96,12	91,87		81,9	82,69
13.	- căldura sensibilă		KW	2,44	1,04		35,12	35,12
			%	0,23	0,17		0,11	0,11
13.	Agent de gazificare - aer debit		kg/h	353	206		7.232	--
14.	- oxigen debit		kg/h	--	--		--	2.850
15.	- temperatură		°C	58	55		125	20
16.	- căldura sensibilă		KW	5,72	3,17		252	14,5
			%	0,55	0,52		1,01	0,05
17.	- abur debit		kg/h	43,96	50		6.500	6.500
18.	- temperatură		°C	158	400		300	300
19.	- căldura sensibilă		KW	31,87	45,5		5.423,8	5.432,8
			%	3,1	7,44		16,98	17,15

Tabelul 4. 1. Parametrii de compoziție și energetici ai gazificării în strat - parametrii mărimilor intrate

Nr crt.	PARAMETRII MĂRIMILOR UTILE	U.M.	GAZIFICARE ÎN STRAT		
			PRESIUNE NORMALĂ	SUB PRESIUNE	LURGI
1.	Gaz - compoziție CO ^{anh}	%	23,5	21,7	13,75
2.	H ₂ ^{anh}	%	12,8	17,7	24,3
3.	CH ₄ ^{anh}	%	3,2	1,4	7,03
4.	CO ₂ ^{anh}	%	7,7	6,2	18,36
5.	O ₂ ^{anh}	%	0,2	1,5	--
6.	H ₂ S ^{anh}	%	0,3	--	1,0
7.	N ₂ ^{anh}	%	50,7	51,6	35,56
8.	- putere calorică inferioară	kJ/m ³ N	5.606	5.131	7.134
9.	- putere calorică superioară	kJ/m ³ N	6.007	5.520	7.913
10.	- debit	kg/h	436	268	10.200
11.	- temperatură	°C	150	200	250
12.	- căldura chimică	KW	681	373	22.420
		%	66,04	61,25	69,44
13.	- căldura sensibilă	KW	43,27	19,79	711,9
		%	4,2	3,25	2,2
14.	Gugroane - putere calorică inferioară	kJ/kg	33.661	33.661	33.661
15.	- putere calorică superioară	kJ/kg	35.694	35.694	35.694
16.	- debit	kg/h	5,25	3,2	360
17.	- căldura chimică	KW	51,9	31,73	3.172,8
		%	5,04	5,2	9,83
18.	Apă răcire	KW	25,87	25,31	238,26
		%	4,24	5,6	0,79
19.	Total util - masic	kg/h	468,33	271,1	10.520
20.	Total util - energetic	KW	776,13	450,82	26.543,11
					26.342,75

Tabelul 4.2. Parametrii de compoziție și energetici ai gazificării în strat - parametrii mărimilor utile

Nr. crt.	PIERDERI TERMICE	U.M.	GAZIFICARE ÎN STRAT			
			PRESIUNE NORMALA	SUB PRESIUNE	LURGI	LURGI
1.	Umiditate gaz - debit	kg/h	170,17	79,9	5,860	5,285
2.	- temperatură	°C	150	200	250	250
3.	- căldura sensibilă	kW	139,87	63,56	4,720,55	4,257,36
4.	Particule antrenate - debit	% kg/h	13,56	10,43	14,62	13,49
5.	- putere calorică superioară	kJ/kg	3,5	1,5	33,1	26,5
6.	- căldura chimică	kW	18,074	18,059	30,174	30,174
7.	- căldura chimică	%	17,57	7,52	277,4	222,11
8.	- compoziție C	%	1,7	1,23	0,86	0,7
9.	- compoziție S	%	13,38	14	12,5	12,5
10.	- compoziție A	%	6,62	6,8	-	-
11.	- compoziție C	%	80	79,2	87,5	87,5
12.	- putere calorică superioară	KJ/kg	5,239	5,375	4,237	4,237
13.	- debit	kg/m	62,3	53,6	584	584
14.	- căldura chimică	kW	89,55	80,03	687,4	687,4
15.	- căldura chimică	%	8,68	13,3	2,13	2,18
16.	Schimb termic cu mediul ambiant	kW	8,08	7,75	40,72	40,72
17.	Total pierderi - masic	%	0,78	1,27	0,13	0,13
18.	Total pierderi - energetic	kg/h	235,7	135	6,477,1	5,895,6
19.	Total pierderi - energetic	kW	255,1	158,9	5,726,8	5,207,6

Tabelul 4.3 Parametrii de compoziție și energetici ai gazificării în strat - parametrii pierderilor termice

Nr.	RANDAMENTUL GAZIFICĂRII	U.M.	PRESIUNE NORMALĂ	SUB PRESIUNE	LURGI AER	LURGI OXIGEN
1.	Gaz uscat rece -raportat la cărbune (Q_i)	%	76,34	67,15	77,99	72,93
2.	-raportat la cărbune (Q_s)	%	68,70	66,48	85,70	83,64
3.	-raportat flux total (Q_i)	%	72,82	61,18	63,68	60,00
4.	-raportat flux total (Q_s)	%	66,04	61,08	69,44	69,34
5.	Gaz uscat rece plus gudroane -raportat la cărbune (Q_i)	%	82,23	73,03	89,77	86,16
6.	-raportat la cărbune (Q_s)	%	73,94	72,13	94,67	92,08
7.	-raportat flux total (Q_i)	%	78,45	66,54	73,29	70,90
8.	-raportat flux total (Q_s)	%	71,07	66,27	79,83	80,455
9.	Gaz uscat cald -raportat la cărbune (Q_i)	%	81,53	71,04	80,79	75,27
10.	-raportat la cărbune (Q_s)	%	73,07	70,00	88,42	85,91
11.	-raportat flux total (Q_i)	%	77,78	64,72	65,97	61,93
12.	-raportat flux total (Q_s)	%	70,23	64,31	71,64	71,25
13.	Gaz uscat cald plus gudroane -raportat la cărbune (Q_i)	%	87,43	76,91	92,57	88,52
14.	-raportat la cărbune (Q_s)	%	78,30	75,65	97,83	97,29
15.	-raportat flux total (Q_i)	%	83,43	70,08	75,58	72,83
16.	-raportat flux total (Q_s)	%	76,10	69,50	81,47	82,33

Tabelul 4.4 Randamentul gazificării în strat

complexe ce se desfășoară în generator. În principiu, modelul matematic cuprinde ecuațiile specifice bilanțului masic și energetic combinate cu relațiile setului echilibrelor chimice, necesare și suficiente pentru descrierea comportării termochimice a sistemului reactant. Prin rezolvarea sistemului de ecuații ale modelului matematic în funcție de principalii parametri de operare - temperatură și presiune - se obține compoziția gazului brut și consumul specific de cărbune și agent de gazificare.

Starea inițială este descrisă de analiza elementară a cărbunelui prin participațiile masice ale constituenților - Cⁱ, Hⁱ, Oⁱ, Sⁱ, Nⁱ, Wⁱ și Aⁱ - de consumul specific de cărbune necesar producerii unității de gaz - B (kg/m³N gaz) - și a consumului specific de agent de gazificare - amestec de aer (L_A m³N/m³N gaz) sau oxigen (L_O m³N/m³N gaz) și abur (L_W kg/m³N). Starea finală este descrisă de constituienții gazului de gazogen exprimați prin participațiile lor volumice - r_{CO}, r_{H2}, r_{CH4}, r_{CO2}, r_{N2}, r_{H2S} și r_{H2O}. S-a considerat că gazul de gazogen nu conține oxigen, întrucât oxigenul conținut de agentul de gazificare se consumă în zona de combustie, în vederea furnizării fluxului termic necesar proceselor endoterme specifice gazificării.

Modelul matematic implică determinarea celor 10 necunoscute ale procesului: consumul specific de cărbune, consumul specific de agent de gazificare aer sau oxigen și abur, compoziția gazului de gazogen, ceea ce conduce la necesitatea scrierii unui sistem de 10 ecuații. Sistemul de ecuații cuprinde ecuațiile bilanțului material al fiecărui element chimic, relațiile echilibrelor chimice necesare și suficiente pentru descrierea comportării termodinamice precum și relația bilanțului termic al sistemului reactant.

Întrucât gazificarea în strat se caracterizează prin circulația în contracurent a cărbunelui față de gazul brut și agentul de gazificare, în prima zona a gazogenului se desfășoară preîncălzirea și uscarea cărbunelui, umiditatea acestuia părăsind gazogenul în gazul brut. În consecință, în zonele următoare ale generatorului intră cărbune anhidru respectiv semicocsuri sau cocsuri ale acestuia, fapt de care trebuie ținut cont la modelarea matematică a gazificării, ceea ce implică necesitatea adoptării analizei elementare a probei anhidre a cărbunelui - C^{anh}, H^{anh}, O^{anh}, S^{anh}, N^{anh} și A^{anh} și consumul specific de cărbune anhidru - B^{anh}. Referitor la compoziția gazului brut, valoarea rezultată în urma modelării gazificării cărbunelui anhidru, trebuie corijată cu cantitatea de vapori rezultați în urma vaporizării umidității cărbunelui.

În consecință, s-au scris relațiile bilanțului material corespunzător fiecărui element chimic:

a - bilanțul masic al carbonului:

$$C^{anh}B^{anh} = (r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4}) \frac{12,011}{22,414} \quad [kg/m^3N \text{ gaz}] \quad (4.1)$$

b - bilanțul masic al oxigenului corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de aer și abur:

$$O^{anh}B^{anh} + L_w \frac{31,999}{2 \cdot 18,015} + 0,21L_A \frac{31,999}{22,414} = (r_{CO_2} + 0,5r_{CO} + 0,5r_{H_2O}) \frac{31,999}{22,414} \quad [kg/m^3N \text{ gaz}] \quad (4.2)$$

- bilanțul masic al oxigenului corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de oxigen și abur:

$$O^{anh}B^{anh} + L_w \frac{31,999}{2 \cdot 18,015} + L_o = (r_{CO_2} + 0,5r_{CO} + 0,5r_{H_2O}) \frac{31,999}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (4.3)$$

c - bilanțul masic al hidrogenului:

$$H^{anh}B^{anh} + L_w \frac{2,0159}{18,015} = (2r_{CH_4} + r_{H_2} + r_{H_2S}) \frac{2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (4.4)$$

d - bilanțul masic al azotului corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de aer și abur:

$$N^{anh}B^{anh} + 0,79L_A \frac{28,013}{22,414} = r_{N_2} \frac{28,013}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (4.5)$$

- bilanțul bilanț masic al azotului corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de oxigen și abur:

$$N^{anh}B^{anh} = r_{N_2} \frac{28,013}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (4.6)$$

e - bilanțul masic al sulfului:

$$S^{anh}B^{anh} = r_{H_2S} \frac{32,06}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (4.7)$$

Sistemul de ecuații ale bilanțului material se completează cu relația participațiilor volumice ale componentelor gazului de gazogen brut rezultat în urma gazificării cărbunelui anhidru a căror sumă trebuie să fie egală cu unitatea, conform relației:

$$r_{CO} + r_{CH_4} + r_{H_2} + r_{CO_2} + r_{N_2} + r_{H_2S} + r_{H_2O} = 1 \quad (4.8)$$

De specificat că, modelul ține cont de necesitatea corijării compoziției gazului brut prin prisma umidității cărbunelui - $W^f B$ - evacuată în gazul de gazogen prin factorul de corecție:

$$\varphi = \frac{1}{1 + W^f B \frac{22,414}{18,015}} \quad (4.9)$$

În vederea descrierii comportării termodinamice a sistemului reactant, similar gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, s-au adoptat: reacția Boudouard, reacția de hidrogenare a carbonului și reacția de gazificare heterogenă cu vapori de apă, corespunzător cărora s-au determinat constantele de echilibru:

- reacția Boudouard:

$$K_p = \frac{p_{CO}^2}{r_{CO_2}} \quad (4.10)$$

- reacția de hidrogenare a carbonului:

$$K_p = \frac{r_{\text{CH}_4}}{p^* r_{\text{H}_2}^2} \quad (4.11)$$

- reacția de gazificare heterogenă cu vapori de apă:

$$K_p = \frac{p r_{\text{CO}} r_{\text{H}_2}}{r_{\text{H}_2\text{O}}} \quad (4.12)$$

Calculul constantelor de echilibru aferente reacțiilor chimice adoptate se efectuează pe baza determinării afinității chimice care depinde de variația entalpiei și entropiei standard a reactanților.

Având în vedere autonomia termică a majorității generatoarelor de gazificare a cărbunilor în strat, conferită de arderea unei fracțiuni a cărbunelui ca suport termic al proceselor endoterme, sistemul de ecuații necesită utilizarea relației bilanțului termic. În esență, bilanțul termic permite determinarea raportului abur/oxigen din agentul de gazificare pe baza echivalenței efectului termic al reacției endoterme a gazului de apă (R2.4) cu reacția exotermă de oxidare (R2.1), ținând cont de efectele termice ale reacțiilor posibile la gazificarea cărbunilor.

Similar cazului gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, energiile intrate corespunzătoare unității de gaz de gazogen sunt determinate de căldura chimică (Q_{cc}) și sensibilă (Q_{cs}) a cărbunelui, de căldura sensibilă a agentului de gazificare amestec de aer (Q_{sLa}) sau oxigen (Q_{sLo}) cu abur (Q_{sLw}). Energiile ieșite constau în căldura chimică (Q_{gc}) și sensibilă a gazului (Q_{gs}) de gazogen și căldura sensibilă (Q_{cens}) a cenușii la evacuarea din generator. Neglijând pierderile specifice gazogenului - pierderi prin gazificarea incompletă a carbonului, prin gudroane, prin schimb termic global cu mediul ambiant - rezultă ecuația bilanțului termic al gazogenului, în cazul utilizării ca agent de gazificare a amestecului de aer cu abur:

$$Q_{cc} + Q_{cs} + Q_{sLa} + Q_{sLw} = Q_{gc} + Q_{gs} + Q_{cens} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (4.13)$$

respectiv, corespunzător utilizării ca agent de gazificare a amestecului de oxigen cu abur:

$$Q_{cc} + Q_{cs} + Q_{sLo} + Q_{sLw} = Q_{gc} + Q_{gs} + Q_{cens} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (4.14)$$

În consecință, rezultă modelul matematic al gazificării cărbunilor în strat în condiții de echilibru termodinamic care este practic un sistem format din 10 ecuații neliniare - grupate funcție de utilizarea ca agent de gazificare a amestecului de aer sau oxigen cu abur, constând din relațiile bilanțului material - ecuațiile (4.1) - (4.7), relația participațiilor gazului de gazogen - ecuația (4.8), relațiile echilibrelor chimice - ecuațiile (4.10) - (4.12) și relația bilanțului termic - ecuația (4.13) sau (4.14). Prin rezolvarea sistemului de ecuații rezultă: compoziția gazului de gazogen, consumul specific de cărbune și al agentului de gazificare - aer sau oxigen cu abur, precum și a compoziției gazului brut. În vederea analizei influenței parametrilor de operare - temperatura și presiunea de gazificare - asupra proceselor complexe ce apar la gazificarea cărbunilor rezultă necesitatea rezolvării sistemului pentru o gamă de temperaturi cuprinsă între 500 °C și 800 °C și de presiuni variind între cea normală și 30 bar, valori uzuale întâlnite la tehnologiile de gazificare a cărbunilor.

Programul de calcul și schema logică a acestuia, prezentate în anexa nr. 1, cuprinde în prima etapă introducerea datelor inițiale - analiza elementară a cărbunelui, urmată de verificarea corectitudinii introducerii datelor de calcul. În continuare, are loc reducerea sistemului prin eliminarea succesivă a necunoscutelor până la o singură ecuație polinomială de grad superior, care urmează a fi rezolvată prin metoda Newton-Raphson. Întrucât polinomul de grad superior are mai multe soluții reale, în următoarea etapă, se determină soluția unică care verifică sistemul. Pe baza soluției obținute are loc determinarea succesivă a tuturor necunoscutelor sistemului, fiecare dintre acestea fiind corelată cu intervalul de valori posibil, în vederea evitării eventualelor erori. Prin rezolvări succesive ale sistemului, corespunzător diferitelor valori ale temperaturii și presiunii, cu influențe asupra constantelor de echilibru, se obține variația compoziției gazului brut și a mărimilor energetice ale acestuia funcție de parametrii de operare.

Algoritmului de calcul anterior prezentat permite modelarea matematică a gazificării cărbunilor în strat în condiții de echilibru termodinamic, ceea ce a condus la determinarea parametrilor de compoziție și energetici ai gazificării în strat a ligniților de Voivozi, Rovinari și Borozel, prezentați în anexa nr. 1. În vederea ilustrării concluziilor oferite de modelul matematic, corespunzător gazificării lignitului de Voivozi cu amestec de aer cu abur, s-a prezentat în figura 4.4 variația compoziției gazului brut funcție de temperatura și presiunea de operare, în figura 4.5 variația consumului specific de cărbune, respectiv de agent de gazificare - amestec de aer cu abur, precum și în figura 4.6 variația puterii calorifice inferioare a gazului brut umed, respectiv anhidru. Similar, pentru cazul gazificării lignitului de Voivozi cu amestec de oxigen cu abur, în figura 4.7 este prezentată variația compoziției gazului brut funcție de temperatura și presiunea de operare, în figura 4.8 variația consumului specific de cărbune, respectiv de agent de gazificare - amestec de oxigen cu abur, precum și în figura 4.9 variația puterii calorifice inferioare a gazului brut umed, respectiv anhidru. De remarcat că, diferența dintre cazul real și cel teoretic anterior prezentat, datorită faptului că s-au luat în considerare datele termodinamice corespunzătoare elementelor chimice pure, care diferă de cele ale cărbunilor și semicocsurilor acestora. De asemenea, cinetica proceselor termochimice și fizice complexe ce au loc în gazogen, nu permite, în cazul real al generatotului, atingerea echilibrului chimic.

4.6. INFLUENȚA PARAMETRILOR DE OPERARE ASUPRA GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR ÎN STRAT

Parametrii de operare, în principal temperatura și presiunea, prin modificarea echilibrelor chimice influențează sensibil compoziția gazului brut și consumurile specifice de cărbune și agent de gazificare, permițând în ipoteza verificării experimentale a rezultatelor analitice, conducerea proceselor termochimice spre producții finali doriți /4.7, 4.8, 4.12/.

4.6.1. INFLUENȚA TEMPERATURII DE GAZIFICARE

Variația temperaturii are influențe majore asupra parametrilor de compoziție și consum ai gazificării, datorită deplasării echilibrelor chimice, creșterea temperaturii favorizând reacția Boudouard și reacția gazului de apă, respectiv defavorizând reacția de hidrogenare.

a. creșterea temperaturii determină majorarea sensibilă a conținutului de CO în detrimentul celui de CO₂ și CH₄, respectiv un conținut relativ constant de H₂,

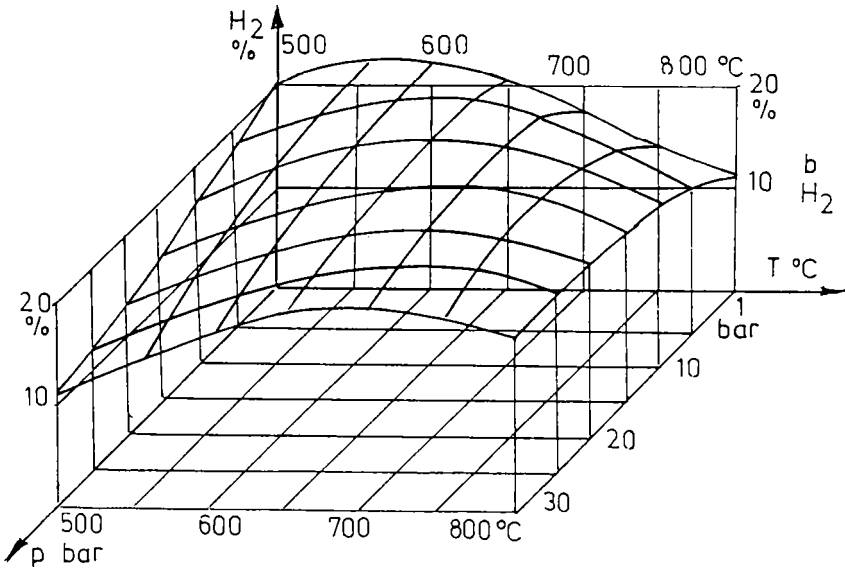
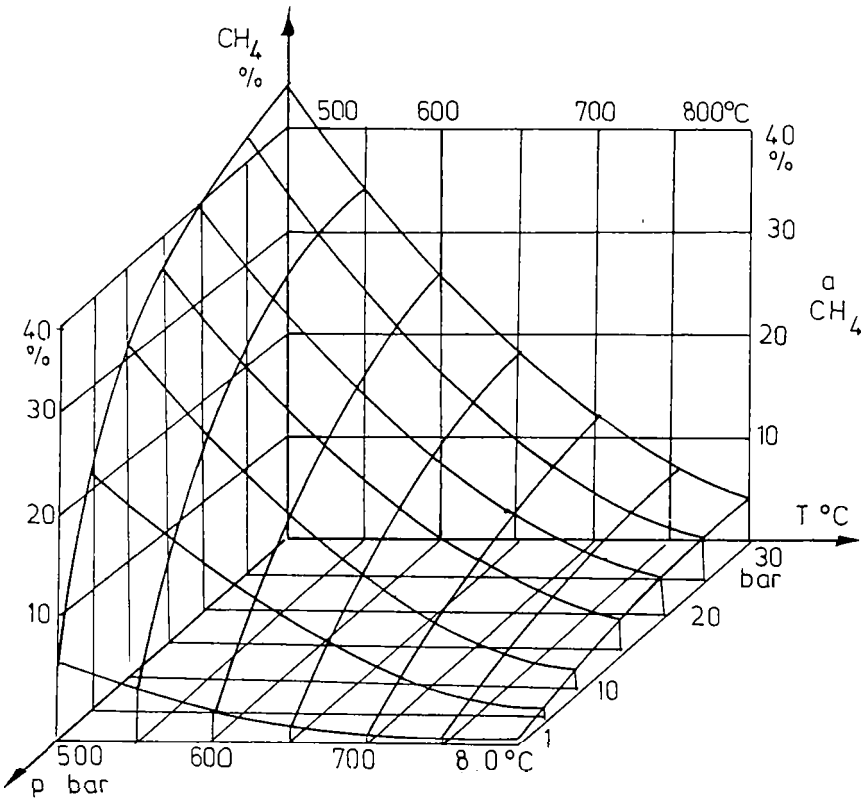


Figura 4.4 Variația compoziției chimice a gazului brut anhidru
 a - variația conținutului de CH_4
 b - variația conținutului de H_2

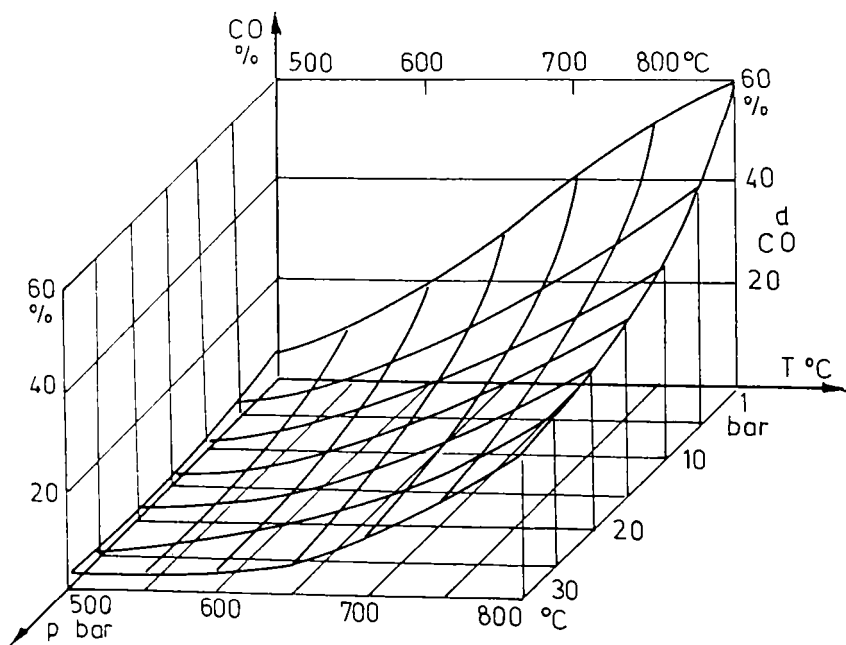
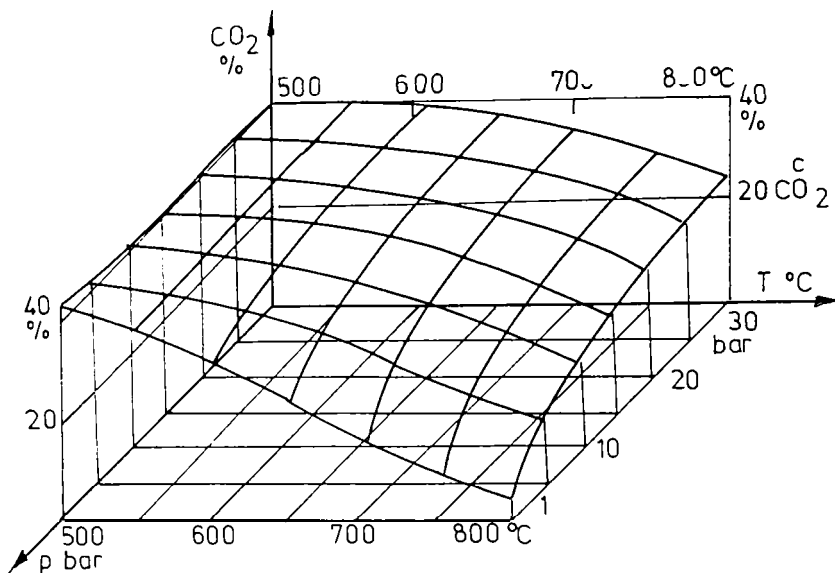


Figura 4.4 Variația compoziției chimice a gazului brut anhidru
 c - variația conținutului de CO_2
 d - variația conținutului de CO

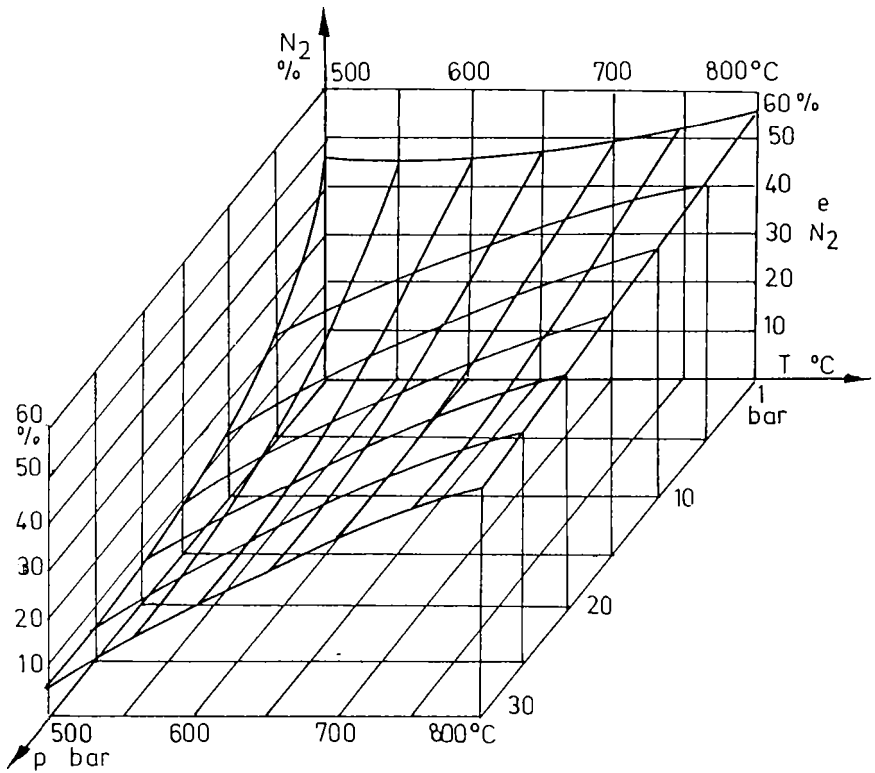


Figura 4.4 Variația compoziției gazului brut anhidru; e - variația conținutului de N_2

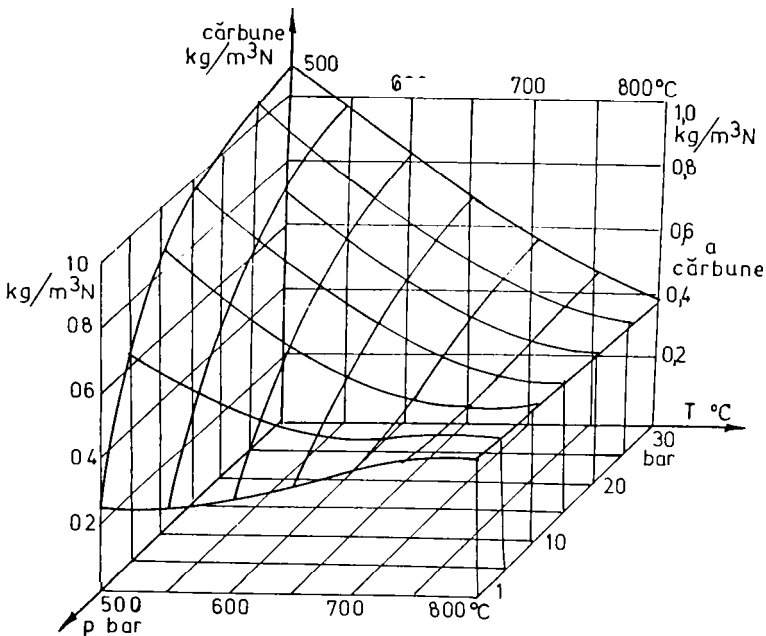


Figura 4.5 Consumuri specifice; a-consumul specific de cărbune [kg/m^3N gaz anhidru]

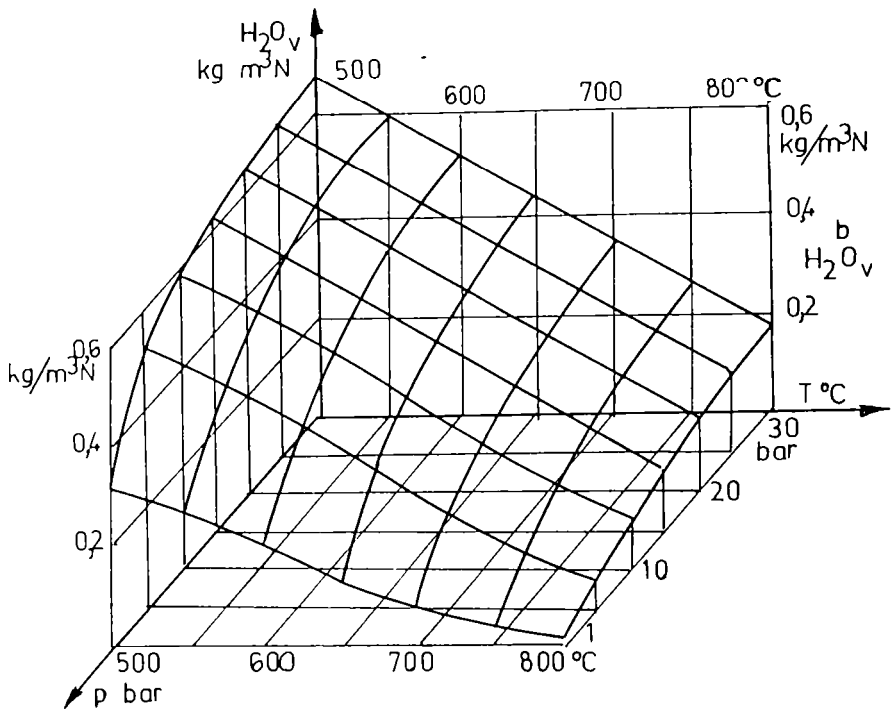


Figura 4.5 Consumuri specifice; b-consumul specific de abur [$\text{kg/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

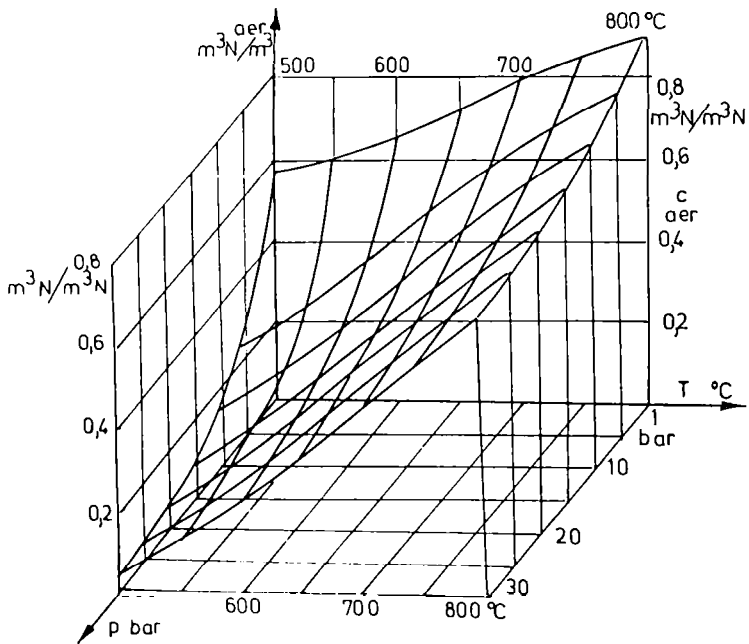


Figura 4.5 Consumuri specifice; c-consumul specific de aer [$\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

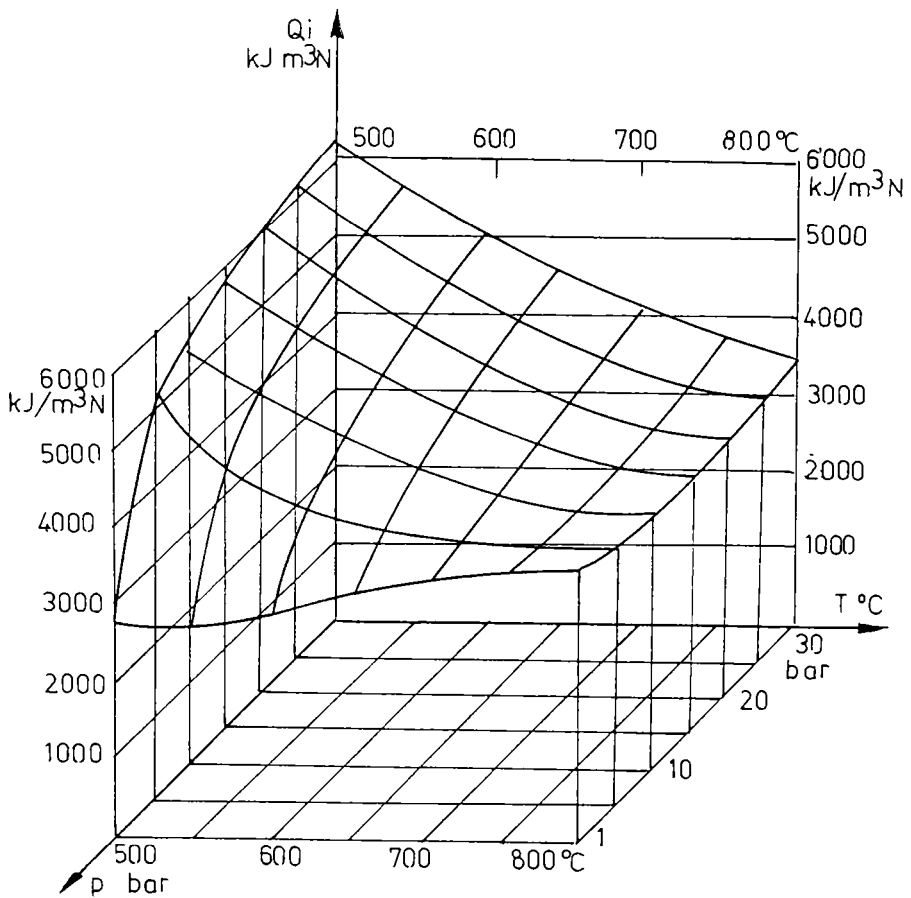


Figura 4.6 Variația puterii calorifice inferioare a gazului de gazogen
a - gaz brut umed [$\text{kJ/m}^3\text{N}$ gaz umed]

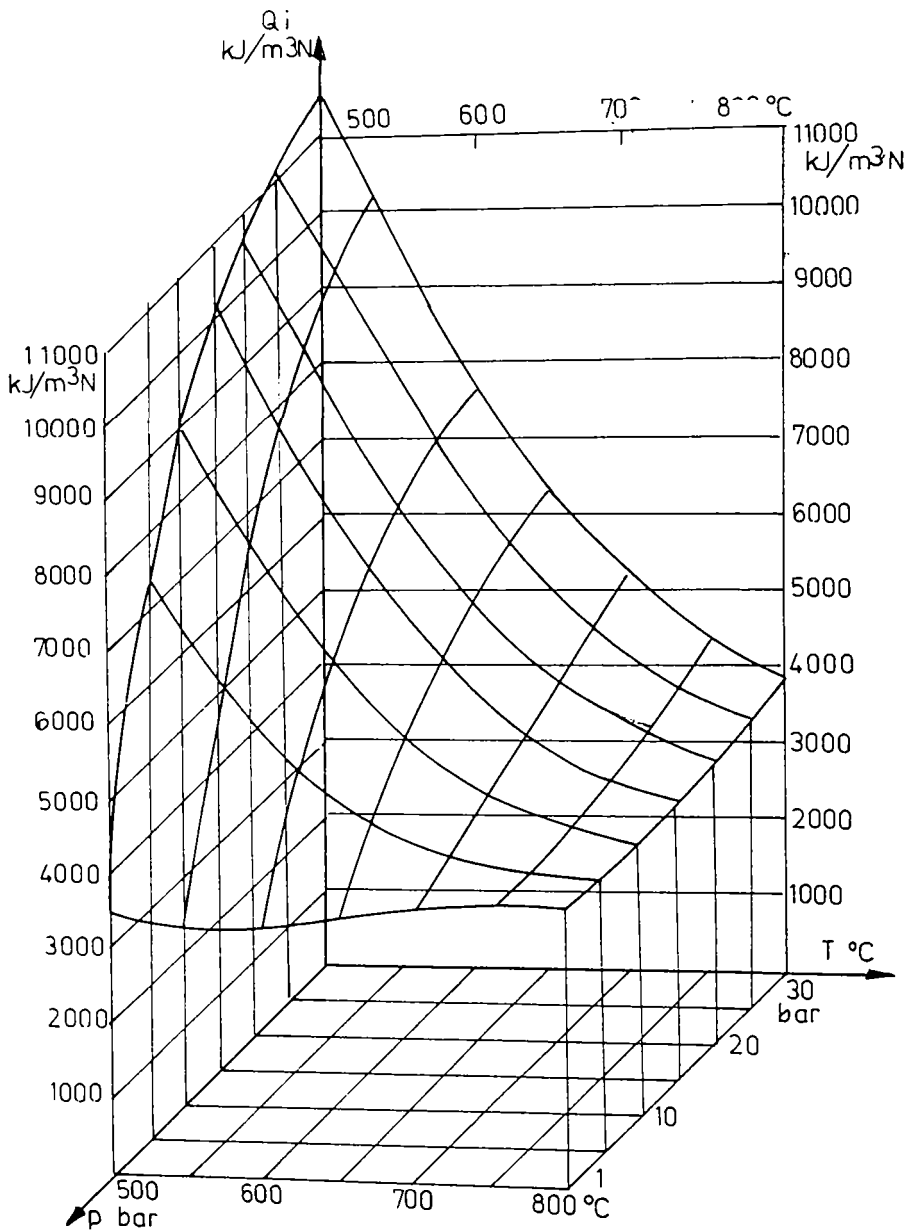


Figura 4.6 Variația puterii calorifice inferioare a gazului de gazogen
a - gaz brut anhidru [$\text{kJ/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

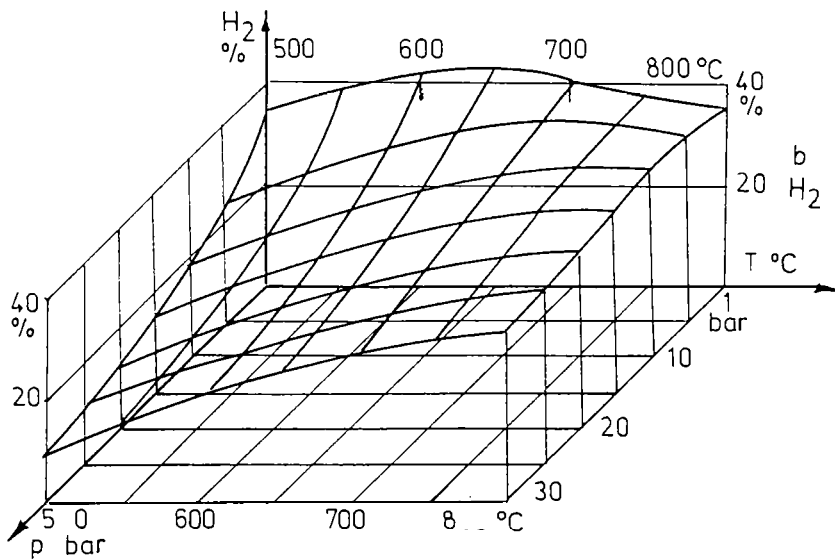
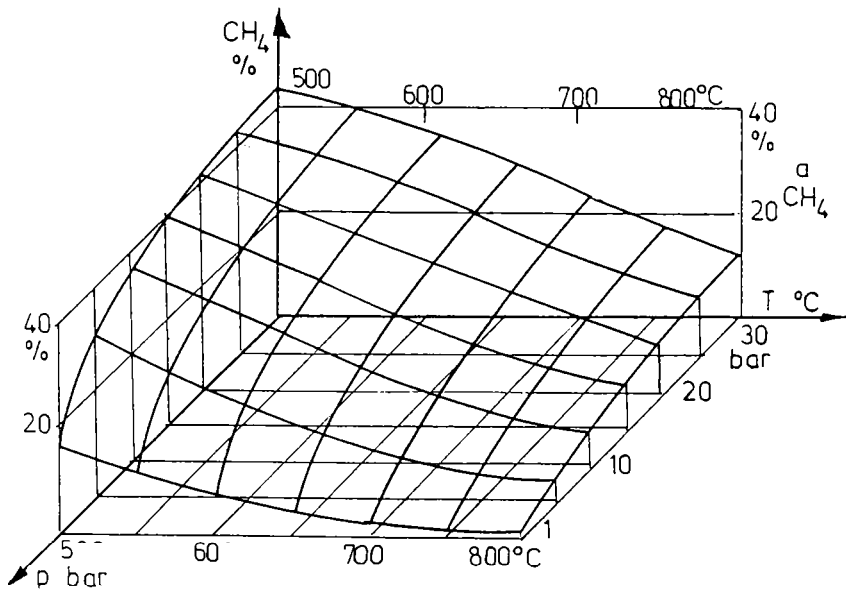


Figura 4.7 Variația compoziției chimice a gazului brut anhidru
 a - variația conținutului de CH_4
 b - variația conținutului de H_2

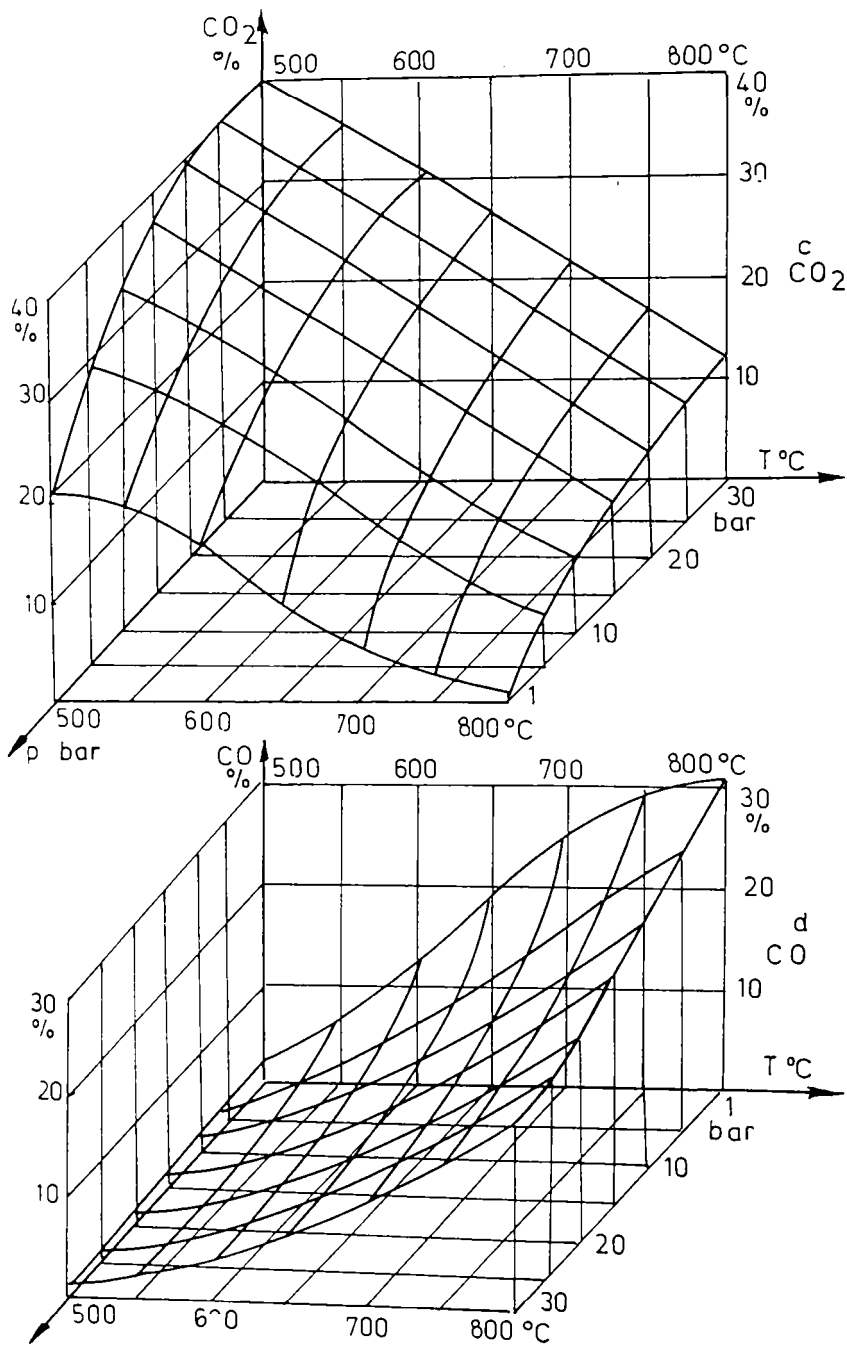


Figura 4.7 Variația compoziției chimice a gazului brut anhidru
 c - variația conținutului de CO₂
 d - variația conținutului de CO

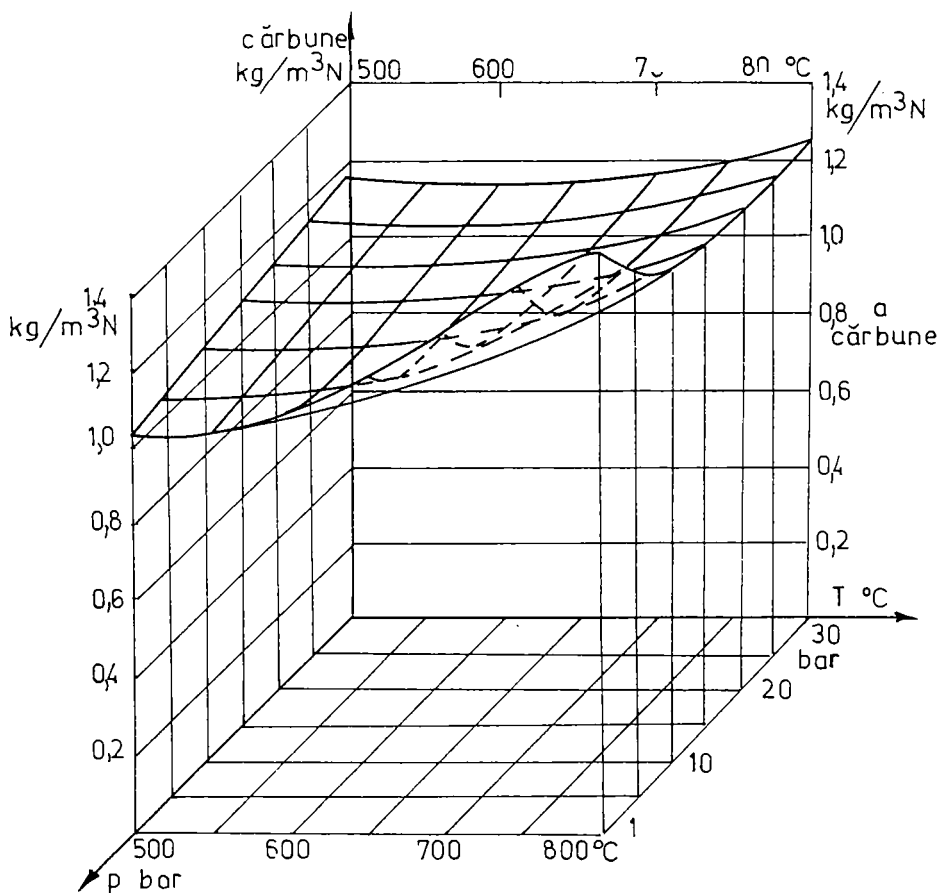


Figura 4.8 Consumuri specifice;
 a -consumul specific de cărbune [$\text{kg/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

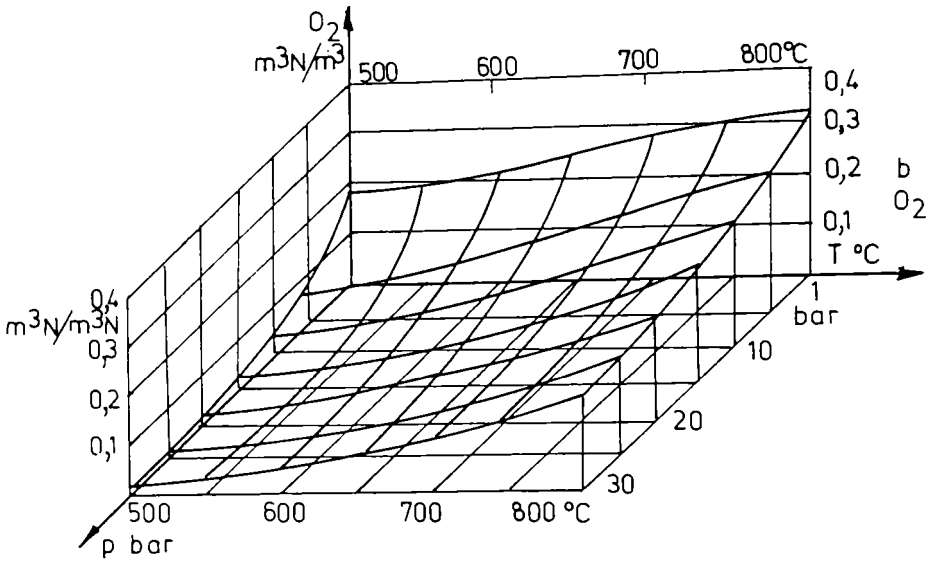


Figura 4.8 Consumuri specifice;
 b-consumul specific de oxigen [$\text{m}^3\text{N}/\text{m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

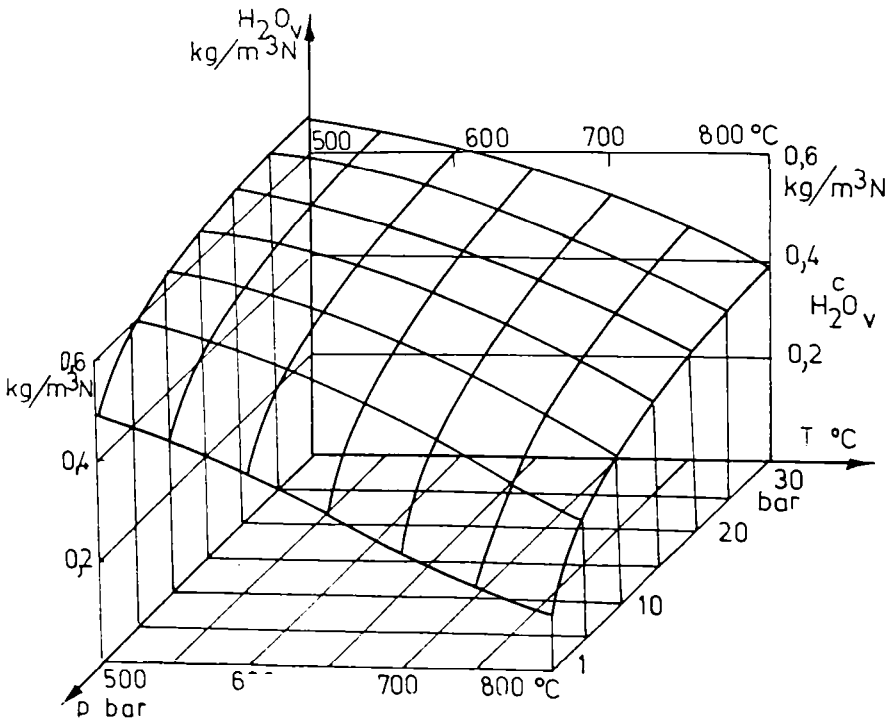


Figura 4.8 Consumuri specifice: c-consumul specific de abur [$\text{kg}/\text{m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

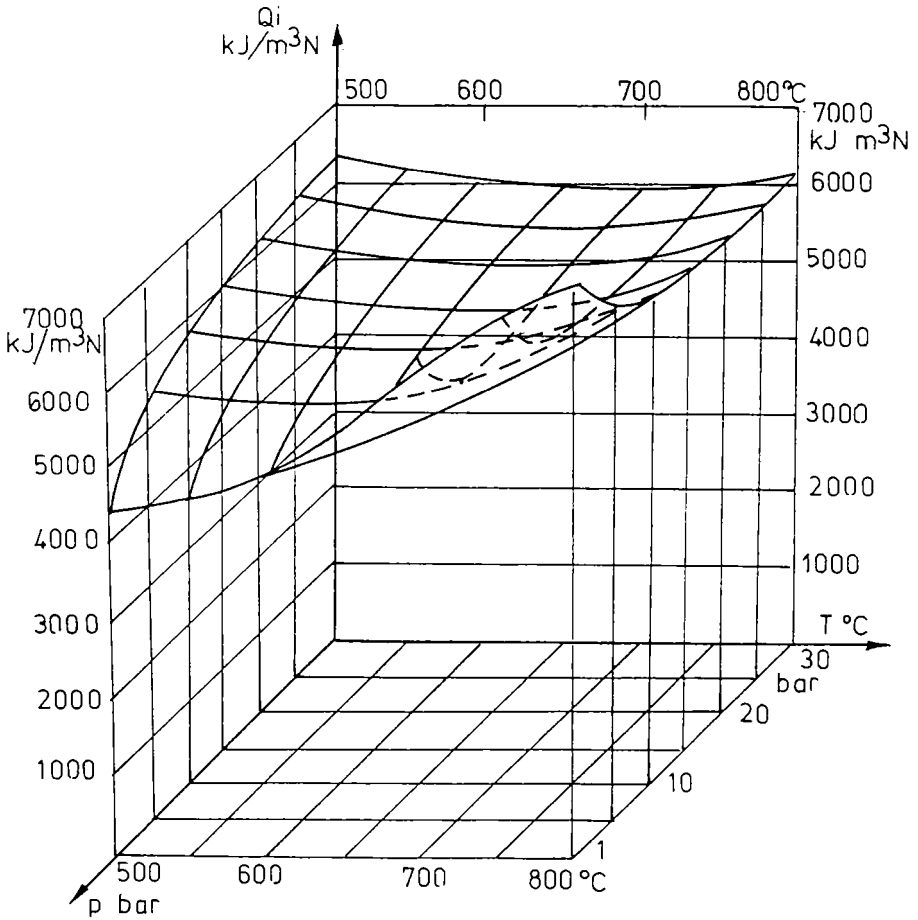


Figura 4.9 Variația puterii calorifice inferioare a gazului de gazogen
a - gaz brut umed [$\text{kJ/m}^3\text{N}$ gaz umed]

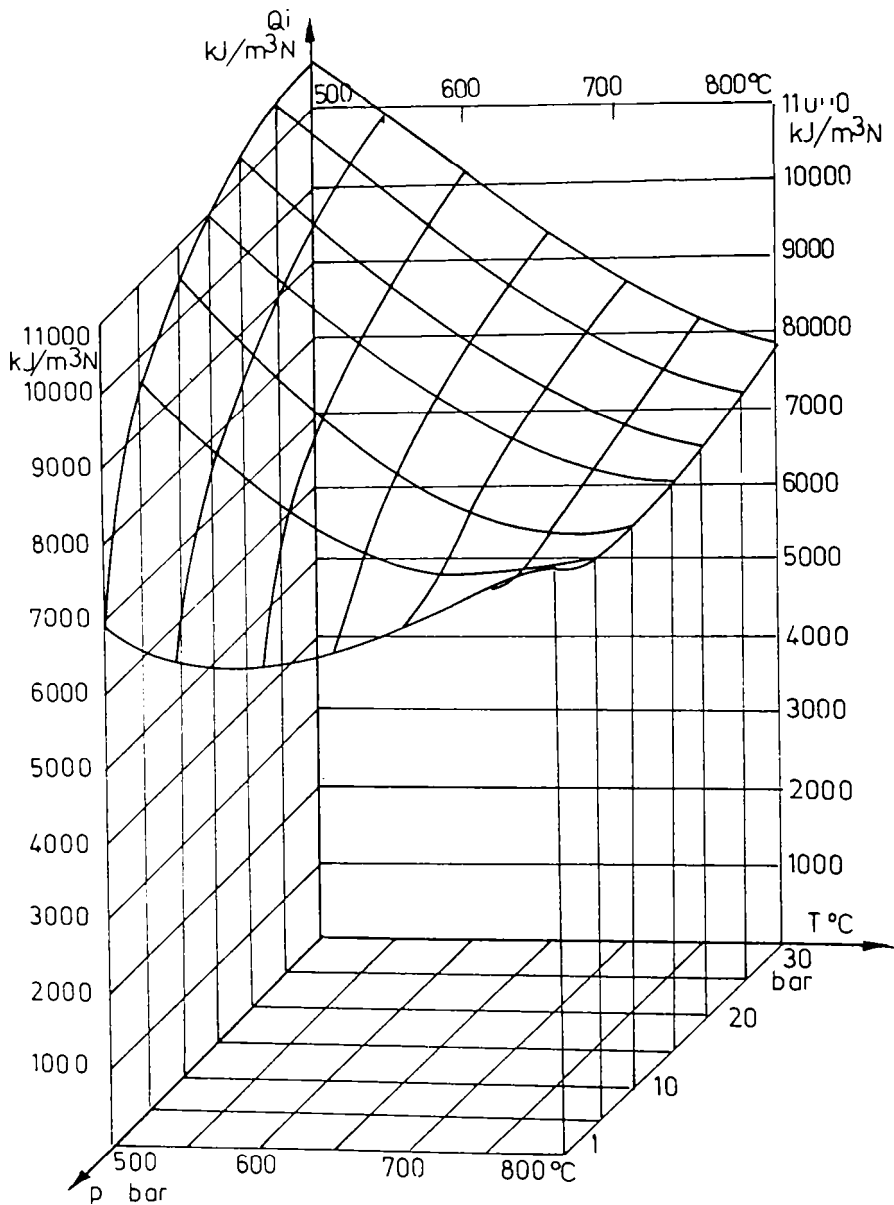


Figura 4.9 Variația puterii calorifice inferioare a gazului de gazogen
a - gaz brut anhidru [$\text{kJ/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

eventual, cu variații reduse ale ponderii acestuia. Diminuarea într-o pondere redusă a conținutului de H_2 cu creșterea temperaturii este determinată de favorizarea reacției de reducere a CO_2 cu H_2 , cu toate că este favorizată, de asemenea reacția gazului de apă. Creșterea temperaturii, evidențiază majorarea ponderii azotului din gazul brut, în cazul utilizării aerului în agentul de gazificare, creștere majoră în domeniul presiunilor înalte datorită creșterii sensibile a consumului de aer solicitat de caracterul puternic endoterm al proceselor desfășurate în aceste condiții. Conținutul ridicat de azot din gazul brut de până la 50 - 55 %, evidențiază avantajele utilizării oxigenului sau a procedeelelor de gazificare alloterme. De remarcat că, prin creșterea temperaturii se constată scăderea sensibilă a ponderii vaporilor de apă conținuți de gazul brut, influențând favorabil eficiența termică a gazificării.

b. Modificarea compoziției gazului brut implică influențe directe asupra puterii calorifice a acestuia. Majorarea temperaturii determină reducerea sensibilă a puterii calorifice a gazului brut anhidru, evidentă în cazul presiunilor ridicate, datorită corelării inverse dintre conținutul de metan și temperatură. La presiuni reduse, variația puterii calorifice a gazului brut anhidru este într-un domeniu îngust, de circa 10 %, observându-se creșterea redusă a acesteia cu temperatura, datorită majorării ponderii oxidului de carbon și a conținutului diminuat de metan care nu are influențe majore.

c. Consumul specific de cărbune necesar producerii unității de gaz anhidru este într-o corelare inversă cu creșterea temperaturii, corelare evidentă în cazul gazificării sub presiune. La presiune normală, se constată o diminuare redusă a consumului de cărbune, având un minim la valori de 600 - 650 °C, urmată de creșterea acestuia.

d. Referitor la consumul specific de agent de gazificare, se constată creșterea cu temperatura a agentului oxidant - aer sau oxigen - și diminuarea consumului de abur. Corelarea directă a consumului oxidantului cu temperatura este determinată de faptul că suportul termic al proceselor endoterme este dat de arderea unei fracțiuni a semicocsului sau cocsului parțial gazificat. Cu toate că reacția gazului de apă este favorizată de creșterea temperaturii, consumul aburului scade datorită producerii în zona de reacție a acestuia, pe baza reacției de reducere a bioxidului de carbon în prezența hidrogenului, reacție accentuată de creșterea temperaturii.

4.6.2. INFLUENȚA PRESIUNII DE GAZIFICARE

Datorită deplasării echilibrelor chimice, variația presiunii influențează parametrii gazificării prin favorizarea, cu majorarea acesteia a reacției de hidrogenare a carbonului și a oxidului de carbon, defavorizând reacția Boudouard și reacția gazului de apă.

a. Creșterea presiunii determină majorarea accentuată a conținutului metanului în detrimentul ponderii hidrogenului și a oxidului de carbon. Conținutul de bioxid de carbon se majorează cu creșterea presiunii la nivele termice ridicate, respectiv se diminuează cu creșterea presiunii în cazul temperaturilor scăzute. De remarcat, majorarea sensibilă a umidității gazului brut determinată de creșterea presiunii de operare cu efecte negative asupra eficienței termice a gazificării.

b. Influența presiunii de operare asupra compoziției gazului brut are implicații și în cazul puterii calorifice, într-o corelare directă cu presiunea, datorită majorării conținutului metanului. În domeniul temperaturilor ridicate, efectul pozitiv al presiunii

asupra reacției de hidrogenare este compensat de influența negativă a temperaturii, ducând la variații reduse ale puterii calorifice.

c. Creșterea presiunii determină sporirea sensibilă a consumului specific de cărbune, datorită favorizării reacțiilor cu scăderea volumului produselor gazoase.

d. Sporirea presiunii conduce la diminuarea consumului specific al oxidantului, întrucât o fracțiune importantă a fluxului termic necesar proceselor endoterme este furnizat de reacția slab exotermă de hidrogenare. Consumul specific al aburului se majorează semnificativ cu creșterea presiunii.

4.6.3. CONCLUZII

Modelarea matematică a gazificării ligniților autohtoni în strat în condiții de echilibru termodinamic permite, cu condiția confirmării ipotezelor prin determinări experimentale, analiza comparativă a procedeelelor de gazificare în vederea adoptării soluției optime de operare, în condițiile reducerii considerabile a volumului experimental.

Concluziile definitive trebuie să se bazeze și pe analiza rezultatelor obținute pe baza cineticii proceselor fizico-chimice complexe ce apar la gazificarea cărbunilor, aceasta întrucât în cazul real cinetica proceselor termochimice nu permite atingerea echilibrului chimic.

CAPITOLUL 5

GAZIFICAREA CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

Analiza teoretică a gazificării în strat a cărbunilor indică faptul că circulația în contracurent a reactanților, în pofida avantajelor determinate de recuperarea unei fracțiuni a căldurii sensibile a cenușii la admisia agentului de gazificare, respectiv a unei părți a căldurii sensibile a gazului brut în vederea pregătirii termice a cărbunelui, are ca principal dezavantaj umiditatea ridicată a gazului brut, reflectată defavorabil de bilanțul masic și energetic al apei. Circulația în contracurent implică introducerea prin partea inferioară a generatorului, printre barele grătarului a aburului, respectiv colectarea prin partea superioară în gazul brut a umidității cărbunelui, rezultată în urma uscării sale și care în consecință nu participă la procesele complexe de gazificare. Bazat pe efectele termice ale reacției exoterme de oxidare (R 2.1) și de gazificare (R 2.4) a carbonului, în cazul reacției globale stoichiometrice, unității de carbon îi este necesar 1,152 kg abur. În cazul ligniților autohtoni, având la proba inițială un conținut de carbon de 25-35 % și de umiditate de 35-45 %, umiditatea proprie a cărbunelui este suficientă în vederea gazificării (lignit Rovinari $W/C^I = 1,77$, lignit Voivozi $W/C^I = 1,33$). În consecință, apare ca rațională utilizarea schemei de circulație în echicurent a reactanților, întrucât aburul rezultat în zona de uscare prin vaporizarea umidității inițiale a cărbunelui constituie agentul de gazificare. De menționat că, este posibil ca echilibrele chimice ale reacțiilor complexe ce apar la gazificarea cărbunilor să solicite introducerea, din exterior a unui eventual exces de umiditate față de cea din zăcământ.

Combustia în interiorul generatorului a fracțiunii de cărbune ramașă nereacționată prezintă ca principal avantaj autonomia termică a procesului, determinând însă probleme funcționale în cazul cărbunilor având temperaturi scăzute de topire a cenușii, ceea ce conduce la necesitatea răcirii stratului de cenușă sub limita de înmuiere. În consecință, aburul introdus ca agent de gazificare devine și un moderator termic determinând majorarea consumului cu circa 200-350 % față de condițiile stoichiometrice. În consecință, consumul ridicat de abur, într-o pondere semnificativă nededuscompus, reprezintă circa 7,44-17,15 % din fluxul termic total intrat, respectiv umiditatea gazului brut circa 10,43-17,25 % din energiile ieșite.

Dificultățile funcționale și consumul energetic suplimentar conduc la ideea utilizării proceselor alloterme, care datorită furnizării din exterior al fluxului termic necesar gazificării, permit conducerea facilă a operării la nivelul termic dorit. Pe de altă parte, procesele alloterme - datorită eliminării zonei de ardere din gazogen - permit obținerea unui gaz combustibil de calitate, practic lipsit de azot, care în cazul gazificării autoterme necesită utilizarea oxigenului în agentul de gazificare, conducând la cheltuieli suplimentare sensibil majorate. De asemenea, datorită furnizării fluxului termic din exterior este posibilă înlocuirea combustibililor poluați cu surse energetice nepoluante, eventual cu energia termică furnizată de reactoarele nucleare, ținând cont ca în Germania prețul căldurii furnizate de reactoarele nucleare este cu circa 50 % mai scăzut față de cea furnizată prin arderea cărbunelui.

În concluzie, apare ca rațională utilizarea în echicurent a umidității proprii a cărbunelui, ca agent de gazificare în cadrul unui proces alloterm bazat pe fluxul

termic furnizat din exterior, obținut fie prin arderea unei fracțiuni a gazului brut produs sau a fracțiunii de semicocs ramasă negazificată, fie pe baza energiei termice furnizate de reactoarele nucleare, conform previziunilor legate de generația a III-a de generatoare.

Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie conduce spre principalele avantaje previzibile determinate de reducerea consumului energetic necesar preparării agentului de gazificare, implicând astfel majorarea eficienței gazificării cu circa 5-8 %, cât și posibilitatea obținerii unui gaz combustibil de calitate lipsit de azot în condițiile eliminării cheltuielilor de producere ale oxigenului. De asemenea, datorită temperaturilor de operare, determinate de reacțiile termochimice de gazificare funcție de reactivitatea cărbunilor, sensibil diminuate față de procesele autoterme, riscul aglomerării particulelor este evitat. În cazul circulației în echicurent, temperatura de colectare a gazului brut este net superioară față de cazul circulației în contracurent, ceea ce implică obligativitatea recuperării căldurii sensibile a acestuia, preferabil în cadrul procesului, eventual pentru preîncălzirea aerului de combustie sau de diluție în cazul furnizării fluxului termic exterior prin arderea unei fracțiuni a gazului brut produs.

Pe plan mondial primele cercetări de principiu referitoare la posibilitatea gazificării cu umiditatea proprie a cărbunilor au fost întreprinse în cadrul politehnicii din Aachen (R.W.T.H.). În prima etapă a cercetării, s-au realizat mai multe tipuri de cuptoare tubulare cu transport mecanic sau în pat fluidizat a cărbunelui, urmate, într-o altă cercetare de varianta unui tub revolutiv. Prepararea în cadrul procesului a agentului de gazificare din umiditatea proprie a cărbunelui este, de asemenea, caracteristica "generatorului subteran" în cazul gazificării în situ a cărbunilor.

5.1. GAZIFICAREA CU UMIDITATE PROPRIE ÎN CUPTOARE TUBULARE

În cadrul politehnicii din Aachen, începând din 1967 s-au întreprins primele cercetări de principiu în vederea elucidării posibilității tehnice a gazificării cu umiditatea proprie a cărbunelui brun / 5.1, 5.2, 5.3/.

Primul stand experimental constă dintr-un cuptor tubular având lungimea de 1.000 mm și diametrul interior de 60 mm, încălzit electric din exterior, prin care cărbunele cu granulația de până la 6 mm este transportat mecanic prin intermediul unui șnecl elicoidal. La partea anterioară, cuptorul tubular este racordat la buncărul de alimentare a cărbunelui, iar în partea posterioară la sistemul de colectare a gazului brut, după o prealabilă desprăfuire grosieră, și camera de evacuare a cenușii.

În principiu, deși transportul mecanic cu ajutorul șneclului apare avantajos datorită uniformității debitului în lungimea cuptorului tubular precum și datorită evitării stagnării sau blocării materialului solid, acesta nu poate fi luat în considerare în cazul instalațiilor tehnice de dimensiuni cvasiindustriale. Corespunzător posibilitului generator industrial această variantă de transport - necesitând probabil un fascicol compus din zeci sau sute de țevi, pe lângă valoarea ridicată a investiției, determină un consum energetic ridicat, ceea ce afectează sensibil economicitatea procedurii. În consecință, al doilea cuptor tubular permite atât transportul mecanic - în varianta inițială - cât și cel pneumatic - în pat fluidizat al particulelor de cărbune.

Generatorul, prezentat schematic în figura 5.1, este format dintr-un cuptor tubular cu lungimea de 2.500 mm și diametrul interior de 60 mm, fiind prevăzut în exterior cu 3 rezistențe electrice, în vederea furnizării diferențiate pe lungimea generatorului a fluxului termic necesar gazificării. Cărbunele, introdus prin intermediul unui șnecl transportor din buncărul de alimentare în sistemul de fluidizare, este fluidizat și transportat pneumatic cu bioxid de carbon, adoptat ca adaos de reactant pentru gazificare. La partea posterioară, generatorul este prevăzut cu sistemul de

evacuare a cenușii respectiv de colectare al gazului brut, care permite desfășurarea grosieră și racirea în vederea condensării hidrocarburilor superioare.

În vederea stabilirii setului de date solicitate de proiectarea și exploatarea unei instalații industriale formată din mai multe cupetoare tubulare, s-a realizat generatorul tubular cu lungimea mărită de 10 m având diametrul interior de 60 mm, practic un modul al instalației industriale, prezentat în figura 5.2. Lungimea generatorului tubular a fost sporită în vederea măririi duratei de staționare

a cărbunului în zona de reacție, în vederea sporirii gradului de conversie al carbonului în gaze combustibile. Condițiile dificile de operare: temperaturi relativ ridicate 800 - 900 °C, determinate de reactivitatea scăzută a cărbunului brun de Rin și presiunea de până la 10 bar, au condus la adoptarea variantei constructive cu manta dublă prevăzută în spațiul tubular cu azot, în vederea diminuării solicitării mecanice a matalii interioare. Sistemul de fluidizare permite ale distribuiea cărbunului transportat

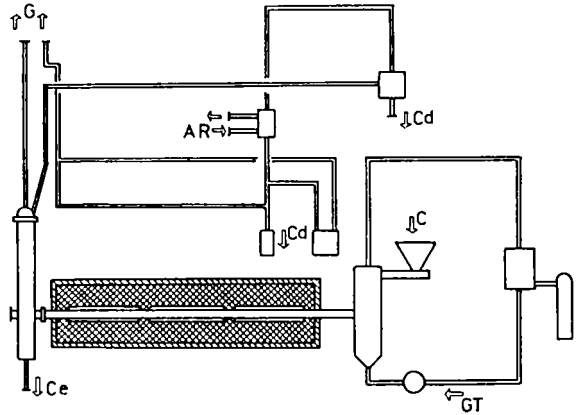


Figura 5.1. Cuptor tubular în pat fluidizat
AR - apă de răcire; C - cărbune; Cd - condensabile;
Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; GT - gaz de transport

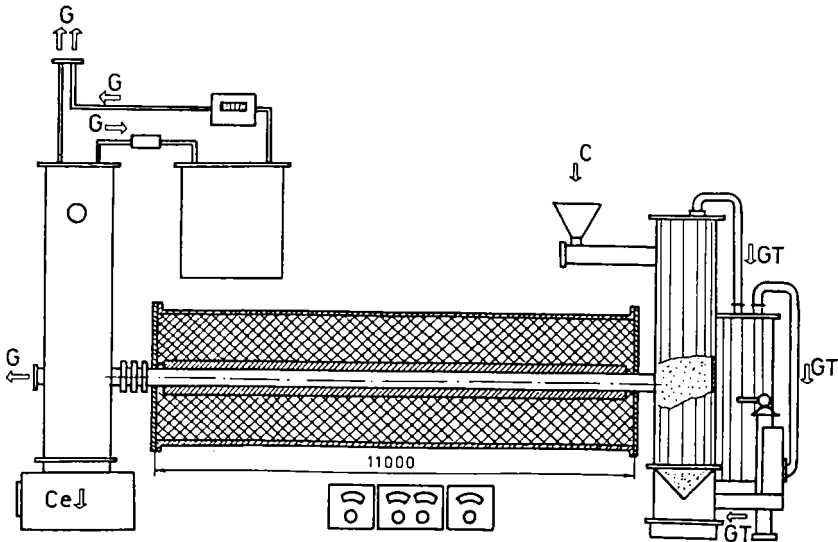


Figura 5.2. Cuptor tubular cu umiditate proprie - modulul instalației industriale
C - cărbune; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; GT - gaz de transport

pneumatic cu bioxid de carbon în eventualele țevi generatorului industrial și modificarea debitului printr-o instalație de dozare cu jgheab vibrator.

Aparatura de măsură aferentă generatorului tubular permite, prin sistemul de dozare al cărbunelui, determinarea debitului de combustibil, a temperaturii în diferite zone ale cuptorului tubular și căderea de presiune determinată de transportul pneumatic. Sistemul de colectare al gazului brut este prevăzut cu analizator automat al compoziției acestuia precum și cu aparatura necesară determinării debitului gazului și a cenușii.

Cărbunele brun de Rin, cu umiditatea inițială din zăcământ de circa 60 %, având granulația sub 2 mm, este succesiv preîncălzit, uscat pe circa 10 % din lungimea cuptorului și devolatilizat. Degajarea volatilelor are loc în domeniul de temperaturi de 300-600 °C pe circa 35 % din lungimea generatorului. Semicocsul rezultat este gazificat la temperaturi de 600-850 °C cu vaporii de apă rezultați în urma vaporizării umidității inițiale pe circa 40 % din lungimea cuptorului. În zona finală, pe circa 15 % are loc postgazificarea restului de cocs rămas nereacționat pe baza

căldurii sensibile a gazului brut rezultat în stadiul anterior, nefiind necesară încălzirea suplimentară a cuptorului tubular. Gazificarea cărbunelui se bazează în principal pe reacția heterogenă a carbonului cu aburul (R 2.4) și într-o pondere redusă pe reacția Boudouard, datorită temperaturilor relativ scăzute din cuptor, din acest punct de vedere nefiind justificată utilizarea bioxidului de carbon ca reactant în adaos.

Profilul variației temperaturii precum și a compoziției gazului brut pe lungimea generatorului tubular sunt prezentate în figura 5.3.

Gazificarea cărbunelui brun de Rin cu umiditatea proprie permite obținerea unui gaz combustibil de calitate, având compoziția medie: CO^i 14,85 %, H_2^i 37,59 %, CO_2^i 26,99 %, N_2^i 0,25 %, CH_4^i 2,32 % și H_2O^i 18 %, în condițiile unui randament al conversiei car-

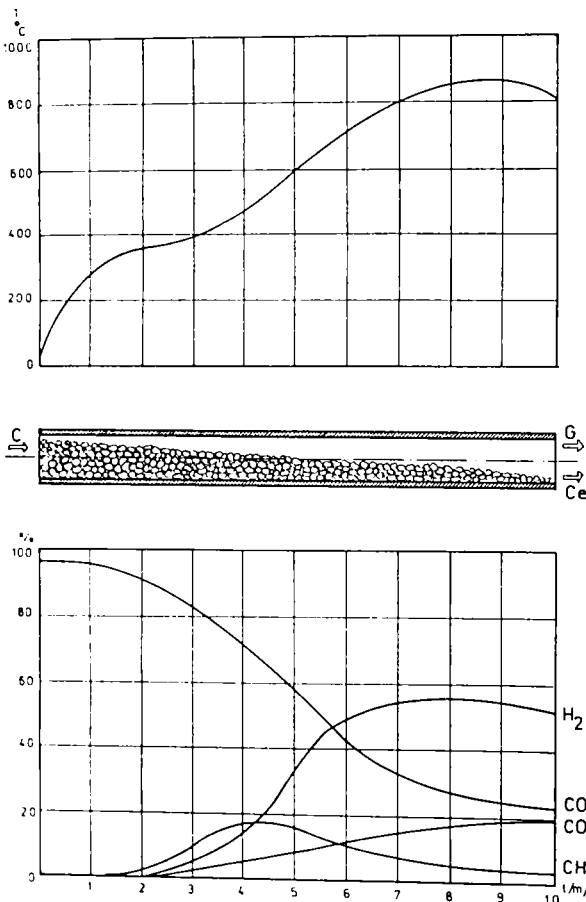


Figura 5.3 Variația temperaturii și compoziției în cazul gazificării cărbunelui brun de Rin cu umiditatea proprie /5.4/ C - cărbune, Ce - cenușă, G - gaz de gazogen

bonului de 73-80 %. Fiind un proces alloterm, fluxul termic furnizat din exterior este de circa 25-30 % din fluxul total intrat, respectiv în vederea gazificării unității de cărbune este necesară arderea a circa 0,5-0,6 kg cărbune, în ipoteza unui randament al arderii și transferului termic de 70-75 %. De remarcat, umiditatea gazului brut, net diminuată față de cazul gazificării în strat, indicând că circa 30 % din umiditatea inițială a cărbunelui nu participă la reacțiile termochimice, fiind regăsită nedescompusă în gazul brut.

Principali parametri energetici și de compoziție ai gazificării cărbunelui cu umiditatea proprie în generatorul tubular cu lungimea de 10 m sunt prezentați în tabelul 5.1, iar elementele bilanțului masic și energetic sunt redată sub forma diagramei Sankey în figura 5.4 / 5.4/.

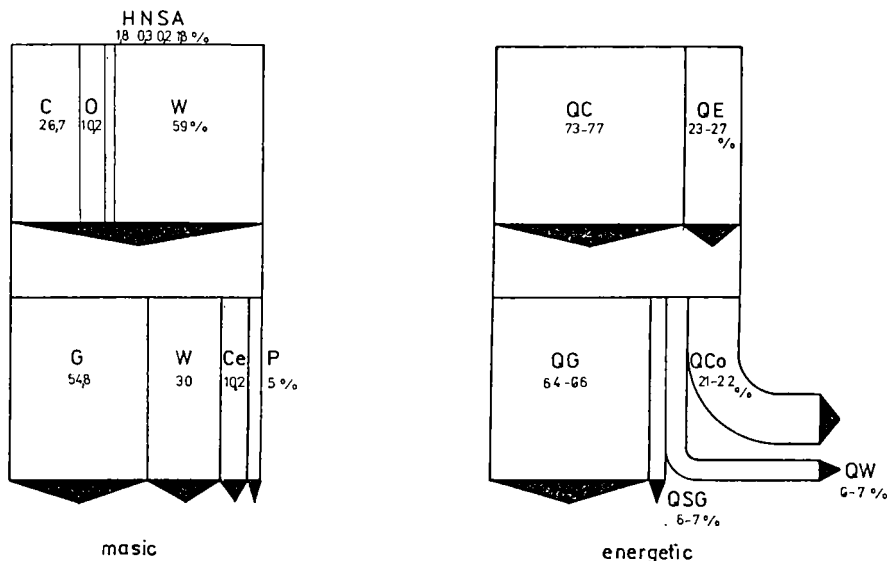


Figura 5.4. Bilanțul masic și energetic al gazificării cărbunelui brun de Rin cu umiditatea proprie
 Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; W - umiditate; P - produși secundari
 QC - căldură chimică cărbune; QE - flux furnizat din exterior; QG - căldură chimică gaz;
 QSG - căldură sensibilă gaz; QW - căldură sensibilă umiditate gaz;
 Qco - căldură chimică condensabilă

Prefigurarea generatorului tubular de dimensiuni industriale, prezentat principal în figura 5.5, constă dintr-un fascicol de țevi orizontale fixate în partea anterioară la sistemul de fluidizare a cărbunelui, respectiv la partea posterioară în buncărul de evacuare a cenușii și colectare a gazului brut. Cărbunele cu granulația sub 2 mm este fluidizat și transportat pneumatic prin interiorul țevilor de agentul transportor, bioxid de carbon din care o parte urmează a fi recirculat în sistemul de fluidizare. Gazificarea se desfășoară pe baza energiei termice furnizate din exterior prin intermediul gazelor fierbinti, care sunt fie gaze arse rezultate în urma arderii unei fracțiuni a combustibilului produs sau a cărbunelui, fie heliu ca agent termogen în cazul utilizării reactoarelor nucleare de temperaturi ridicate. Schema instalației globale aferentă gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie este prezentată în figura 5.6, cuprinzând pe lângă generatorul propriu-zis, instalațiile auxiliare de producere a energiei termice necesare proceselor endoterme de gazificare, respectiv echipamentele de tratare ale gazului brut. Datorită ponderii însemnate a carbonului nereacționat, evacuat în cenușă, apare rațională gazificarea în strat fluidizat a

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	CUPTOR TUBULAR	TUB REVOLUTIV
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE				
1.	Cărbune - debit	kg/h	3,8	5,0
2.	- granulație	mm	2	--
3.	- compoziție C ^I	%	26,3	27,39
4.	- H ^I	%	2,0	1,74
5.	- S ^I	%	0,2	0,14
6.	- N ^I	%	0,4	0,3
7.	- O ^I	%	9,7	8,81
8.	- W ^I	%	59,0	60,0
9.	- A ^I	%	2,4	1,62
10.	-putere calorifică inferioară	kJ/kg	10.572	11.394
11.	Energie exterioară	kJ/kg car	4.000 ^x	4.200-4.400 ^x
PARAMETRII MĂRIMILOR IESITE				
12.	Gaz de generator - debit	m ³ N/h	4,1	5,35 ^x
13.	- compoziție CO ^{anh}	%	18,11	30,25
14.	- H ₂ ^{anh}	%	45,84	56,38
15.	- CO ₂ ^{anh}	%	32,92	10,87
16.	- N ₂ ^{anh}	%	0,3	--
17.	- CH ₄ ^{anh}	%	2,83	2,5
18.	-putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	9.278	10.835
19.	cenușă - debit	kg/h	0,36	0,25-0,3
20.	- conținut carbon	%	72,2	60,52
21.	Eficiența gazificării - conversie carbon	%	73-80	86,5
22.	- randament chimic	%	62-68	70-74 ^x
23.	- randament termic	%	70-75	75-78 ^x

Tabelul 5.2 Principalii parametri energetici și de compoziție ai gazificării cu umiditatea proprie în generatorul tubular și tubul revolutiv; ^x - date calculate.

acesteia într-un generator Hochtemperatur Winkler (H.T.W.). Gazul de generator obținut în urma gazificării cocsului nereacționat împreună cu o fracțiune a gazului produs în urma gazificării cu umiditate proprie asigură, în urma arderii într-un focar industrial a fluxului termic necesar gazificării, conform schemei din figura 5.6.a. Pe de altă parte, fluxul termic poate fi obținut prin arderea gazului produs prin gazificarea unei fracțiuni a cărbunelui de alimentare, conform schemei din figura 5.6.b. Gazul brut produs urmează a fi succesiv: desprăfuit, răcit și purificat, eventual metanat în vederea obținerii substitutului de gaze naturale (S.N.G.). Randamentul producerii S.N.G., respectiv a energiei electrice pe baza instalațiilor globale prezentate este de circa 48 %, în cazul arderii unei fracțiuni a gazului produs, respectiv 52 % în cazul gazificării suplimentare a carbonului, comparativ cu instalația Koppers - Totzek având un randament global de 49 %.

Comparativ cu gazificarea în pat fluidizat conform procedurii H.T.W. și cu hidrogazificarea cărbunilor pe baza tehnologiei Hydrierende Kohlevergasung (H.K.V.),

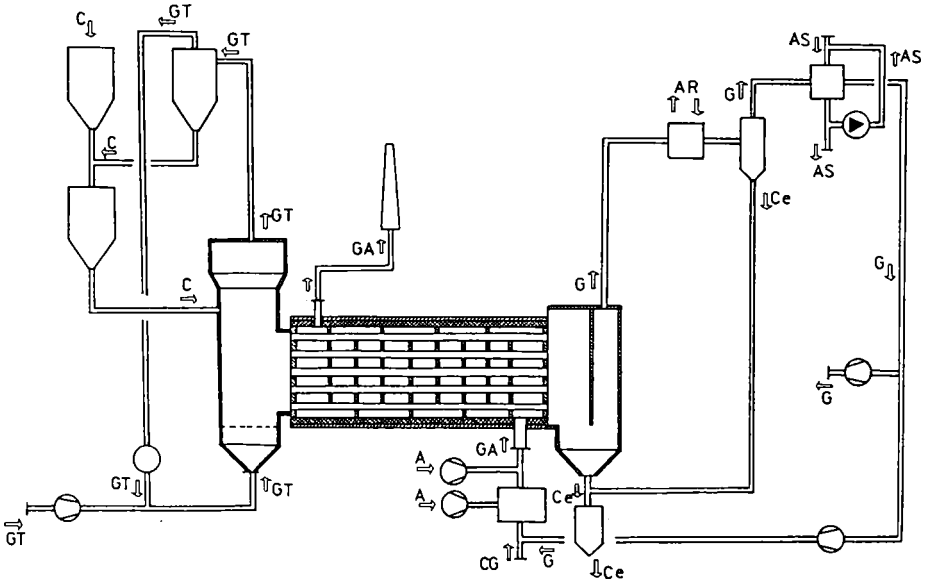


Figura 5.5. Tehnologia de gazificare cu umiditate proprie - schema instalației industriale
 A - aer; AR - apă răcire; AS - apă spălare; C - cărbune; Ce - cenușă; CG - combustibilul gazos;
 G - gaz de gazogen; GA - gaze de ardere; GT - gaz de transport;

în tabelul 5.3, sunt prezentați principalii parametri funcționali ai gazificării cu umiditatea proprie. Demn de remarcat, randamentul termic al gazificării cu umiditatea proprie de 68-74 %, sensibil majorat față de gazificarea în pat fluidizat H.T.W. de circa 61 %, respectiv față de cazul hidrogazificării H.K.V. având valori de 56-72 %. Referitor la gradul de conversie al carbonului eficiența cea mai mare apare în cazul H.T.W. de peste 90 %, față de gazificarea cu umiditate proprie având valori de 80 %, respectiv de peste 60 % în cazul hidrogazificării H.K.V. De menționat că, față de gazificarea în pat antrenat, conform procedurii Koppers - Totzek, caracterizată de randamentul termic de 86 %, ținând cont de consumul energetic necesar uscării

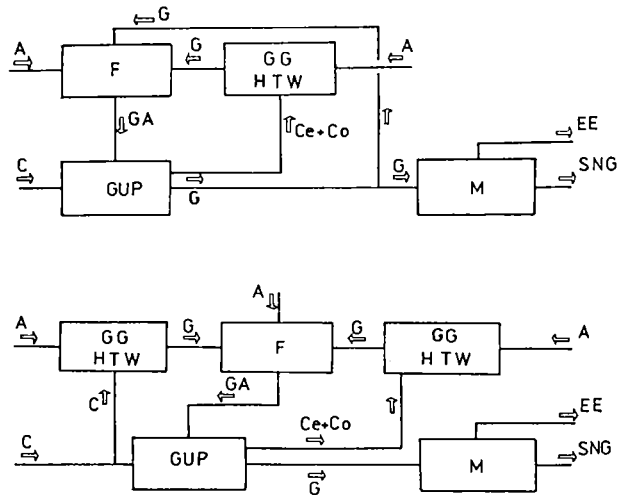


Figura 5.6. Principiul tehnologiei gazificării cu umiditatea proprie
 A - aer ardere; C - cărbune; Ce - cenușă; Co - cocs;
 EE - energie electrică; F - focar industrial; G - gaz de gazogen;
 GA - gaze de ardere; GG HTW - generator gazificare HTW;
 GUP - gazogen cu umiditate proprie; M - stație de metanare;
 SNG - substituit de gaze naturale;

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	PROCEDEU GAZIFICARE		
			H.T.W.	H.K.V.	Cuptor tubular
1.	Agent de gazificare	--	aer sau O ₂ H ₂ O _v	H ₂	umiditate proprie
2.	Cărbune - granulație	mm	< 6	< 1	< 2
3.	- umiditate	%	8-12	4-7	60
4.	Energie termică	--	autoterm ardere partiala	incalzire H ₂	aloterm
5.	Parametrii proces - presiune	bar	10	100	40
6.	- temperatură	°C	1.100	850	850
7.	Calitate gaz	--	H ₂ /CO= 0,54 fara CH ₄	bogat în H ₂	H ₂ /CO = 2 putin CH ₄
8.	Eficiența procedului - conversie carbon	%	90	60	80
9.	- randament termic	%	61	56-72	68-74

Tabelul 5.3 Elementele comparative ale gazificării H.T.W., hidrogazificării H.K.V. și gazificării cu umiditate proprie.

cărbunilor, generatorul tubular cu umiditate proprie prezintă randamente globale relativ similare, eventual majorate cu circa 2-3 %. Comparativ cu tehnologia Koppers-Totzek, caracterizată prin gradul cel mai ridicat de conversie al carbonului de circa 98-99 %, valoarea redusă a gradului de conversie al carbonului este compensată de eliminarea costului producerii agentului de gazificare, respectiv preparării cărbunelui. Se pare că limita cuptorului tubular constă în adoptarea bioxidului de carbon ca agent de transport, având în vedere ca datorită temperaturilor relativ scăzute acesta nu participă într-o pondere semnificativă la procesele termochimice de gazificare, regăsindu-se nereacționat în gazul brut, diminuând în mod considerabil puterea calorică a acestuia. Eliminarea transportului pneumatic cu bioxid de carbon conduce la diminuarea concentrației acestuia de la 33 % la circa 15 % - rezultat în urma oxidării sau gazificării oxidului de carbon cu abur - ceea ce conduce la majorarea puterii calorice a gazului brut la circa 10.300 kJ/m³N și implicit la reducerea consumului termic solicitat de încălzirea bioxidului de carbon. Pe de altă parte, gradul relativ redus de conversie al carbonului comparativ cu gazificarea în pat antrenat, este specifică patului fluidizat fiind rezultatul retroamestecării combustibilului, determinând ponderea importantă a combustibilului care părăsește nereacționat generatorul, precum și durata scurtă de staționare a semicocsului în zona de gazificare. În concluzie, cu toate avantajele determinate de utilizarea umidității proprii ca agent de gazificare, cuptorul tubular nu implică avantaje decisive față de gazificarea în pat antrenat. De asemenea investiția este cu circa 15-25 % mai mare față de instalația globală Koppers-Totzek, datorită generatorului în pat fluidizat H.T.W., necesar gazificării cocsului nereacționat și a adaosului de cărbune, precum și a focarului industrial în vederea furnizării fluxului termic necesar gazificării. În consecință, în 1979 s-a decis abandonarea cercetărilor referitoare la gazificarea cu umiditate proprie în cuptoare tubulare.

5.2. GAZIFICAREA CU UMIDITATE PROPRIE ÎN TUBURI REVOLUTIVE

Se pare ca ideea gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie este tentantă, ceea ce a condus la reluarea cercetării prin eliminarea deficiențelor generatorului tubular determinate de transportul pneumatic al cărbunelui. S-a ajuns la concluzia că transportul pneumatic nu permite, în condițiile de operare din generator un debit constant al materialului solid, conducând la perioade de stagnare, eventual blocare cu riscuri de explozie. În concluzie, transportul mecanic apare ca varianta cea mai rațională, cercetarea fiind reluată în 1979 de un alt colectiv al politehnicii din Aachen utilizând tuburi revolute cu o înclinare redusă a axei / 5.5 /.

Pe baza testelor de laborator, care au dovedit posibilitatea practică a gazificării cărbunelui brun de Rin cu umiditatea proprie, a fost proiectată și realizată o instalație pilot de dimensiuni cvasiindustriale bazată pe tuburi revolute, încălzite din exterior, prezentată în figura 5.7. Elementul principal este cuptorul tubular executat din oțel

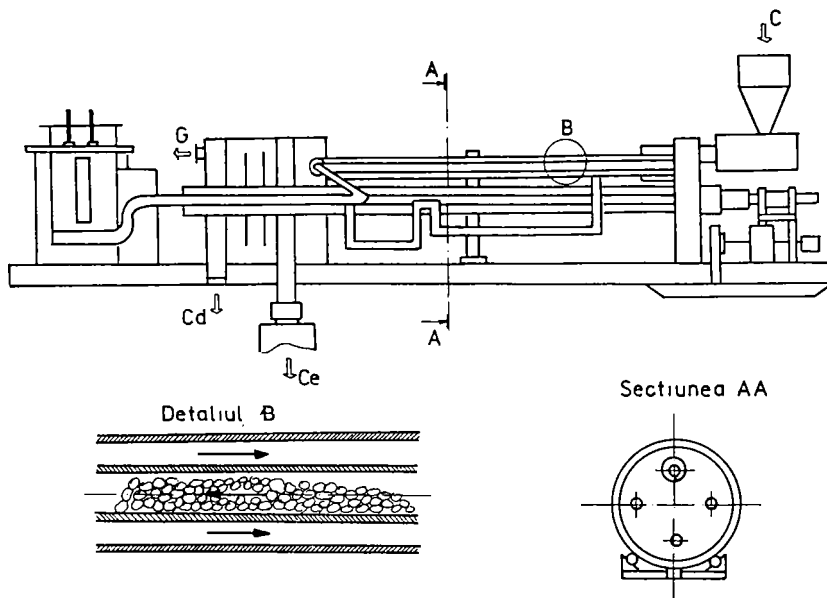


Figura 5.7. Generatorul tubular revolutiv

C - cărbune; Cd - condensabile; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen;

înalt refractar având diametrul interior de 80 mm și lungimea de 11 m, situat pe periferia cercului de revoluție. Cuptorul tubular este introdus într-o țeava exterioară concentrică, izolată în exterior pe întreaga ei lungime, prin spațiul tubular circulând turbulent agentul termogen primar - azot sau heliu. Țeava exterioară se continuă diametral opus față de cuptorul tubular în vederea asigurării recirculării agentului termogen primar. Standul experimental este prevăzut cu 2 țevi paralele în vederea rigidizării construcției. Întregul ansamblu este prevăzut la capete cu compensatoare de dilatare. Sistemul rezemat la capete și în zona mediană execută o mișcare de rotație în jurul axei centrale, fiind antrenat prin intermediul a două angrenaje dințate dispuse la extremitați.

În partea anterioară, tubul revolutiv este fixat în camera de alimentare a cărbunelui, accesul acestuia realizându-se la fiecare rotație a cuptorului rotativ. Transportul cărbunelui în generatorul rotativ se realizează datorită înclinării și mișcării

de rotație a acestuia, similar uscătoarelor rotative tip tambur. În zona posterioară este amplasată camera de colectare a cenușii, evacuate periodic în buncărul de cenușă, permițând totodată recoltarea gazului brut, urmată de desprăfuirea grosieră și răcirea preliminară a acestuia. Buncărul de alimentare a cărbunelui, respectiv cel de evacuare a cenușii și colectare a gazului brut sunt prevăzute cu sisteme cu ecluze duble în vederea izolării generatorului de mediul ambiant, ceea ce permite operarea sub presiune.

Standul experimental este dotat cu sistemul de încălzire al agentului termogen, format dintr-o baterie cu 4 electrozi de grafit având fiecare o putere de 80 kW. Agentul termogen, în urma încălzirii la 800-850 °C, circulă în contracurent față de cărbune prin spațiul inelar al mantalei duble, furnizând fluxul termic necesar gazificării și în consecință răcindu-se până la 400-450 °C. Prin intermediul unui ventilator se asigură recircularea agentului termogen prin țeava dispusă diametral opus spre bateria de încălzire.

Principiul gazificării este similar procedurii în cuptor tubular, cărbunele fiind succesiv preîncălzit, uscat, devolatilizat și gazificat cu aburul rezultat din vaporizarea umidității proprii. Fluxul termic necesar proceselor endoterme de gazificare este furnizat din exterior de agentul termogen care circula în contracurent față de combustibil.

Cercetarea s-a axat pe determinarea, în vederea optimizării procesului, a principalilor parametri care influențează randamentul gazificării cu umiditate proprie, în special: parametrii cărbunelui - calitate, granulație, umiditate, debit specific, profilul termic și presiunea de operare, parametrii agentului termogen primar, transferul termic, precum și elementele transportului mecanic - turația și înclinarea tuburilor. De asemenea, s-au efectuat studii asupra comportării în timp a materialelor termorefractare, ținând cont de eroziunea mecanică și coroziunea chimică acestora.

Testele efectuate inițial la rece au arătat viabilitatea transportului mecanic adoptat, acesta fiind net mai economic față de cazul transportului prin șnec, ceea ce determină creșterea proporțională a productivității generatorului. Experimentările efectuate cu cărbune brun de Rin au permis obținerea unui gaz având compoziția medie: CO^{anh} 30,25 %, H₂^{anh} 56,38 %, CO₂^{anh} 10,87 % și CH₄^{anh} 2,5 %, rezultând eficiența conversiei carbonului de 86,5 %, conform datelor prezentate în tabelul 5.2. De menționat, umiditatea gazului brut de circa 20 %.

Varianta transportului mecanic al cărbunelui prin intermediul tubului revolutiv elimină deficiențele patului fluidizat, determinând pe lângă avantajele specifice gazificării cu umiditate proprie, sporirea puterii calorifice a gazului brut datorită diminuării conținutului de bioxid de carbon și majorarea sensibilă a eficienței conversiei carbonului. Referitor la eficiența conversiei carbonului, ridicarea temperaturii agentului termogen la 950-1.100 °C conduce la transformarea termochimică practic integrală a carbonului, gradul de conversie al carbonului fiind de 99,96 %. Obținerea curentă a acestor performante sunt condiționate de limitele tehnice și economice de utilizare a materialelor înalt refractare, rezistente la temperaturi de peste 1.000 °C.

Literatura de specialitate consultată nu prezintă semnalări mai recente referitoare la posibilitatea gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie.

5.3. GAZIFICAREA SUBTERANĂ A CĂRBUNILOR

Principial noțiunea gazificării cu umiditate proprie poate fi extinsă procedurilor de gazificare subterană a cărbunilor întrucât în "generatorul subteran" aburul necesar gazificării rezultă din vaporizarea umidității proprii, în cazul ligniților, respectiv în cazul hulelor trebuie introdus din exterior un adaos de umiditate / 5.6, 5.7, 5.8, 5.9 /.

Ideea gazificării subterane a fost lansată de W. Siemens în Anglia în 1868 și Mendeleev în Rusia în 1888, fiind brevetată în 1909 de americanul Betts. Primele cercetări au fost efectuate în Rusia pe baza proiectelor inginerului minier Belov (1920), a profesorului Bokii (1925), finalizându-se cu proiectul detaliat al lui Kiricenco (1929-1930), urmate de experimentări în teren începute în 1933. Proiecte mari sovietice s-au întreprins în anii '50, apogeul fiind atins în anii '60, concretizate prin realizarea mai multor exploatări de dimensiuni comerciale - prezentate în tabelul 5.4, după care efortul sovietic s-a diminuat, probabil datorită descoperirii de resurse majore de gaze naturale.

Nr. crt.	DENUMIRE EXPLOATARE	CALITATE CARBUNE	PUTERE CALORIFICĂ GAZ (kJ/m ³ N)	PRODUCTIE 10 ¹² J/zi
1.	PODMOSKOVSNAYA	lignit	2.800-3.600	5,1
2.	LISICHANSKAYA	huila	3.200-4.200	1,6
3.	YUZHNO-ABINSKAYA ^x	huila	4.200	4,3
4.	SHATSKAYA ^x	lignit	2.800-3.500	4,9
5.	ANGRENSKAYA ^x	lignit	3.200-3.400	13,3

Tabelul 5.4 Caracteristicile principalelor exploatări sovietice de gazificare subterană; ^x - în exploatare / 5.10, 5.11 /.

Anglia a efectuat testări de dimensiuni mari în perioada 1949-1959, abandonate din rațiuni politice și economice. Testul britanic cu cel mai mare succes a fost efectuat la Newmann Spinney, reușindu-se gazificarea a circa 85 % din zăcământ.

Statele Unite au efectuat primele experimentări în perioada 1947-1958 la Gorgas și în 1968 în bazinul carbonifer Kentucky, urmate în 1973 de testări la Hanna, Hoe Creek, Princetown, etc. Sub coordonarea administrației de cercetare și dezvoltare energetică (E.R.D.A) s-a trecut la dezvoltarea gazificării subterane având ca obiectiv imediat dezvoltarea unui procedeu comercial, prevăzut a fi finalizat în anii '90, urmat de cercetări în vederea optimizării tehnologiilor avansate de gazificare subterană.

În urma acordului intervenit în 1976, Belgia și Germania dezvoltă în colaborare posibilitatea gazificării subterane la adâncimi mari 800-1.000 m, la presiuni de 50-60 bar, în vederea îmbunătățirii calității gazului și măririi productivității procedeeului.

În esență, gazificarea subterană se desfășoară în "generatorul subteran", constituit din canalul realizat în zăcământ și limitat la extremități de două foraje care servesc, unul pentru insuflarea agentului oxidant - care poate fi aer, aer îmbogățit, mai rar oxigen - și celălalt pentru evacuarea gazului brut. În canalul subteran dintre cele două foraje cărbunele este succesiv preîncălzit, uscat, devolatilizat și gazificat cu vaporii de apă rezultați din vaporizarea umidității proprii - în cazul ligniților - sau introduși din exterior cu agentul oxidant - în cazul huilelor, pe baza aportului termic al arderii unei fracțiuni a cărbunelui în zona învecinată forajului de insuflare. Practic succesiunea proceselor termochimice este similară generatorului în strat, cu deosebirea că în zăcământ are loc deplasarea frontului flăcării.

Indiferent de procedeu utilizat, acesta cuprinde două etape fundamentale: pregătirea filonului de cărbune și gazificarea propriu-zisă.

Prima etapă, pregătirea filonului de cărbune este necesară pentru creșterea permeabilității cărbunelui din zăcământ la nivelul corespunzător gazificării pe scară cvasiindustrială datorită debitelor mari de agent oxidant ce trebuie insuflăte în

zăcământ, respectiv de gaz brut în vederea colectării. Permeabilitatea stratului de cărbune obținută fie prin intermediul unui canal sau a unei zone fisurate create între cele două foraje, poate fi realizată prin una dintre următoarele metode:

- Utilizând tehnologii miniere, practic forarea direcțională a unui canal orizontal de legătură între cele două foraje;
- Utilizarea presiunii ridicate a apei sau a aerului, este posibilă în cazul în care filonul are o permeabilitate naturală datorată fisurilor inițiale.
- Carbonizarea prin încălzire electrică, realizabilă prin introducerea a 2 electrozi în filonul de cărbune, datorită încălzirii și cocsificării cărbunelui adiacent la trecerea curentului electric.
- Arderea inversată permite lărgirea unui canal existent cu secțiune redusă care nu asigură o permeabilitate suficientă, prin arderea cărbunelui adiacent canalului, frontul flăcării deplasându-se în sens opus aerului necesar combustiei.
- Fisurarea prin intermediul explozibililor. Producerea în subteran a unei explozii permite realizarea de fisuri dispersate în întregul zăcământ ceea ce determină obținerea gradului de permeabilitate dorit.

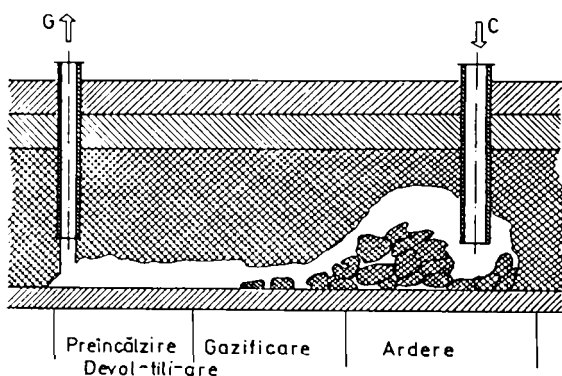


Figura 5.8 Principiul gazificării subterane
A - aer, G - gaz de "generator"

Gazificarea subterană inversată, prezentată principal în figura 5.8, se desfășoară în canalul anterior creat între cele două foraje, care constituie practic zona de reacție. Agentul oxidant determină arderea masei cărbunoase adiacente canalului rezultând temperaturi de peste 900°C și totodată fluxul termic necesar vaporizării umidității proprii a cărbunelui și reacțiilor endoterme de gazificare.

Semicocsul este gazificat la temperaturi de $550-900^{\circ}\text{C}$ pe baza reacției heterogene de gazificare cu abur. Gazul brut, la temperaturi ridicate, cedează parte din căldura sa sensibilă determinând succesiv degajarea volatilelor, uscarea și preîncălzirea cărbunelui, fiind recoltat prin intermediul celui de-al doilea foraj. Cavitatarea creată de arderea masei cărbunoase determină căderea bulgărilor de cărbune în zona de ardere, ceea ce conduce la lărgirea treptată a frontului gazificării, care în final cuprinde întreaga grosime a stratului. În urma arderii practice integrale a cărbunelui din zona inițială de combustie, frontul flăcării și implicit gazificarea se deplasează cu viteze zilnice de $0,3-0,6\text{ m}$ spre forajul de evacuare al gazului brut, prin arderea carbonului nereacționat din zona de gazificare.

Funcție de compoziția cărbunelui, în urma gazificării subterane cu aer rezultă gaze combustibile sărace având puterea calorifică inferioară de circa $3.000-4.000\text{ kJ/m}^3\text{N}$, conținând circa $30-40\%$ componente combustibile ca CO , H_2 și CH_4 , însoțite de $10-15\%$ CO_2 și $45-55\%$ N_2 . Utilizarea oxigenului determină, prin eliminarea azotului din gazul brut majorarea puterii calorifice inferioare la circa $6.000-8.000\text{ kJ/m}^3\text{N}$, reflectată de compoziția gazului: H_2^{anh} $40-46\%$, CO^{anh} $16-20\%$, CH_4^{anh} $5-7\%$ și CO_2^{anh} $28-32\%$.

CAPITOLUL 6

EXPERIMENTĂRI PROPRII PRIVIND GAZIFICAREA CU UMIDITATEA PROPRIE A LIGNIȚILOR AUTOHTONI

Caracteristicile energetice reduse ale ligniților autohtoni, determinate de conținutul ridicat de balast, practic de conținutul ridicat de umiditate și cenușă - în cazul ligniților de Rovinari W¹ 35-45 %, A¹ 20-40 %, respectiv în cazul ligniților din bazinul Sfintu Gheorghe W¹ 50-60 %, A¹ 15-25 % - nu permit utilizarea în condiții de eficiență economică a procedeelor clasice de gazificare.

Gazificarea în strat, în condiții optimale de funcționare a gazogenului permite prelucrarea cărbunilor cu un conținut de umiditate de 4-15 %, cu limita maximă de 30 %, respectiv de masă minerală necombustibilă raportată la proba anhidră de maxim 30 %. În cazul gazificării în pat fluidizat sunt favorabili cărbunii cu umiditatea de 8-12 %, respectiv patul antrenat necesită uscarea prealabilă a cărbunilor pînă la un conținut de umiditate de maxim 10-12 %. Analiza principalelor tehnologii de gazificare în pat fluidizat sau antrenat indică un conținut maxim de 12-15 % a masei minerale necombustibile. Conținutul ridicat de balast afectează în mod sensibil bilanțul masic și energetic al gazificării, având în consecință o importanță majoră în randamentul global al procesului. De asemenea, ponderea ridicată a balastului influențează în mod defavorabil caracteristicile tehnologice ale cărbunilor, în principal în cazul gazificării în pat fluidizat sau antrenat datorită necesității măcinării acestora la granulații sub 6 mm, respectiv sub 0,1 mm.

Masa minerală necombustibilă, datorită temperaturii de înmuiere determină tendințele aglomerare a cenușii, cu efecte defavorabile în cazul procedeelor de gazificare cu evacuarea cenușii în stare solidă. Tendințele de aglomerare a cenușii determină majorarea ponderii carbonului nereacționat evacuat în cenușa cât și necesitatea majorării consumului de abur din agentul de gazificare, în vederea diminuării temperaturii cenușii sub limita de înmuiere. De asemenea, tendința de aglomerare are efecte defavorabile asupra gazodinamicii stratului de cărbune, influențând direct cinetica proceselor fizico-chimice complexe specifice gazificării cărbunilor.

Pe lângă diminuarea randamentului global al gazificării, conținutul ridicat de balast afectează uniformitatea desfășurării proceselor termochimice datorită modificării permeabilității stratului fix sau fluidizat, conducând la instabilitatea, eventual întreruperea operării. Semnificativ este cazul șisturilor bituminoase care datorită conținutului ridicat de masă minerală necombustibilă de circa 65-70 %, precum și datorită reactivității reduse nu pot fi gazificate prin procedeele clasice autoterm.

În consecință, ținând cont de caracteristicile energetice reduse ale ligniților autohtoni apare ca rațională analiza posibilităților gazificării acestora cu umiditatea proprie. Cărbunii tineri datorită reactivității chimice ridicate permit gazificarea la nivele termice relativ reduse, în cazul ligniților autohtoni la temperaturi în intervalul 500-700 °C, prin aceasta evitându-se riscurile determinate de tendințele de aglomerare și permite evitarea utilizării oțelurilor înalt refractare la construcția generatoarelor.

6.1. ELEMENTE DE CALCUL ALE GAZIFICĂRII CU UMIDITATEA PROPRIE

Dezideratul proiectantului unui generator de gazificare a cărbunilor este de a prevedea și asigura condițiile în care reacțiile se desfășoară cât mai aproape de echilibru, deplasat spre producții finali dorite. Prima etapă constă în studiul termodinamic al procesului care are menirea de a indica gradul maxim de conversie realizabil, conducând la alegerea condițiilor optime de operare. În consecință, abordarea procesului termochimic complex începe cu calculul compoziției de echilibru a sistemului pe baza bilanțului masic și energetic și pe determinarea setului de echilibre necesar și suficient pentru descrierea termodinamică a sistemului reactant. Calculul implică determinarea constantelor de echilibru ale reacțiilor adoptate ținând cont de dependența lor față de temperatură și presiune, calculabile din entalpiile și entropiile de reacție.

Studiul cinetic al reacțiilor gazificării constă în determinarea vitezelor de reacție - de consum a masei cărbunoase și de producere a gazelor combustibile - funcție de compoziția cărbunelui și parametrii funcționali descriși prin temperatura și presiunile parțiale ale gazelor participante. Aceste date sunt necesare întrucât generatoarele industriale, în general nu permit atingerea condițiilor solicitate de echilibrul reacțiilor, reactanții părăsind zona de reacție înaintea atingerii echilibrului. De asemenea, analiza complexă a procesului termochimic oferă setul datelor necesare exploatarea în condiții optime a gazogenului industrial / 6.1, 6.2 /.

Pe baza datelor desprinse din studiul termodinamic și cinetic al procesului complex de gazificare a cărbunilor se poate trece la proiectarea constructivă a generatorului în funcție de fluxul tehnologic adoptat și cerințele tehnico-economice impuse.

În vederea confirmării posibilității gazificării cu umiditatea proprie a ligniților autohtoni este necesară realizarea standului experimental care impune analiza termodinamică a procesului. Principal, orice stand experimental de dimensiuni reduse datorită caracterului cvasi-staționar al proceselor precum și posibilității facile de variație a fluxului de materiale și de energie, permite obținerea condițiilor de echilibru ale reacțiilor termochimice. De menționat că, o conversie mai mare decât în condiții de echilibru nu poate fi atinsă prin îmbunătățirea cineticii reacției sau a transferului de masă și căldură.

Studiul termodinamic al gazificării cu umiditatea proprie a ligniților autohtoni își propune determinarea - pe baza analizei elementare a masei organice a cărbunilor, a presupusei compoziții a gazului brut, precum și evaluarea elementelor bilanțului termic în funcție de parametrii de operare - temperatură și presiune. Studiul termodinamic se bazează pe analiza stării inițiale în vederea determinării stării finale - gazul brut - neglijând fazele intermediare. Starea inițială este determinată de analiza elementară și debitul cărbunelui precum și al eventualului exces de umiditate, permițând determinarea stării finale, descrisă prin compoziția și debitul gazului brut. Constituenții gazului brut - CO, H₂, CH₄, CO₂, N₂, H₂S și H₂O_v - au fost determinați pe baza bilanțului masic al fiecărui element chimic - C, H, O, N, S și W - din relațiile participațiilor volumice și setul constantelor de echilibru chimic. Reacțiile chimice adoptate în vederea descrierii echilibrului chimic sunt: reacția de reducere a bioxidului de carbon în prezența carbonului incandescent (R 2.3), reacția Boudouard (R 2.4) și reacția de hidrogenare (R 2.5). Constantele de echilibru ale reacțiilor chimice adoptate au fost determinate funcție de temperatură, pe baza entalpiilor și entropiilor de reacție ale elementelor chimice pure. De remarcat că, la determinarea constantelor de echilibru datele termodinamice, preluate din tabele sunt pentru substanțe pure, diferite față de cazul real al cărbunelui introdus în reactor și a

semicocsurilor acestuia la diferite temperaturi. Literatura de specialitate nu consemnează decât sporadic evaluări ale acestor mărimi pentru cărbuni. Entalpia de formare poate fi determinată în cazul real pe baza analizei elementare și a puterii calorifice, calul supus erorii datorită dificultăților de a separa fizic sau analitic masa cărbunoasă de cea minerală, ceea ce poate conduce la erori de 5-15 %. Referitor la evaluarea entropiei și a căldurii specifice a cărbunilor și semicocsurilor acestora există foarte puține date experimentale, determinarea lor nefacând parte din măsurătorile analitice curente. Rezolvarea sistemului neliniar de 9 ecuații permite determinarea funcției de temperatură a compoziției și debitului specific al gazului brut precum și debitul specific al excesului de umiditate necesar gazificării.

Fiind un procedeu alloterm bazat pe furnizarea din exterior a fluxului termic necesar proceselor endoterme, realizarea standului experimental implică determinarea aportului energetic solicitat de gazificarea cu umiditate proprie. În consecință, pe baza cunoașterii stării inițiale și finale s-a determinat bilanțul termic pe baza căldurii chimice și sensibile a materialelor - cărbune, exces de umiditate, respectiv gazul brut produs - evidențiindu-se necesarul de căldură din exterior.

Analiza bilanțului energetic permite determinarea randamentului termic, în condițiile ideale, întrucât nu s-a ținut cont de pierderile specifice gazificării, neglijându-se: fracțiunea nereacționată a semicocsului evacuat în cenușă sau antrenat de gazul brut, cantitatea de subproduse secundare, schimbul termic global cu mediul ambiant și eficiența transferului termic a energiei furnizate din exterior. Pe baza estimării globale a eficienței gazificării cărbunelui cu umiditatea proprie, s-a determinat consumul de combustibil gazos produs în vederea furnizării fluxului termic în condițiile unui randament de producere și transfer termic de 80 % / 6.3, 6.4, 6.5 /.

Studiul termodinamic al gazificării cu umiditatea proprie a fost realizat pentru lignitul de Voivozi în condiții similare generatorului tubular, respectiv revolutiv. Principalele elemente ale calculului analitic care permit prefigurarea parametrilor gazului brut și a avantajelor caracteristice utilizării umidității proprii ca agent de gazificare sunt prezentate în tabelul 6.1 parametrii mărimilor intrate, respectiv în tabelul 6.2 parametrii mărimilor ieșite.

Calculul efectuat în domeniul de temperaturi între 500-700 °C indică, în cazul lignitului de Voivozi, obținerea unui gaz combustibil de calitate, având compoziția estimativă: CO^{anh} 4,7-32,58 %, H_2^{anh} 39,28-53,81 %, CH_4^{anh} 3,5-21,99 %, CO_2^{anh} 8,97-32,52 % și urme de N_2 și H_2S , respectiv având puteri calorifice inferioare de 11.327-12.890 kJ/m³N, în condițiile unui randament global ideal de 85,31-87,18 %. De menționat că, stabilirea echilibrului chimic solicită majorarea umidității inițiale a combustibilului, parte din ea regăsindu-se nereacționată în gazul brut. Având în vedere că, datorită lipsei și din literatura de specialitate a parametrilor termochimici ai cărbunelui și semicocsurilor sale, s-au adoptat valorile elementelor chimice pure, rezultatul studiului putând prezenta abateri față de funcționarea reală a generatorului, cu atât mai mari cu cât cărbunele conține mai mult hidrogen și oxigen /6.6, 6,8 /.

Proiectarea constructivă a generatorului cu umiditate proprie trebuie să soluționeze problema obținerii și furnizării fluxului termic necesar gazificării alloterme având, în cazul analizat valori de 11.504,1-18.849,7 kJ/h (3,2-5,24 kW). La realizarea standului experimental, acoperitor s-au adoptat valori majorate în vederea compensării pierderilor către mediul ambiant cât și pentru posibilitatea modificării parametrilor funcționali în limite cât mai largi /6.7, 6.9/.

6.2. GENERATORUL DE GAZIFICARE TIP CUPTOR TUBULAR

Pe baza datelor oferite de studiul termodinamic al gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, în vederea atestării posibilităților aplicării acestui procedeu ligniților

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	VALORI		
			500 °C	600 °C	700 °C
PARAMETRII OPERARE					
1	Temperatură	°C	500 °C	600 °C	700 °C
2	Presiune	bar	1		
PARAMETRII MĂRIMILOR INTRATE					
3 Cărbune			VOIVOZI		
4	- debit	kg/h	5		
5	- compoziție C'	%	21,55		
6	H'	%	1,4		
7	O'	%	4,24		
8	N'	%	0,73		
9	S'	%	1,05		
10	A'	%	45,11		
11	W'	%	25,92		
12	-putere calorifică inferioară	kJ/kg	7.728		
13	-putere calorifică superioară	kJ/kg	8.695		
14	- căldura chimică	kJ/h	43.473		
15	-caldura sensibilă	kJ/h	125		
16	Exces umiditate - debit specific	kg/kg căr	0,37	0,28	1,12
17	- debit	kg/h	1,85	1,4	0,6
18	- total specific	kg/kg căr	0,63	0,54	0,38
19	-caldura sensibilă	kJ/h	156,7	117,7	53,03
20	Flux termic exterior	kJ/h	11.504,1	16.109,8	18.849,7
21	- specific	kJ/kg car	2.300,8	3.222	3.770
22	- consum gaz rece	m ³ N/h	1,74	2,29	2,28
23	- consum gaz cald	m ³ N/h	1,55	2,04	2,06
24	Flux termic total intrat	kJ/h	55.260,8	59.827,5	62.501,8

Tabelul 6.1 Rezultatele calculului analitic al parametrilor funcționali și de compoziție ai gazificării cu umiditate proprie - parametrii mărimilor intrate

autohtoni a fost proiectat și realizat un stand experimental de laborator similar variantei cuptorului tubular /6.9, 6.11, 6.12/.

Standul prezentat în figura 6.1, este caracterizat prin transportul mecanic al cărbunelui prin intermediul unui șneac acționat manual, fluxul termic necesar gazificării fiind furnizat de mai multe rezistențe electrice.

Elementul principal al standului experimental, cuptorul tubular este realizat din teavă aliată pentru cazane și cuptoare industriale - 16 Mo 3 - având diametrul $T_v \Phi 108 \times 4$ și lungimea utilă de 2.000 mm. Încălzirea se obține pe baza a 3 rezistențe electrice având fiecare o putere de cite 2 kW, legate fiecare în serie cu un autotransformator care permite obținerea valorii adecvate a fluxului termic și a profilului longitudinal al temperaturii, funcție de procesele termochimice specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie. Rezistența electrică exterioară dispusă elicoidal prin intermediul unor inele ceramice este izolată în exterior cu un strat de azbest și vată minerală, protejate în exterior printr-un înveliș de tabla. Cuptorul

Nr. crt.	PARAMETRII	U.M.	VALORI		
PARAMETRII OPERARE					
1.	Temperatură	⁰ C	500 ⁰ C	600 ⁰ C	700 ⁰ C
2.	Presiune	bar	1		
PARAMETRII MĂRIMILOR IEȘITE					
3.	Gaz umed - debit specific	m ³ N/kg car	1,05	1,07	0,98
4.	- debit	m ³ N/h	5,265	5,365	4,89
5.	- compoziție CO ¹	%	3,03	12,76	19,73
6.	H ₂ ¹	%	25,33	40,39	49,10
7.	CH ₄ ¹	%	14,18	7,59	3,19
8.	CO ₂ ¹	%	20,97	17,13	8,18
9.	N ₂ ¹	%	0,55	0,54	0,60
10.	H ₂ S ¹	%	0,42	0,41	0,45
11.	H ₂ O ¹	%	35,52	21,18	8,75
12.	-putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	8.312	8.806	10.336
13.	- căldura chimică	kJ/h	49.404,6	53.179,4	55.939,3
14.	-caldura sensibilă	kJ/h	5.010,6	5.633,4	5.378,9
15.	Gaz uscat - debit specific	m ³ N/kg car	0,612	0,846	0,893
16.	- compoziție CO ₂ ^{anh}	%	4,7	16,17	32,58
17.	H ₂ ^{anh}	%	39,28	51,24	53,81
18.	CH ₄ ^{anh}	%	21,99	0,63	3,50
19.	CO ₂ ^{anh}	%	32,52	21,74	8,97
20.	N ₂ ^{anh}	%	0,86	0,69	0,65
21.	H ₂ S ^{anh}	%	0,65	0,52	0,49
22.	-putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	12.890	11.173	11.327
23.	Cenușă -caldura sensibilă	kJ/kg	845,6	1.014,7	1.183,6
24.	Flux termic total iesit	kJ/h	55.260,8	59.827,5	62.501,8
25.	Randament termic	%	87,18	85,26	85,31

Tabelul 6.2 Rezultatele calculului analitic al parametrilor funcționali și de compoziție ai gazificării cu umiditate proprie - parametrii mărimilor ieșite

tubular este prevăzut în interior pe toata lungimea sa cu un șnec transportor, care permite alimentarea și deplasarea cărbunelui, precum și evacuarea cenușii. La partea anterioară, cuptorul tubular este prevăzut cu buncărul de alimentare, accesul cărbunelui fiind realizat prin intermediul șnecului transportor. Partea posterioară este prevăzută cu racordul de evacuare a cenușii într-un buncăr colector.

Gazul brut colectat la partea posterioară a generatorului este răcit într-un schimbător de căldura care permite colectarea condensului și a subprodusilor secundari - gudroane, uleiuri, fenoli - rezultați în urma gazificării. Gazul combustibil răcit este contorizat și ars, iar prin intermediul unei ramificații este recoltat în vederea analizei chimice cromatografice și a determinării puterii calorifice.

Standul experimental este echipat cu aparatura de măsură necesară determinării parametrilor funcționali și ai elementelor bilanțului masic și energetic ai

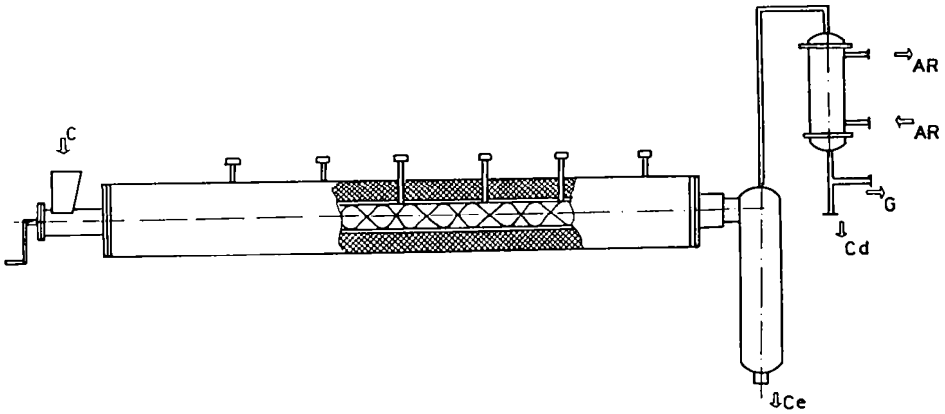


Figura 6.1. Generatorul cu umiditate proprie tip cuptor tubular cu încălzire electrică
AR - apă de răcire; C - cărbune; Cd - condensabile; Ce - cenușă; G - gaz de gazogen

gazificării. Determinarea parametrilor și a etapelor procesului complex de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este realizabilă prin trasarea profilului longitudinal al temperaturii, prin intermediul a 6 termocuple dispuse pe lungimea cuptorului tubular și prin posibilitatea recoltării în cele 6 puncte a produselor gazoase intermediare.

Încălzirea electrică a cărbunelui, în vederea furnizării fluxului termic necesar gazificării cu umiditatea proprie, pe lângă caracterul ei neeconomic a creat mari dificultăți în timpul experimentărilor datorită fiabilității reduse a rezistențelor electrice. Condițiile termice dificile au determinat arderea frecventă a rezistențelor. În consecință, a fost proiectat și realizat un cuptor tubular relativ similar, a cărui sistem de încălzire constă din mai multe arzătoare Bunsen dispuse diferențiat pe lungimea generatoarei, în vederea obținerii profilului termic dorit.

Varianta cuptorului tubular încălzit pe baza arderii gazului metan, prezentată în figura 6.2, este similară constructiv și dimensional soluției anterioare. Cuptorul tubular

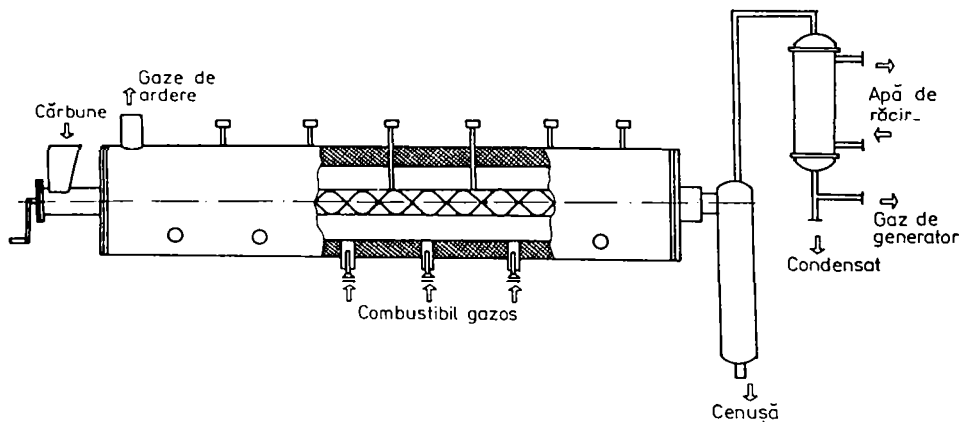


Figura 5.5. Generatorul cu umiditate proprie tip cuptor tubular cu încălzire cu combustibil gazos

este introdus într-o manta cilindrică având diametrul exterior de 294 mm, prevăzută cu racordurile de fixare ale arzătoarelor Bunsen și racordul de colectare al gazelor arse. În spațiul inelar are loc arderea gazului metan prin intermediul a 12 arzătoare Bunsen, dispuse diferențiat: la partea anterioară în 2 secțiuni cite 2 arzătoare, în zona mediană în 2 secțiuni cite 3 arzătoare, respectiv în zona finală 2 arzătoare, fiecare arzător fiind prevăzut cu un vizor de flacără / 6.9, 6.11, 6.12/.

Testele experimentale efectuate pe ambele cuptoare tubulare au dovedit posibilitatea gazificării cu umiditatea proprie a ligniților autohtoni, rezultând gaze combustibile de calitate având puteri calorifice inferioare de 9.800-10.500 kJ/m³N.

6.3. GENERATORUL DE GAZIFICARE TIP CUPTOR ÎNALT

Cu toate avantajele transportului mecanic al cărbunelui prin intermediul unui șnecl elicoidal în cazul unor instalații de laborator, soluția nu este viabilă în cazul instalațiilor de dimensiuni industriale datorită complicațiilor deosebite legate de execuția și exploatarea instalației cât și datorită caracterului neeconomic al investiției și al consumului energetic. Cercetările efectuate în cadrul Politehnicii din Aachen referitoare la gazificarea cărbunilor cu umiditate proprie în pat fluidizat sau prin transport pneumatic au arătat limitele procedurii adoptate, datorită dificultăților în realizarea unui debit constant al cărbunelui, afectând totodată calitatea gazului brut datorită regăsirii în acesta a agentului de fluidizare sau de transport. Analiza bibliografiei de specialitate indică reluarea cercetărilor prin adoptarea transportului mecanic prin intermediul unui tub revolutiv cu axa înclinată, testările confirmând viabilitatea soluției adoptate. Principalul dezavantaj al generatorului tubular revolutiv constau în consumul energetic ridicat necesar antrenării mecanice a instalației de gazificare, afectând defavorabil eficiența globală a generatorului.

În vederea analizei posibilităților soluționării transportului cărbunelui în gazogen pe cale mecanică s-au luat în considerare variantele generatoarelor de gaz cu grătar de tipul invers, actualmente rar utilizate. Generatoarele în strat de tipul invers sunt relativ similare generatoarelor în strat, deosebirea constând în circulația în echicurent a cărbunelui și agentului de gazificare, respectiv gazul brut și implicit în amplasarea racordurilor de acces respectiv colectare ale acestora. Cărbunele este introdus împreună cu agentul de gazificare prin partea superioară a generatorului fiind succesiv: preîncălzit, uscat și devolatilizat, pe baza arderii unei fracțiuni a semicocsului în zona mediană a generatorului pînă la consumarea completă a oxidantului. În zona imediat inferioară are loc gazificarea cocsului nears cu vaporii de apă introduși ca agent de gazificare și bioxidul de carbon rezultat în urma arderii. La baza generatorului este amplasat un grătar care permite susținerea stratului de combustibil și evacuarea cenușii, precum și cu racordul de colectare al gazului brut. Caracteristic generatoarelor de tipul invers este absența subprodusilor secundari datorită faptului că aceștia sunt cracați și transformați în hidrocarburi necondensabile la trecerea prin zona de combustie.

Circulația pe verticală a reactanților în echicurent, caracteristică generatoarelor de tipul invers, este aplicabilă în cazul gazificării cu umiditate proprie prin eliminarea zonei de combustie și implicit prin necesitatea furnizării din exterior a suportului termic al proceselor termochimice endoterme. În consecință, a fost proiectat și realizat practic un stand de laborator bazat pe soluția constructivă a generatoarelor inverse cu modificările specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, prezentat principal în figura 6.3 / 6.11, 6.12, 6.13, 6.14 /.

Standul experimental este format dintr-un recipient cilindric vertical cu manta dublă, manataua exterioară fiind realizată din țevă Tv ϕ 219 x 9, respectiv cea

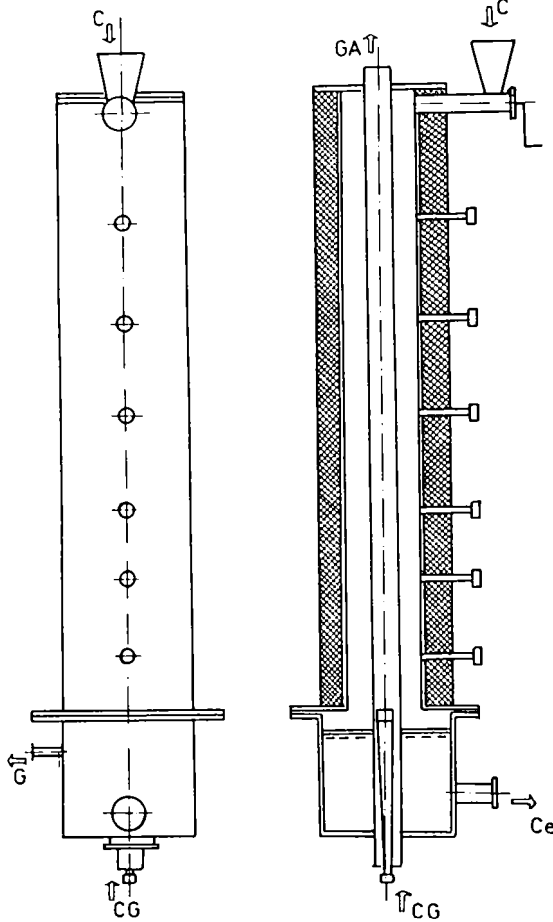


Figura 5.3. Generator cu umiditate proprie tip cuptor înalt
 C - cărbune; Ce - combustibil gazos - gaze naturale
 G - gaz de gazogen; GA - gaze de ardere;

interioară din țevă din oțel aliat 16 Mo 3 cu dimensiunile $Tv \phi 108 \times 5$ și având lungimea de 2.000 mm. Tubul interior reprezintă focarul cuptorului înalt prin dispunerea la bază a unui arzător TD 3, gazele de ardere scaldând suprafața interioară a acestuia și fiind evacuate la coșul de fum, amplasat în partea superioară. Spațiul tubular cuprins între cele două mantale cilindrice reprezintă camera de reacție în care cărbunul este introdus prin partea superioară deplasându-se descendent. Circulația descendentă a cărbunului se desfășoară gravitațional ceea ce conduce la un consum minim de energie mecanică. Pe generatoarea mantalei exterioare sunt dispuse racorduri care permit, pe de-o parte colectarea produselor gazoase, corespunzătoare diferitelor etape ale procesului complex de gazificare, cât și măsurarea temperaturii prin intermediul termocuplelor, necesară trasării profilului variație temperaturii.

Partea superioară a generatorului este prevăzută cu sistemul de alimentare a cărbunului dintr-un buncăr de serviciu prin intermediul unui șnecl elcoidal acționat manual și cu racordul tubului de flacăra la coșul de fum. La bază, prin intermediul unei flanșe plane este amplasată camera de colectare a gazului brut și de evacuare a cenușii. Separarea camerei de colectare față de zona de reacție s-a realizat prin intermediul grătarului circular realizat din două flanșe prevăzute cu fante de evacuare a cenușii, care permit rotirea manuală a celei inferioare față de cea superioară. Prin rotirea relativă a celor două flanșe ale grătarului este posibilă modificarea dimensiunii fantei de evacuare a cenușii, funcție de granulația acesteia, evitându-se pe cât posibil blocarea cărbunului datorită aglomerării sale. Camera de colectare a cenușii este prevăzută cu o gura de vizitare care permite evacuarea intermitentă, manuală a cenușii și de asemenea cu racordul lateral de prelevare a gazului brut. După

colectare, gazul brut urmează a fi răcit într-un schimbător de căldura în vederea recoltării subprodusilor condensabili.

Cărbunele, introdus prin partea superioară a generatorului în mișcarea sa descendentă este succesiv preîncălzit, uscat - în vederea furnizării agentului de gazificare, vaporii rezultați din umiditatea proprie și cea în exces, și devolatilizat. Semicocsul rezultat în urma pirolizei este gazificat începând din zona mediană a generatorului pe baza reacției heterogene dintre carbon și vaporii de apă. Procesele endoterme specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie se desfășoară pe baza aportului termic al gazelor de ardere care circulă ascendent, în contracurent, scaldând suprafața interioară a țevii de fum.

În vederea testărilor experimentale standul este echipat cu aparatura de măsură necesară determinării parametrilor funcționali și ai elementelor bilanțului masic și energetic ai gazificării. Determinarea parametrilor și a etapelor procesului complex de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este realizabilă prin trasarea profilului longitudinal al temperaturii, prin intermediul a 6 termocuple dispuse pe lungimea cuptorului tubular și prin posibilitatea recoltării în cele 6 puncte a produselor gazoase intermediare.

6.4. APARATURA DE MĂSURĂ A STANDULUI DE LABORATOR

Analiza experimentală a gazificării cărbunilor autohtoni cu umiditatea proprie impune ca standurile de laborator, anterior prezentate, să fie prevăzute cu aparatura de măsură disponibilă, necesară determinării elementelor bilanțului material și energetic al gazificării. Importanța efectuării bilanțului material și energetic al rezultatelor experimentale constă în faptul că analiza bilanțului permite identificarea posibilelor măsuri de mărire a eficienței gazificării și oferă suportul datelor necesare proiectării unui stand de dimensiuni mărite care să permită pilotarea și operarea în condiții apropiate de instalațiile de dimensiuni industriale.

Determinarea parametrilor mărimilor intrate:

a - cărbune:

- analiza elementară a fost furnizată de datele cercetării efectuate de SIETA fostul I.C.S.I.T.E.E. Cluj-Napoca;
- puterea calorifică - a fost determinată atât experimental prin intermediul calorimetrului Junkers, cât și analitic;
- cantitatea de cărbune gazificat - a fost determinată prin cântărire;

b - excesul de umiditate:

- cantitatea de umiditate introdusă în exces - a fost determinată prin cântărire;

c - energia termică furnizată din exterior:

- cantitatea de gaze naturale arse - a fost determinată cu un contor de gaze;
- suprapresiunea gazelor naturale - a fost determinată cu un manometru pentru gaze;
- gaze de ardere evacuate la coșul de fum - temperatura acestora a fost determinată prin intermediul unui termocuplu introdus în racordul de ieșire din generatorul experimental.

Determinarea parametrilor mărimilor ieșite:

a - gaz de gazogen:

- compoziția gazului de gazogen anhidru - s-a determinat prin prelevarea probelor de gaz de gazogen și măsurători cromatografice;
- cantitatea gazului de gazogen - a fost măsurată cu un contor de gaze;
- suprapresiunea gazului - a fost determinată prin intermediul unui manometru diferențial dispus după contor;
- temperatura gazului - a fost determinată prin intermediul unui termocuplu amplasat pe racordul de ieșire al gazelor din generatorul experimental;

b - condensabile:

- cantitatea de condensabile - a fost determinată prin cântărirea condensabilelor recoltate;
- cantitatea de gudroane - a fost determinată prin măsurare cu mensura după decantarea față de restul condensabilelor;

c - cenușa:

- cantitatea de cenușa - a fost determinată prin cântărirea cenușii după evacuarea din buncărul de cenușa;
- conținutul carbonului din cenușă - a fost estimată în urma determinării puterii calorifice a cenușii;

d - izolația termică:

- temperatura - a fost măsurată prin intermediul unui termometru de contact rezistiv

6.5. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE

Determinările experimentale efectuate cu lignit de Voivozi în cuptorul tubular cu șnec transportor încălzit electric, respectiv prin arderea gazului metan, au scos în evidență posibilitatea gazificării cu umiditatea proprie a ligniților autohtoni rezultând gaz combustibil de calitate. Determinările experimentale au confirmat posibilitatea producerii unui gaz combustibil de calitate având în general următoarea compoziție: CO^{anh} 13 - 15 %, H_2^{anh} 38-43 %, CH_4^{anh} 10 -12 %, CO_2^{anh} 15 -17 %, O_2^{anh} 4-6 % și N_2^{anh} 11-13 % și puteri calorifice inferioare de 9.500 - 10.500 kJ/m³N (2.340 - 2.508 kcal/m³N). De menționat că, teoretic gazul brut este lipsit de oxigen, datorită lipsei acestuia din agentul de gazificare și caracterul oxidant al acestuia, ceea ce îi conferă o reactivitate ridicată. Pare probabil, că prezența oxigenului și implicit a azotului este rezultatul neetanșeităților la prelevarea probelor de gaz brut atât la generator cât și la cromatograf. În consecință, în condițiile neglijării conținutului de oxigen și de azot al gazului brut, puterea calorifică inferioară a acestuia devine 10.700 - 11.800 kJ/m³N (2.560 - 2.820 kcal/m³N). Parte dintre valorile obținute experimental ale compoziției gazului brut anhidru rezultat pe baza gazificării cu umiditatea proprie a lignitului de Voivozi, împreună cu puterea calorifică calculată pentru compoziția determinată experimental și pentru cea corijată prin neglijarea conținutului de oxigen și azot al gazul brut sunt prezentate în tabelul 6.3 / 6.7, 6.10, 6.11, 6.13 /.

Nr. crt.	VALORI EXPERIMENTALE										VALORI EXPERIMENTALE CORIJATE					
	COMPOZIȚIE GAZ ANHIDRU					Putere calorifică inferioară					COMPOZIȚIE GAZ ANHIDRU			Putere calorifică inferioară		
	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	O ₂	N ₂	%	kJ/m ³ N	CO	CO ₂	CH ₄	H ₂	%	kJ/m ³ N		
1.	13,0	24,4	22,6	17,6	6,2	16,1	11.637	16,7	31,4	29,1	22,8	22,8	14.977			
2.	16,1	21,4	13,6	32,6	3,7	12,6	10.415	19,2	25,6	16,3	38,9	38,9	12.443			
3.	19,2	18,4	13,6	41,2	1,8	5,8	11.720	20,8	19,9	14,7	44,6	44,6	12.684			
4.	23,6	7,9	6,7	50,3	3,3	8,2	10.840	26,7	8,9	7,6	56,8	56,8	12.249			
5.	34,1	9,8	7,4	31,3	5,1	12,3	10.375	41,3	11,9	8,9	37,9	37,9	12.561			
6.	28,1	16,3	9,2	38,5	2,6	5,3	11.036	30,6	17,7	9,9	41,8	41,8	11.983			
7.	24,2	17,8	8,6	42,5	2,4	4,5	10.757	25,9	19,1	9,3	45,7	45,7	11.554			
8.	27,6	14,2	8,7	42,3	2,3	4,9	11.203	29,7	15,3	9,4	45,6	45,6	12.073			
9.	18,1	18,4	10,6	38,2	3,2	11,5	10.234	21,2	21,2	12,4	44,8	44,8	11.998			
10.	14,0	16,8	10,1	40,1	5,2	13,8	9.678	17,3	20,7	12,5	49,5	49,5	11.948			
11.	11,8	9,5	7,5	41,1	7,4	22,6	9.167	16,9	13,6	10,8	58,7	58,7	13.096			
12.	10,0	18,6	14,6	43,4	3,8	9,6	11.202	11,5	21,5	16,8	50,2	50,2	12.935			
13.	13,7	17,3	10,3	41,0	6,2	11,5	9.815	16,6	21,1	12,5	49,8	49,8	11.926			
14.	12,3	16,2	11,3	41,2	6,5	12,5	10.002	15,2	20,1	13,9	50,8	50,8	12.348			
15.	11,7	17,8	11,6	40,2	5,2	13,5	9.986	14,4	21,9	14,3	49,4	49,4	12.283			
16.	15,3	17,2	10,8	38,3	6,3	12,1	9.961	18,7	21,2	13,2	46,9	46,9	12.207			
17.	12,3	18,2	11,8	37,4	5,8	14,5	9.841	15,5	22,8	14,8	46,9	46,9	12.348			
18.	14,8	16,8	11,2	38,5	6,4	12,3	10.062	18,2	20,7	13,8	47,3	47,3	12.377			
19.	9,8	17,0	12,3	42,2	5,1	13,6	10.158	12,1	20,8	15,2	51,9	51,9	12.494			
20.	16,3	14,3	10,2	40,1	6,3	12,8	10.067	20,1	17,7	12,6	49,6	49,6	12.444			
VALORI MEDII EXPERIMENTALE																
21.	14,32	16,24	11,86	39,98	5,09	12,49	10.033	17,37	19,73	14,39	48,51	48,51	12.137			

Tabelul 6.3. Gazificarea lignitului de Voivoizi cu umiditatea proprie - compoziția gazului brut anhidru recoltat și compoziția corijată prin eliminarea oxigenului și azotului

În vederea testărilor, lignitul de Voivozi a fost umezit cu exces de umiditate de 0,25 - 0,4 kg/kg cărbune, rezultând o umiditate totală de 40 - 46 %, asigurându-se excesul de vapori solicitat de condițiile de echilibru. Cărbunele transportat mecanic prin intermediul șnecului transportor este succesiv: preîncălzit, uscat și devolatilizat, iar semicocsul rezultat gazificat cu aburul rezultat în urma vaporizării umidității proprii și în exces. Corespunzător experiențelor efectuate, profilul termic longitudinal caracterizând desfășurarea proceselor endoterme prezintă variația temperaturii de la 150 - 175 °C în partea anterioară a cuptorului, practic în zona de preîncălzire și uscare a cărbunelui. În continuare, longitudinal temperatura crește în apropierea zonei mediane spre 400 - 450 °C care indică sfârșitul zonei de devolatilizare. De precizat că, primele reacții de gazificare debutează înainte de sfârșitul pirolizei datorită reactivității ridicate specifice cărbunilor tineri, în speta a ligniților autohtoni. În consecință, începutul gazificării cu umiditatea proprie se întrepătrunde cu sfârșitul degajării volatilelor, ceea ce determină temperaturile relativ scăzute în cazul gazificării cu umiditatea proprie comparativ cu procedeele clasice utilizând uile. Din zona mediană spre partea posterioară a generatorului, temperatura variază între 580 - 780 °C, reprezentând stadiul de gazificare a semicocsului pe baza reacției heterogene a carbonului incandescent cu vaporii de apă, respectiv la partea posterioară a cuptorului, temperatura variază în domeniul 550 - 600 °C reprezentând zona de "postgazificare" a resturilor nereacționate de carbon din cenușă. Stadiile procesului de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie sunt ilustrate de profilul temperaturii și de variația compoziției gazului anhidru produs și recoltat în diferitele zone ale generatorului, practic indicându-se influența temperaturii asupra reacțiilor chimice. Creșterea temperaturii determină scăderea sensibilă a conținutului metanului, rezultat inițial în urma devolatilizării cât și de reacția de metanare care este favorizată de nivelele termice relativ scăzute. Pe de alta parte, creșterea temperaturii favorizează reacția heterogenă de gazificare cu abur ceea ce determină creșterea sensibilă a conținutului oxidului de carbon și hidrogen a gazului brut. Reacția Boudouard, de reducere a bioxidului de carbon în prezența carbonului incandescent apare doar în domeniul temperaturilor ridicate, ponderea acesteia fiind semnificativă la temperaturi de peste 700 °C. Corespunzător diferitelor determinări experimentale efectuate, valorile măsurate ale temperaturii și compoziția gazului recoltat la prizele celor 6 termocuple sunt prezentate în tabelele 6.4 și 6.8, respectiv variația grafică a acestora sunt prezentate în figurile 6.4 și 6.5.

Cenușa rezultată în urma gazificării cu umiditate proprie nu este inflamabilă, încercările de determinare a puterii calorifice indică un conținut de 2 - 4 % carbon. În consecință, gazificarea cu umiditate proprie este caracterizată printr-un grad de conversie al carbonului de 88 - 93 %. De precizat că, la evacuarea din cuptor cenușa era complet sfărâmată datorită frecărilor specifice transportului mecanic prin șneclul elicoidal și în consecință nu s-a putut analiza influența granulației asupra gazificării.

În urma evacuării condensabilelor din gazul brut, obținute în urma răcirii acestuia s-au separat prin decantare gudroanele care reprezintă un combustibil lichid cu puteri calorifice de circa 32.000 - 33.500 kJ/kg. De menționat, dificultățile determinate de utilizarea directă a acestora cât și cele implicate de tratarea fracțiunii apoase datorită conținutului de fenoli, cu efecte negative asupra mediului ambiant.

Setul datelor experimentale combinate cu datele furnizate de bibliografia de specialitate au permis întocmirea bilanțului material și energetic al gazificării cu umiditate proprie. Corespunzător diferitelor determinări experimentale, elementele bilanțului material și energetic sunt prezentate în tabelele 6.5 și 6.6 corespunzător experienței nr. 1, respectiv în tabelele 6.9 și 6.10 corespunzător experienței nr. 2.

Bilanțul material indică o producție specifică de gaz anhidru de 0,82 - 0,90 m³N/kg cărbune însoțit de o cantitate de abur nereacționat de 0,10 - 0,15 kg/kg

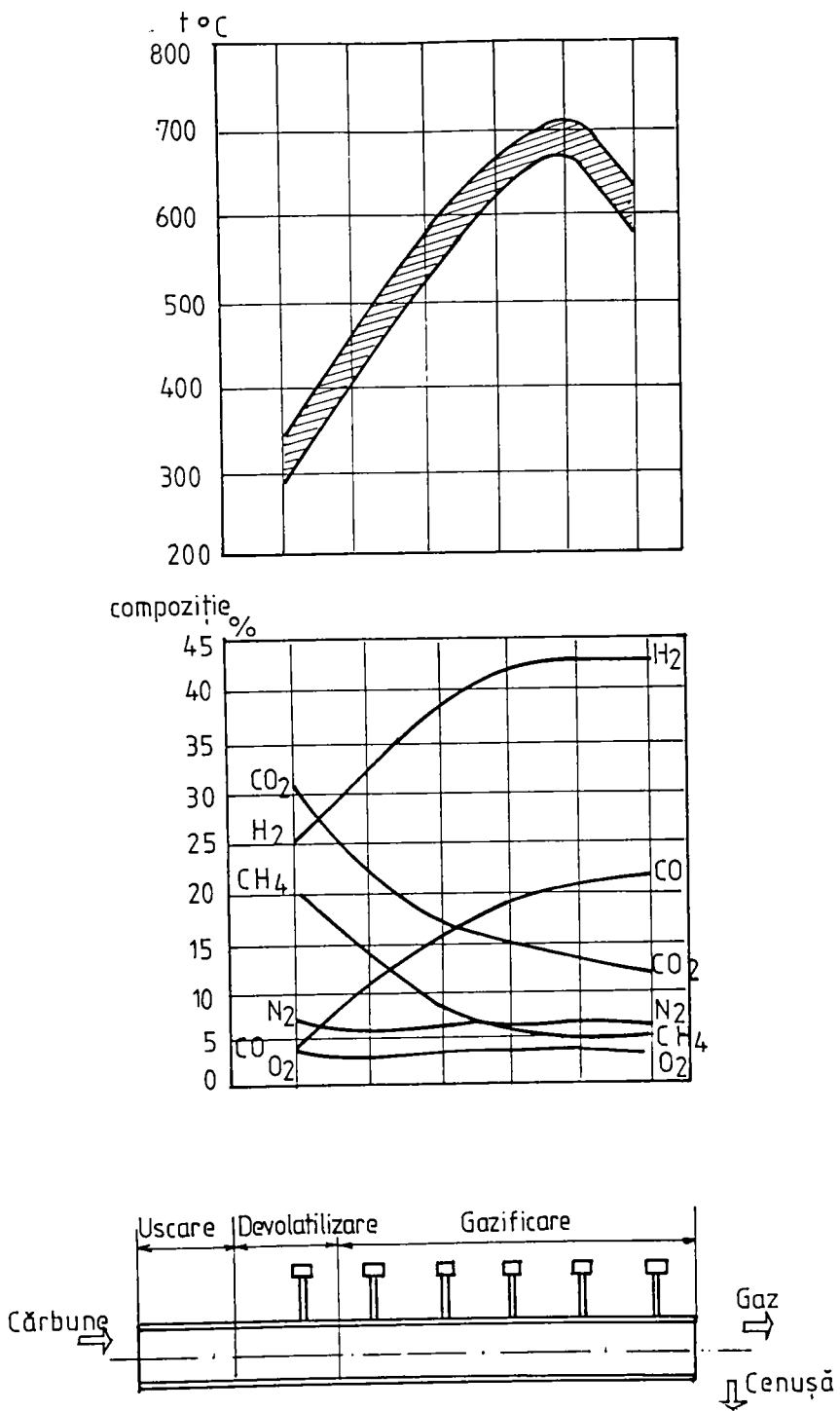


Figura 6.4. Profilul termic, variația compoziției gazului brut și stadiile gazificării cu umiditatea proprie - experiment 1

EXPERIMENT 1

Nr. crt.	PARAMETRU	U.M.	PUNCTE DE MĂSURĂ					
			T1	T2	T3	T4	T5	T6
1.	Temperatura medie	°C	420	530	650	740	780	680
2.	Compoziție gaz CO ^{anh}	%	4,2	11,8	17,3	21,1	20,4	24,5
		%	34,3	25,7	18,6	16,3	14,2	12,5
3.	CO ₂ ^{anh}	%	22,2	17,6	7,8	4,8	5,3	4,3
4.	CH ₄ ^{anh}	%	28,3	35,6	46,2	48,5	49,3	48,6
5.	H ₂ ^{anh}	%	3,6	3,0	3,4	3,2	3,6	3,2
6.	O ₂ ^{anh}	%	7,4	6,3	6,7	6,1	7,2	6,9
7.	N ₂ ^{anh}	%						

Tabelul 6.4 Valorile medii ale temperaturii și compoziției gazelor prelevate la termocuplele T1 - T6

cărbune și de o cantitate de gudroane de circa 0,01kg/kg cărbune. Bilanțul energetic permite determinarea experimentală a necesarului fluxului termic furnizat din exterior ca suport termic al proceselor complexe de gazificare, având valori de 3.200 - 3.450 kJ/kg cărbune, căruia îi corespunde un consum de gaz anhidru de 0,323 - 0,348 m³N/kg cărbune, respectiv ținând cont și de aportul gudroanelor consumul de gaz anhidru devine 0,291 - 0,313 m³N/kg cărbune.

În conformitate cu datele experimentale și analitice furnizate de bilanțul termic, corespunzător experienței 1, respectiv experienței 2, s-au determinat valorile randamentului termic prezentate în tabelul 6.7, respectiv în tabelul 6.11. De menționat că, determinarea fluxului util s-a efectuat pe baza căldurii chimice a gazului brut anhidru, respectiv umed, la care s-a însumat, funcție de caz, căldura chimică a gudroanelor și căldura sensibilă a gazului cald.

Bilanțul energetic permite determinarea randamentului termic al gazificării corespunzător la gazul anhidru rece este de 67,85 - 69,72 %, majorându-se datorită aportului caloric al gudroanelor la 70,34 - 72,51 %, respectiv în cazul gazului umed cald, ținând cont și de aportul gudroanelor, randamentul devine 81,81 - 83,43 %. De remarcat că, ponderea pierderii specifice datorită umidității gazului brut este de 4,1 - 4,3 %, net diminuată față de cazul gazificării în strat, care în plus necesită consumuri energetice suplimentare pentru prepararea aburului ca agent de gazificare.

EXPERIMENT 1

Nr. crt.	PARAMETRII MĂRIMI INTRATE	U.M.	VALORI
1.	CĂRBUNE		VOIVOZI
2.	analiza elementară C ⁱ	%	21,55
3.	H ⁱ	%	1,4
4.	O ⁱ	%	4,24
5.	N ⁱ	%	0,73
6.	S ⁱ	%	1,05
7.	W ⁱ	%	25,92
8.	A ⁱ	%	45,11
9.	cantitate	kg	21,5
10.	timp gazificare	h	3
11.	debit cărbune	kg/h	7,17
12.	putere calorifică inferioară	kJ/kg	7.728,3
13.	putere calorifică superioară	kJ/kg	8.694,8
14.	temperatura intrare	°C	20
15.	CĂLDURA CHIMICĂ CĂRBUNE	MJ	166,158
16.	flux	MJ/h	55,386
17.	valoare procentuală	%	61,4
18.	CĂLDURA SENSIBILĂ CĂRBUNE	MJ	0,826
19.	flux	MJ/h	0,276
20.	valoare procentuală	%	0,3
21.	EXCES UMIDITATE cantitate specifică	kg/kg car.	0,3
22.	cantitate totală	kg	6,45
23.	Temperatură intrare umiditate	°C	20

24.	CĂLDURA SENSIBILĂ UMIDITATE	MJ	0,540						
25.	flux	MJ/h	0,180						
26.	valoare procentuală	%	0,2						
27.	ENERGIE FURNIZATĂ DIN EXTERIOR		ARDERE GAZE NATURALE						
28.	GAZE NATURALE cantitate contorizată	m ³	3,1						
29.	presiune barometrică	torr	738						
30.	suprapresiune gaz	mm H ₂ O	250						
31.	presiune absolută	torr	756,4						
32.	temperatură intrare gaz	°C	20						
33.	cantitate gaz stare normală	m ³ N	2,875						
34.	debit gaz stare normală	m ³ N/h	0,958						
35.	CĂLDURA CHIMICĂ GAZ	MJ	103,241						
36.	flux	MJ/h	34,414						
37.	valoare procentuală	%	38,1						
38.	GAZE ARDERE COȘ temperatură măsurată	°C	260	260	280	300	310	300	300
39.	temperatură medie	°C	287,15						
40.	CĂLDURA SENSIBILĂ GAZE DE ARDERE	MJ	13,886						
41.	flux	MJ/h	4,629						
42.	valoare procentuală	%	5,1						
43.	CĂLDURA FURNIZATĂ DIN EXTERIOR	MJ	89,355						
44.	flux	MJ/h	29,785						
45.	valoare procentuală	%	33,1						
46.	CĂLDURA TOTAL INTRATĂ	MJ	270,077						
47.	FLUX TOTAL INTRAT	MJ/h	90,255						

Tabelul 6.5 Parametrii mărimilor intrate măsurate și elementele bilanțului termic la gazificarea cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

EXPERIMENT 1

Nr. crt.	PARAMETRII MĂRIMI IEȘITE	U.M.	VALORI						
			30	60	90	120	150	180	MED
1.	GAZ DE GAZOGEN ANHIDRU								
2.	PERIOADA DE MĂSURĂ	min	30	60	90	120	150	180	MED
3.	compoziție CO ^{anh}	%	23,6	26,5	21,8	24,8	19,8	22,6	22,73
4.	CO ₂ ^{anh}	%	9,9	9,8	13,6	13,1	14,7	11,6	12,72
5.	CH ₄ ^{anh}	%	2,7	2,3	4,2	4,6	3,7	2,8	3,64
6.	H ₂ ^{anh}	%	54,4	51,3	49,3	47,2	50,6	53,4	50,66
7.	O ₂ ^{anh}	%	3,3	3,8	3,9	3,5	3,9	2,9	3,52
8.	N ₂ ^{anh}	%	6,0	6,3	7,1	6,8	7,3	6,7	6,73
9.	putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N gaz	9.642,4						
10.	putere calorifică superioară	kJ/m ³ N gaz	9.642,4						
11.	cantitate contorizată	m ³	20,8						
12.	suprapresiune gaz	mm H ₂ O	136						
13.	temperatură ieșire gaz	°C	680						
14.	cantitate gaz stare normală	m ³ N	19,07						
15.	debit gaz stare normală	m ³ N/ h	6,36						
16.	CĂLDURA CHIMICĂ GAZ	MJ	183,921						
17.	flux	MJ/h	61,307						
18.	valoare procentuală	%	71,25						
19.	CĂLDURA SENSIBILĂ GAZ	MJ	19,919						
20.	flux	MJ/h	6,639						
21.	valoare procentuală	%	7,4						
22.	CONDENSABILE apă cantitate	kg	2,9						
23.	CĂLDURA SENSIBILĂ UMIDITATE GAZ	MJ	11,165						
24.	flux	MJ/h	3,722						

25.	valoare procentuală	%	4,1
26.	GUDROANE cantitate	kg	0,210
27.	debit	kg/h	0,067
28.	CĂLDURA CHIMICĂ GUDROANE	MJ	6,732
29.	flux	MJ/h	2,244
30.	valoare procentuală	%	2,5
31.	CENUȘĂ cantitate	kg	9,8
32.	debit	kg/h	3,23
33.	temperatură ieșire	°C	680
34.	conținut carbon estimat	%	2 - 4
35.	putere calorifică inferioară	kJ/kg	678 - 1.356
36.	CĂLDURA CHIMICĂ CENUȘĂ	MJ	6,644 - 13,289
37.	flux	MJ/h	2,215 - 4,430
38.	valoare procentuală	%	2,5 - 4,9
39.	CĂLDURA SENSIBILĂ CENUȘĂ	MJ	6,271
40.	flux	MJ/h	2,09
41.	valoare procentuală	%	2,3
42.	IZOLAȚIE TERMICĂ temperatură medie	°C	72
43.	suprafață	m ²	2,51
44.	CĂLDURA PIERDUTĂ SCHIMB GLOBAL	MJ	13,785 - 20,430 estimat închidere bilanț
45.	flux	MJ/h	4,595 - 6,810 estimat închidere bilanț
46.	valoare procentuală	%	5,1 - 7,6
47.	CĂLDURA TOTAL IEȘITĂ + GAZE ARD.	MJ	270,077
48.	flux	MJ/h	90,255

Tabelul 6.6 Parametrii mărimilor ieșite măsurate și elementele bilanțului termic la gazificarea cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

EXPERIMENT 1

Nr. crt.	RANDAMENT	U.M.	Valori
1.	GAZ ANHDIRU RECE	%	67,85
2.	GAZ ANHDIRU RECE + GUDROANE	%	70,34
3.	GAZ ANHDIRU CALD	%	75,21
4.	GAZ ANHDIRU CALD + GUDROANE	%	77,69
5.	GAZ UMED CALD	%	79,33
6.	GAZ UMED CALD + GUDROANE	%	81,81

Tabelul 6.7 Valorile randamentului gazificării cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

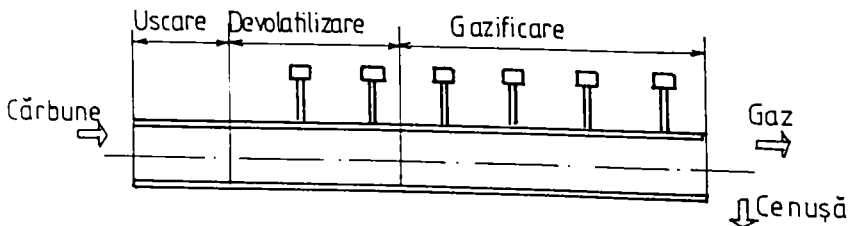
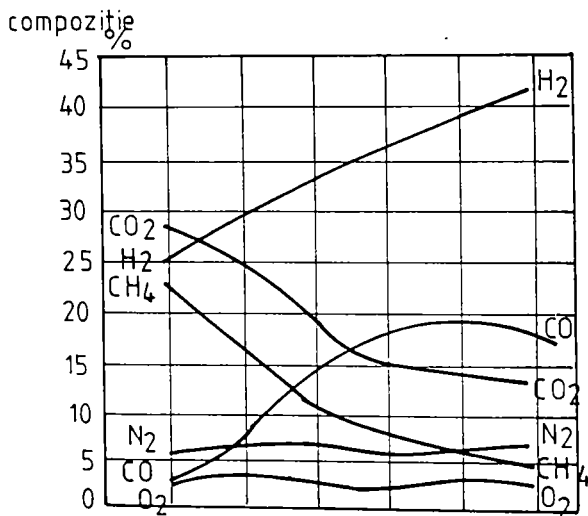
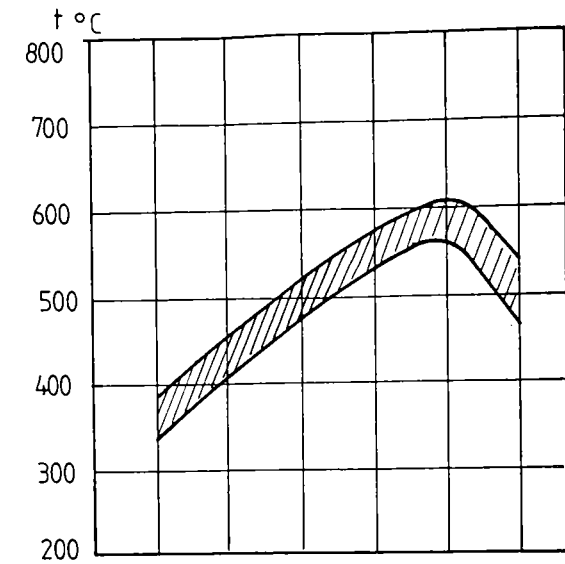


Figura 6.5. Profilul termic, variația compoziției gazului brut și stadiile gazificării cu umiditatea proprie - experiment 2

EXPERIMENT 2

Nr. crt.	PARAMETRU	U.M.	PUNCTE DE MĂSURĂ					
			T1	T2	T3	T4	T5	T6
1.	Temperatură medie	°C	470	520	580	650	680	590
2.	Compoziție gaz CO ^{anh}	%	3,8	7,5	16,3	24,8	21,6	22,3
3.	CO ₂ ^{anh}	%	32,6	29,2	22,6	16,1	15,8	14,8
4.	CH ₄ ^{anh}	%	26,2	19,3	12,4	9,8	7,4	5,3
5.	H ₂ ^{anh}	%	28,3	33,5	38,6	40,7	44,3	48,5
6.	O ₂ ^{anh}	%	2,9	3,2	3,0	2,5	3,5	3,2
7.	N ₂ ^{anh}	%	6,2	7,3	7,1	6,1	7,4	5,9

Tabelul 6.8 Valorile medii ale temperaturii și compoziției gazelor prelevate la termocuplele T1 - T6

EXPERIMENT 2

Nr. crt.	PARAMETRII MĂRIMI INTRATE	U.M.	VALORI
1.	CĂRBUNE		VOIVOZI
2.	analiza elementară C ⁱ	%	21,55
3.	H ⁱ	%	1,4
4.	O ⁱ	%	4,24
5.	N ⁱ	%	0,73
6.	S ⁱ	%	1,05
7.	W ⁱ	%	25,92
8.	A ⁱ	%	45,11
9.	cantitate	kg	24,8
10.	timp gazificare	h	3
11.	debit cărbune	kg/h	8,27
12.	putere calorifică inferioară	kJ/kg	7.728,3
13.	putere calorifică superioară	kJ/kg	8.694,8
14.	temperatură intrare	°C	20
15.	CĂLDURA CHIMICĂ CĂRBUNE	MJ	191,662
16.	flux	MJ/h	63,887
17.	valoare procentuală	%	66,2
18.	CĂLDURA SENSIBILĂ CĂRBUNE	MJ	0,953
19.	flux	MJ/h	0,318
20.	valoare procentuală	%	0,3
21.	EXCES UMIDITATE cantitate specifică	kg/kg car.	0,25
22.	cantitate totală	kg	6,2
23.	Temperatură intrare umiditate	°C	20

24.	CĂLDURA SENSIBILĂ UMIDITATE	MJ	0,519						
25.	flux	MJ/h	0,173						
26.	valoare procentuală	%	0,2						
27.	ENERGIE FURNIZATĂ DIN EXTERIOR		ARDERE GAZE NATURALE						
28.	GAZE NATURALE cantitate contorizată	m ³	2,9						
29.	presiune barometrică	torr	736						
30.	suprapresiune gaz	mm H ₂ O	240						
31.	presiune absolută	torr	753,6						
32.	temperatură intrare gaz	°C	20						
33.	cantitate gaz stare normală	m ³ N	2,680						
34.	debit gaz stare normală	m ³ N/ h	0,893						
35.	CĂLDURA CHIMICĂ GAZ	MJ	96,217						
36.	flux	MJ/h	32,072						
37.	valoare procentuală	%	33,3						
38.	GAZE ARDERE COȘ temperatură măsurată	°C	250	260	280	280	270	260	260
39.	temperatură medie	°C	265,7						
40.	CĂLDURA SENSIBILĂ GAZE DE ARDERE	MJ	11,844						
41.	flux	MJ/h	9,948						
42.	valoare procentuală	%	4,1						
43.	CĂLDURA FURNIZATĂ DIN EXTERIOR	MJ	84,37						
44.	flux	MJ/h	28,124						
45.	valoare procentuala	%	29,2						
46.	CĂLDURA TOTAL INTRATĂ	MJ	289,35						
47.	FLUX TOTAL INTRAT	MJ/h	96,45						

Tabелul 6.9 Parametrii mărimilor intrate măsurate și elementele bilanțului termic la gazificarea cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

EXPERIMENT 2

Nr. crt.	PARAMETRII MĂRIMI IEȘITE	U.M.	VALORI						
			30	60	90	120	150	180	MED
1.	GAZ DE GAZOGEN ANHIDRU								
2.	PERIOADA DE MĂSURĂ	min							
3.	compoziție CO ^{anh}	%	23,8	21,3	21,8	22,7	21,7	22,6	22,32
4.	CO ₂ ^{anh}	%	14,2	16,4	14,8	14,1	15,2	14,8	14,92
5.	CH ₄ ^{anh}	%	4,9	5,8	4,7	5,4	4,8	5,5	5,18
6.	H ₂ ^{anh}	%	50,4	47,2	48,3	45,3	49,7	50,1	48,5
7.	O ₂ ^{anh}	%	2,9	3,7	3,6	3,9	2,9	2,4	3,23
8.	N ₂ ^{anh}	%	3,8	5,6	6,8	8,6	5,7	4,6	5,85
9.	putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N gaz	9.908,8						
10.	putere calorifică superioară	kJ/m ³ N gaz							
11.	cantitate contorizată	m ³	22,3						
12.	suprapresiune gaz	mm H ₂ O	125						
13.	temperatură ieșire gaz	°C	590						
14.	cantitate gaz stare normală	m ³ N	20,36						
15.	debit gaz stare normală	m ³ N/ h	6,79						
16.	CĂLDURA CHIMICĂ GAZ	MJ	201,733						
17.	flux	MJ/h	67,244						
18.	valoare procentuală	%	69,72						
19.	CĂLDURA SENSIBILĂ GAZ	MJ	19,278						
20.	flux	MJ/h	6,426						
21.	valoare procentuală	%	6,7						
22.	CONDENSABILE apă cantitate	kg	3,2						
23.	CĂLDURA SENSIBILĂ UMIDITATE GAZ	MJ	12,320						
24.	flux	MJ/h	4,107						

25.	valoare procentuală	%	4,3
26.	GUDROANE cantitate	kg	0,240
27.	debit	kg/h	0,08
28.	CĂLDURA CHIMICĂ GUDROANE	MJ	8,078
29.	flux	MJ/h	2,693
30.	valoare procentuală	%	2,8
31.	CENUȘĂ cantitate	kg	11,2
32.	debit	kg/h	3,73
33.	temperatură ieșire	°C	590
34.	conținut carbon estimat	%	2 - 4
35.	putere calorifică inferioară	kJ/kg	678 - 1.356
36.	CĂLDURA CHIMICĂ CENUȘĂ	MJ	7,595 - 15,187
37.	flux	MJ/h	2,531 - 5,062
38.	valoare procentuală	%	2,6 - 5,2
39.	CĂLDURA SENSIBILĂ CENUȘĂ	MJ	6,218
40.	flux	MJ/h	2,07
41.	valoare procentuală	%	2,1
42.	IZOLAȚIE TERMICĂ temperatură medie	°C	75
43.	suprafață	m ²	2,51
44.	CĂLDURA PIERDUTĂ SCHIMB GLOBAL	MJ/h	14,697 - 22,290 estimat închidere bilanț
45.	flux	MJ/h	4,899 - 7,430 estimat închidere bilanț
46.	valoare procentuală	%	5,1 -7,7
47.	CĂLDURA TOTAL IEȘITĂ + GAZE ARD.	MJ	289,35
48.	flux	MJ/h	96,45

Tabelul 6.10 Parametrii mărimilor ieșite măsurate și elementele bilanțului termic la gazificarea cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

EXPERIMENT 2

Nr crt.	RANDAMENT	U.M.	Valori
1.	GAZ ANHDIRU RECE	%	69,72
2.	GAZ ANHDIRU RECE + GUDROANE	%	72,51
3.	GAZ ANHDIRU CALD	%	76,38
4.	GAZ ANHDIRU CALD + GUDROANE	%	79,17
5.	GAZ UMED CALD	%	80,64
6.	GAZ UMED CALD + GUDROANE	%	83,43

Tabelul 6.11 Valorile randamentului gazificării cărbunelui de Voivozi cu umiditatea proprie

6.6. CONCLUZII

Analiza rezultatelor determinarilor experimentale efectuate permit prefigurarea următoarelor concluzii:

a. Determinările experimentale efectuate prin intermediul generatorului tubular au dovedit posibilitatea practica a gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie.

b. Comparativ cu procedeele de gazificare clasice - utilizând ca agent de gazificare amestec de aer sau aer îmbogățit cu abur - calitatea gazului brut anhidru obținut este net superioară datorită lipsei azotului, fiind relativ similară cu cazul gazificării cu oxigen și abur, cu o pondere net diminuată a conținutului de bioxid de carbon. față de combustibilul gazos rezultat în urma gazificării în strat a ligniților autohtoni, conform testelor efectuate cu gazogenul cu gratar rotativ la presiune normală în cadrul I.C.S.I.T.E.E București, respectiv cu generatorul Lurgi sub presiune în cadrul SIETA - fostul I.C.S.I.T.E.E. filiala Cluj-Napoca, puterea calorică a gazului brut anhidru rezultat în urma gazificării cu umiditate proprie este aproximativ dublă, datorită lipsei azotului din gazul brut. Calitatea gazului brut anhidru rezultat în urma experimentărilor proprii este relativ similară celui produs în urma cercetărilor întreprinse în cadrul politehniciei din Aachen (R.W.T.H.A.), având o putere calorică cu circa 7,8 % mai mare ca în cazul cuptorului tubular cu transport pneumatic, respectiv diminuată cu circa 7,7 % față de generatorul tubular rotativ. De menționat, conținutul ridicat de metan al gazului brut, determinat de temperaturile scăzute de operare care poate fi majorat în cazul exploatării sub presiune, favorizând utilizarea gazului, după o prealabilă tratare, ca substituit de gaze naturale. Favorizarea reacției de metanare prezintă o importanță deosebită în balanța energetică a generatorului, întrucât reacția de metanare este slab exotermă, prin aceasta diminuându-se necesarul de flux termic furnizat din exterior.

Comparativ, în tabelul 6.12 sunt prezentați parametrii de compoziție ai cărbunelui, respectiv ai gazului brut rezultat în urma gazificării în strat conform testelor autohtone, pe baza tehnologiei Lurgi, precum și în cazul gazificării cu

PARAMETRII	U.M.	GAZIFICARE ÎN STRAT			GAZIFICARE UMIDITATE PROPRIE		
CĂRBUNE compoziție		presiune normală ¹	sub presiune ²	Lurgi ³	cuptor tubular ⁴	cuptor revolutiv ⁴	teste proprie ⁵
C ⁱ	%	25,84	31,05	70,8	26,3	27,39	21,55
H ⁱ	%	2,34	2,69	3,0	2,0	1,74	1,4
O ⁱ	%	11,30	10,71	5,19	9,7	8,81	4,24
N ⁱ	%	0,24	1,66	--	0,4	0,3	0,73
S ⁱ	%	2,00	1,35	0,31	0,2	0,14	1,05
A ⁱ	%	14,50	27,19	15,0	2,4	1,62	45,11
W ⁱ	%	43,60	25,35	5,7	59,0	60,0	25,92
Putere calorifică inferioară	kJ/kg	8561	12225	27663	10572	11394	7728
GAZ DE GAZOGEN compoziție							
CO ^{anh}	%	23,5	21,7	21,5	18,11	30,25	14,32
H ₂ ^{anh}	%	14,0	16,3	38	45,84	56,38	39,98
CH ₄ ^{anh}	%	2,8	1,7	11	2,83	2,5	11,86
CO ₂ ^{anh}	%	8,5	7,2	28,5	32,92	10,87	16,24
O ₂ ^{anh}	%	0,2	1,5	--	--	--	5,09
H ₂ S ^{anh}	%	0,3	--	1,0	--	--	--
N ₂ ^{anh}	%	50,7	51,6	--	0,3	--	12,49
Putere calorifică inferioară	kJ/ m ³ N	5606	5131	11025	9278	10838	10035

Tabelul 6.12 Parametrii de compoziție comparativi ai gazificării în strat și cu umiditatea proprie - ¹ teste I.C.S.I.T.E.E. Bucuresti, ² teste SIETA (I.C.S.I.T.E.E. Cluj-Napoca), ³ gazificare sub presiune Lurgi cu amestec de oxigen cu abur, ⁴ teste Politenica din Aachen (R.W.T.H.A.), ⁵ experiențe de laborator proprii

umiditate proprie conform testelor din cadrul politehnicii din Aachen și rezultatele experimentelor proprii.

c. Confirmarea experimentală a posibilității gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie indică avantaje funcționale importante față de exploatarea

gazogenelor în strat. Gazificarea în strat, în vederea mării eficienței economice și a asigurării stabilității proceselor termochimice necesită preuscarea ligniților până la un conținut de umiditate de maxim 30 %, operație eliminată în cazul utilizării umidității proprii ca agent de gazificare. Temperaturile relativ scăzute de operare, conform determinărilor experimentale de 730 - 780 °C, nu determină aglomerarea semicocsului sau a cenușii, a cărei evitare, în cazul gazificării în strat necesită majorarea consumului de abur - ca moderator termic în vederea menținerii temperaturii cenușii sub limita de înmuiere. Pe de altă parte, gazificarea cu umiditate proprie fiind un procedeu alloterm, permite prin modificarea facilă a fluxului furnizat din exterior obținerea parametrilor adecvați de operare.

d. Experimentele efectuate permit prefigurarea avantajelor economice reflectate de eficiența generatorului și de randamentul global al instalației complexe. Astfel, gazificarea cu umiditatea proprie este caracterizată printr-un randament majorat determinat de diminuarea netă a fluxului termic pierdut datorită umidității gazului brut de circa 3-5 %, comparativ cu cazul gazificării în strat având valori de 10-17 %. De menționat că, prin utilizarea umidității proprii ca agent de gazificare, se elimină consumul energetic suplimentar solicitat de prepararea aburului, necesar atât ca agent de gazificare cât și ca moderator termic al stratului de cenușă. Caracterul economic al procedurii este reflectat și de gradul ridicat de conversie al carbonului de circa 88-93 %, determinat de reziduurile reduse de carbon nereacționat din cenușă.

În consecință, instalația globală de gazificare a cărbunilor este net simplificată prin renunțarea la: instalația de uscare a cărbunilor umezi, generatorul de preparare al aburului și instalația de producere a oxigenului, necesară în vederea obținerii unui gaz de calitate lipsit de azot. De asemenea, instalația de tratare a apelor uzate este net diminuată întrucât, după colectarea gudroanelor - utilizabile drept combustibil lichid - restul condensabilelor pot fi recirculate în generator în vederea asigurării excesului de umiditate solicitat de echilibrurile chimice. Pe de altă parte, diminuarea sensibilă a complexității instalației globale necesare gazificării cărbunilor determină reducerea semnificativă a consumului energetic solicitat de pregătirea cărbunelui și de prepararea agentului de gazificare. De remarcat că, în cazul gazificării cu umiditate proprie, datorită caracterului alloterm al procesului, instalația globală cuprinde un focar industrial care furnizează gazele de ardere necesare furnizării din exterior a fluxului termic.

Actuala fază a cercetării permite evidențierea principalelor dificultăți și dezavantaje previzibile ale gazificării cu umiditatea proprie. Principalele probleme constau în determinarea parametrilor funcționali optimi - temperatură, presiune, densitate flux termic furnizat din exterior în diferitele stadii ale procesului, granulația și umiditatea cărbunelui - corelați cu transferul termic și modalitatea de transport a cărbunelui în interiorul generatorului. Circulația în echicurent a reactanților determină temperaturi ridicate de recoltare a gazului brut și de evacuare a cenușii a căror căldură sensibilă nu poate fi recuperată în proces, spre deosebire de cazul generatoarelor în strat caracterizate prin circulația în contracurent. De asemenea, datorită furnizării din exterior a fluxului termic necesar gazificării, agentul termogen primar - eventual gaze de ardere - părăsesc gazogenul la o temperatură relativ ridicată. În consecință, instalația globală trebuie să cuprindă recuperatoare care să permită preîncălzirea aerului de combustie, respectiv a aerului de diluție, pe baza unei fracțiuni din căldura sensibilă a gazului brut, respectiv a gazelor de ardere la ieșirea din gazogen.

CAPITOLUL 7

MODELAREA MATEMATICĂ A GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

7.1. GENERALITĂȚI

Determinarea teoretică a potențialului gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, în vederea estimării calității gazului brut și a eficienței producerii acestuia reprezintă elementul fundamental necesitat de calculele preliminară tehnico-economică de implementare a procedurii. De asemenea, modelarea matematică a gazificării cărbunilor oferă posibilitatea analizei influenței condițiilor de operare asupra parametrilor de compoziție și energetici ai procesului, permițând în cazul în care ipotezele sunt confirmate de determinările experimentale, adoptarea domeniului optim de operare, reducându-se prin aceasta volumul experimental. În plus modelarea matematică permite analiza comparativă a procedurilor de gazificare în vederea adoptării soluției optime.

Dezideratul proiectantului unui generator de gazificare a cărbunilor este de a prevedea și asigura condițiile în care reacțiile se produc cât mai aproape de echilibru, deplasat spre produșii finali doriti. Analiza unui procedeu de gazificare implică determinarea influențelor condițiilor de desfășurare, practic a parametrilor termici, de presiune, fizico-chimici și cinetici în vederea conducerii reacțiilor termochimice spre produsii finali doriti. În esență, prin combinarea relațiilor specifice bilanțului masic și energetic, cu relațiile echilibrului chimic este posibilă determinarea compoziției gazului de generator, a consumului specific de cărbune și a cantității de agent de gazificare funcție de principalii parametri care influențează procesul: temperatura și presiunea.

7.2. MODELUL MATEMATIC AL GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE ÎN CONDIȚII DE ECHILIBRU TERMODINAMIC

Modelarea matematică în condiții de echilibru termodinamic se bazează pe starea inițială - cărbune, eventual exces de umiditate - și starea finală - gaz de generator și cenușă, neglijându-se stările intermediare, deci implicit cinetica proceselor complexe fizico -chimice ce se desfășoară în generator. Principal, prin combinarea relațiilor specifice bilanțului masic cu relațiile setului echilibrelor chimice necesare și suficiente pentru descrierea termodinamică a sistemului reactant este posibilă determinarea compoziției gazului de generator, a consumului specific de cărbune și a eventualului exces de umiditate, impus de asigurarea echilibrelor chimice, în funcție de principalii parametri de operare care influențează procesul: temperatura și presiunea. Având în vedere că, gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie este un proces alloterm, modelul matematic trebuie să cuprindă și ecuația bilanțului termic în vederea determinării fluxului termic furnizat din exterior, ca suport al proceselor endoterme complexe ce apar la gazificare. De menționat că, neglijarea cineticii proceselor fizico-chimice complexe nu permite estimarea exactă a compoziției gazului brut, întrucât la operarea în generatoarele industriale nu se ating condițiile solicitate de echilibrul reacțiilor, reactanții părăsind zona de reacție înaintea atingerii

echilibrului. Totuși analiza în condiții de echilibru termodinamic al gazificării cărbunilor oferă setul de date necesar proiectării și adoptării condițiilor optime de operare, conducând la concluziile tehnico-economice de utilizare a gazificării cu umiditatea proprie /7.1, 7.2, 7.3/.

Starea inițială este determinată în principal de compoziția cărbunelui, practic de analiza elementară a probei inițiale. Corespunzător modelului matematic, cărbunele poate fi abordat, într-o primă aproximare, ca un "amestec" de elemente chimice pure - C, H, O, N, S - însoțite de umiditate și masa minerală necombustibilă, în conformitate cu analiza elementară a probei inițiale. De menționat că, acest mod de adoptare nu influențează bilanțul masic care urmează a fi scris independent pentru fiecare element chimic, având însă efect asupra constantelor de echilibru, întrucât acestea sunt determinate pe baza reacțiilor elementelor chimice pure. O altă posibilitate o constituie adoptarea cărbunelui sub forma macromoleculară, conform formulei chimice a masei cărbunoase $C H_x O_y$, ceea ce conduce la dificultăți în determinarea constantelor de echilibru, întrucât literatura de specialitate nu consemnează decât sporadic date termodinamice relevante pentru model - entalpia, entropia și căldura specifică - pentru cărbuni sau semicocsurile acestora. De asemenea, apar dificultăți în rezolvarea numerică a a modelului matematic datorită caracterului nelinier la puteri reale funcție de valorile lui α și β care conduc la instabilitatea soluției matematice în cazul rezolvărilor prin metode clasice.

7.1.1. MODEL MATEMATIC ÎN CONDIȚII DE ECHILIBRU BAZAT PE ANALIZA ELEMENTARĂ A CĂRBUNELUI

Scopul modelului matematic în condiții de echilibru termodinamic constă în determinarea compoziției gazului de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, funcție de parametrii de operare - temperatură și presiune. De asemenea, modelul trebuie să permită determinarea consumului specific de cărbune și a eventualului exces de umiditate precum și a fluxului termic furnizat din exterior corespunzător producerii unități de gaz de gazogen.

Starea inițială este descrisă de analiza elementară a cărbunelui prin participațiile masice ale constituenților - C^i , H^i , O^i , S^i , N^i , W^i și A^i - de consumul specific de cărbune necesar producerii unității de gaz - B (kg/m^3N gaz) - și a eventualului exces specific de umiditate - W^{exc} (kg/m^3N gaz) solicitat de atingerea echilibrului chimic.

Starea finală este descrisă de constituenții gazului de gazogen exprimați prin participațiile lor volumice - r_{CO} , r_{H_2} , r_{CH_4} , r_{CO_2} , r_{N_2} , r_{H_2S} și r_{H_2O} . S-a considerat că, gazul de gazogen nu conține oxigen, întrucât oxigenul conținut de cărbune și umiditate va apărea legat chimic în produșii finali ai gazificării. De asemenea, este necesară determinarea cantității de căldură unitare furnizată din exterior - Q_{ext} (kJ/m^3N gaz) - necesare ca suport termic al proceselor endoterme specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie.

Modelul matematic implică determinarea celor 10 necunoscute ale procesului: consumul specific de cărbune, excesul specific de umiditate, compoziția gazului de gazogen și cantitatea de căldură unitară, ceea ce conduce la necesitatea scrierii unui sistem de 10 ecuații. Sistemul de ecuații cuprinde ecuațiile bilanțului material al fiecărui element chimic, relațiile echilibrului chimice necesare și suficiente pentru descrierea comportării termodinamice precum și relația bilanțului termic al sistemului reactant.

Indiferent de reacțiile termochimice și de cinetica desfășurării proceselor fizico-chimice specifice gazificării este respectată legea conservării masei, oglindită de

bilanțul material al fiecărui element chimic introdus prin cărbune și excesul de umiditate și regăsit în combinațiile gazului de generator. În consecință s-au scris relațiile bilanțului material corespunzător fiecărui element chimic:

a - bilanțul masic al carbonului:

- carbonul intrat în proces prin cărbune:

$$C^i B \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.1)$$

- carbonul ieșit din proces prin componentele gazului de gazogen, sub forma

de:

$$CO_2 = r_{CO_2} \frac{12,011}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.2)$$

$$CO = r_{CO} \frac{12,011}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.3)$$

$$CH_4 = r_{CH_4} \frac{12,011}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.4)$$

- rezultând ecuația de bilanț masic al carbonului:

$$C^i B^i = (r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4}) \frac{12,011}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.5)$$

b - bilanțul masic al oxigenului:

- oxigenul intrat în proces prin masa cărbunoasă a cărbunelui:

$$O^i B \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.6)$$

- oxigenul intrat în proces prin umiditatea cărbunelui și excesul de umiditate:

$$(W^i B + W^{exc}) \frac{31,999}{2 \cdot 18,015} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.7)$$

- oxigenul ieșit din proces prin componentele gazului de gazogen, sub forma

de:

$$CO_2 = r_{CO_2} \frac{31,999}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.8)$$

$$CO = r_{CO} \frac{31,999}{2 \cdot 22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.9)$$

$$H_2O = r_{H_2O} \frac{31,999}{2 \cdot 22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.10)$$

- rezultând ecuația de bilanț masic al oxigenului:

$$O^i B + (W^i B + W^{exc}) \frac{31,999}{2 \cdot 18,015} = (r_{CO_2} + 0,5r_{CO} + 0,5r_{H_2O}) \frac{31,999}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.11)$$

c - bilanțul masic al hidrogenului:

- hidrogenul intrat în proces prin masa cărbunoasă a cărbunelui:
 $H^i B$ [kg/m³N gaz] (7.12)

- hidrogenul intrat în proces prin umiditatea cărbunelui și excesul de umiditate:

$$(W^i B + W^{exc}) \frac{2,0159}{18,015} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.13)$$

de - hidrogenul ieșit din proces prin componentele gazului de gazogen, sub forma

$$CH_4 = r_{CH_4} \frac{2 \cdot 2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.14)$$

$$H_2 = r_{H_2} \frac{2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.15)$$

$$H_2O = r_{H_2O} \frac{2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.16)$$

$$H_2S = r_{H_2S} \frac{2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.17)$$

- rezultând ecuația de bilanț masic al hidrogenului:

$$HB + (W^i B + W^{exc}) \frac{2,0159}{18,015} = (2r_{CH_4} + r_{H_2} + r_{H_2O} + r_{H_2S}) \frac{2,0159}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.18)$$

d - bilanțul masic al azotului:

- azotul intrat în proces prin cărbune:

$$N^i B \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.19)$$

- azotul ieșit din proces prin componentele gazului de gazogen, sub forma de:

$$N_2 = r_{N_2} \frac{28,013}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.20)$$

- rezultând ecuația de bilanț masic al azotului:

$$N^i B = r_{N_2} \frac{28,013}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.21)$$

e - bilanțul masic al sulfului:

- sulful intrat în proces prin cărbune:

$$S^i B \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.22)$$

- sulful ieșit din proces prin componentele gazului de gazogen, sub forma de:

$$H_2S = r_{H_2S} \frac{32,06}{22,414} \quad [kg/m^3 N \text{ gaz}] \quad (7.23)$$

- rezultând ecuația de bilanț masic al sulfului:

$$S^I_B = r_{H_2S} \frac{32,06}{22,414} \quad [\text{kg/m}^3 \text{N gaz}] \quad (7.24)$$

Sistemul de ecuații ale bilanțului material se completează cu relația participațiilor volumice ale componentelor gazului de gazogen brut a căror sumă trebuie să fie egală cu unitatea, conform relației:

$$r_{CO} + r_{CH_4} + r_{H_2} + r_{CO_2} + r_{N_2} + r_{H_2S} + r_{H_2O} = 1 \quad (7.25)$$

În vederea descrierii comportării termodinamice ale sistemului reactant trebuie adoptate, din multitudinea reacțiilor posibile dintre componentele cărbunelui și ale gazului brut, reacțiile chimice necesare și suficiente care determină obținerea produșilor finali. În consecință s-au adoptat următoarele reacții chimice:

- reacția Boudouard:



- reacția de hidrogenare a carbonului:



- reacția de gazificare heterogenă cu vapori de apă:



Corespunzător reacțiilor chimice adoptate s-au determinat constantele de echilibru funcție de presiunile parțiale ale componentelor gazoase ale reactanților, conform relațiilor:

- reacția Boudouard:

$$K_p = \frac{p r_{CO}^2}{r_{CO_2}} \quad (7.29)$$

- reacția de hidrogenare a carbonului:

$$K_p = \frac{r_{CH_4}}{p r_{CH_4}^2} \quad (7.30)$$

- reacția de gazificare heterogenă cu vaporii de apă:

$$K_p = \frac{p r_{CO} r_{H_2}}{r_{H_2O}} \quad (7.31)$$

Calculul constantelor de echilibru aferente reacțiilor chimice adoptate se efectuează pe baza determinării afinității chimice care depinde de variația entalpiei și entropiei standard a reactanților, conform relației:

$$\ln K_p = - \frac{1}{R \cdot T} \left(\Delta H_{298}^0 - T \Delta S_{298}^0 + \int_{298}^T \Delta C_p^0 dT - \int_{298}^T \frac{\Delta C_p^0 dT}{T} \right) \quad (7.32)$$

în care: R - este constanta universală a gazelor perfecte, în kJ/kmol K;

T - temperatura la care se desfășoară reacția chimică, în K;

ΔH_{298}^0 - entalpia de reacție, în kJ/kmol;

ΔS_{298}^0 - entropiei de reacție, în kJ/kmol K;

ΔC_p^0 - variația capacității calorice moleculare corespunzător temperaturii T, în kJ/kmol K, a căror valori sunt prezentate în tabelul 7.1.

Nr. crt.	SUBSTANTA	H_{298}^0 kJ/kmol	S_{298}^0 kJ/kmol K	C_p^0 kJ/kmol K
1.	C	0	1,3609	$2,673 + 2,617 \cdot 10^{-3} T - 0,1169 \cdot 10^6 T^{-2}$
2.	CO ₂	-94.051,8	51,061	$6,85 + 8,533 \cdot 10^{-3} T - 2,475 \cdot 10^{-6} T^2$
3.	CO	-26.415,7	47,3	$6,25 + 2,091 \cdot 10^{-3} T - 4,59 \cdot 10^{-7} T^2$
4.	H ₂	0	31,211	$6,88 + 0,066 \cdot 10^{-3} T + 2,79 \cdot 10^{-7} T^2$
5.	CH ₄	-17.889	44,5	$4,75 + 12 \cdot 10^{-3} T + 30,31 \cdot 10^{-7} T^2 - 2,63 \cdot 10^{-9} T^3$
6.	H ₂ O	57.237	46,84	$6,89 + 3,283 \cdot 10^{-3} T - 3,43 \cdot 10^{-7} T^2$

Tabelul 7.1 Valorile entalpiei standard, a entropiei standard și variația capacității calorice molare /7.4, 7.5/.

Întrucât gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie este un proces alloterm caracterizat prin faptul că procesele endoterme complexe specifice gazificării se desfășoară pe baza aportului termic furnizat din exterior, este necesară analiza bilanțului termic al gazificării. În consecință, bilanțul termic permite determinarea energiei termice furnizate din exterior, pe baza diferenței dintre suma energiilor ieșite și suma energiilor intrate, aduse la echivalență sub forma energiei termice.

Energiile intrate corespunzătoare unității de gaz de gazogen sunt următoarele:

- căldura chimică a cărbunelui:

$$Q_{cc} = B H_{cs} \quad [\text{kJ/m}^3 \text{N gaz}] \quad (7.33)$$

- căldura sensibilă a cărbunelui:

$$Q_{cs} = B C_c t_c \quad [\text{kJ/m}^3 \text{N gaz}] \quad (7.34)$$

- căldura sensibilă a apei în exces:

$$Q_{ws} = B w_{exc} C_w t_w \quad [\text{kJ/m}^3 \text{N gaz}] \quad (7.35)$$

în care: H_{cs} - puterea calorifică superioară a cărbunelui, în kJ/kg;

C_c , C_w - căldura specifică a cărbunelui, respectiv a excesului de umiditate la intrare, în kJ/kg K;

t_c, t_w - temperatura cărbunelui, respectiv a excesului de umiditate la intrare, în °C.

Căldurile ieșite din gazogen se determină pe baza relațiilor:

- căldura chimică a gazului de gazogen:

$$Q_{cg} = H_{gs} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (7.36)$$

- căldura sensibilă a gazului de gazogen:

$$Q_{gs} = c_{pg} t_g \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (7.37)$$

- căldura sensibilă a cenușii:

$$Q_{cens} = B A^i C_{cen} t_{cen} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (7.38)$$

în care: H_{gs} - puterea calorifică superioară a gazului de gazogen, în $\text{kJ/m}^3\text{N}$;
 c_{pg}, c_{pw} - căldura specifică la presiune constantă a gazului de gazogen, respectiv a vaporilor în exces, la ieșire, în $\text{kJ/m}^3\text{N K}$;
 c_{cen} - căldura specifică a cenușii, în kJ/kg K ;
 t_g, t_{cen} - temperatura gazului de gazogen, respectiv a cenușii, la ieșire din gazogen, în °C.

Neglijând pierderile specifice gazogenului de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie (pierderi prin gazificare incompletă a carbonului, prin gudroane, prin schimb termic global cu mediul ambiant) rezultă căldura furnizată din exterior necesară gazificării, pe baza relației:

$$Q_{ext} = Q_{cg} + Q_{gs} + Q_{cens} - (Q_{cc} + Q_{cs} + Q_{ws}) \quad [\text{kJ/m}^3\text{N gaz}] \quad (7.39)$$

În consecință, rezultă modelul matematic al gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie în condiții de echilibru termodinamic care este practic un sistem format din 10 ecuații neliniare, constând din relațiile bilanțului material - ecuațiile (7.5), (7.11), (7.18), (7.21), (7.24), relația participațiilor gazului de gazogen - ecuația (7.25), relațiile echilibrelor chimice - ecuațiile (7.29), (7.30), (7.31) și relația bilanțului termic (7.39). Prin rezolvarea sistemului de ecuații rezultă: compoziția gazului de gazogen, consumul specific de cărbune și a excesului de umiditate, precum și a necesarului de căldura furnizată din exterior. În vederea analizei influenței parametrilor de operare - temperatura și presiunea de gazificare - asupra proceselor ce apar la gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, rezultă necesitatea rezolvării sistemului pentru o gamă de temperaturi cuprinsă între 400 °C și 700 °C și de presiuni variind între cea normală și 30 bar, valori uzuale întâlnite la tehnologiile de gazificare a cărbunilor, ceea ce implică realizarea unui program de calcul automat.

Programul de calcul și schema logică a acestuia, prezentate în anexa 2, cuprinde în prima etapă introducerea datelor inițiale - analiza elementară a cărbunelui, urmată de verificarea corectitudinii introducerii datelor de calcul. În continuare are loc reducerea sistemului prin eliminarea succesivă a necunoscutelor pînă la o singură ecuație polinomială de grad superior, care urmează a fi rezolvată prin metoda Newton-Raphson. Întrucât, polinomul de grad superior are mai multe soluții reale, în următoarea etapă se determină soluția unică care verifică sistemul. Pe baza soluției obținute, are loc determinarea succesivă a tuturor necunoscutelor sistemului, fiecare dintre acestea fiind corelată cu intervalul de valori posibil, în vederea evitării eventualelor erori. Prin rezolvări succesive ale sistemului,

corespunzător diferitelor valori ale temperaturii și presiunii, cu influențe asupra constantelor de echilibru se obține variația compoziției gazului brut și a mărimilor energetice ale acestuia, funcție de parametri de operare /7.11, 7.12/.

Algoritmul de calcul, anterior prezentat, modelează matematic gazificarea în condiții de echilibru, pe baza analizei elementare a cărbunelui, a condus la determinarea parametrilor de compoziție și energetici ai gazificării cu umiditatea proprie a ligniților de Voivozi, Rovinari și Borozel. Corespunzător lignitului de Voivozi în vederea ilustrării concluziilor oferite de modelul matematic s-a prezentat în figura 7.1 variația compoziției gazului brut funcție de temperatura și presiunea de operare. Astfel figura 7.1.a prezintă variația bioxidului de carbon, figura 7.2.b variația compoziției metanului, figura 7.1.c variația compoziției oxidului de carbon, respectiv figura 7.1.d variația compoziției hidrogenului. În figura 7.2 sunt prezentate variația puterii calorifice inferioare a gazului brut umed, respectiv anhidru. Figura 7.3.a prezintă variația consumului specific de cărbune necesar producerii unității de gaz, respectiv figura 7.3.b necesarului excesului specific de umiditate impus de atingerea echilibrelor chimice. În figura 7.4 este prezentată variația necesarului de flux termic furnizat din exterior ca suport al proceselor endoterme specifice gazificării cu umiditatea proprie. De remarcat că, cazul real diferă de cel teoretic, anterior prezentat, datorită faptului că s-au luat în considerare datele termodinamice corespunzătoare elementelor chimice pure care diferă de cele reale ale cărbunilor și semicocsurilor acestora. De asemenea, cinetica proceselor termochimice nu permite în cazul real al generatorului atingerea echilibrului chimic.

7.1.2. MODEL MATEMATIC ÎN CONDIȚII DE ECHILIBRU BAZAT PE FORMULA MASEI CĂRBUNOASE

Pe lângă abordarea modelului pe baza elementelor chimice pure, o altă posibilitate o constituie adoptarea cărbunelui sub forma macromoleculară, conform formulei chimice a masei cărbunoase - $C H_{\alpha} O_{\beta}$, ceea ce conduce la concluzii mai aproape de cazul real, datorită descrierii comportării termodinamice pe baza datelor furnizate de formula chimică a cărbunelui / 7.13, 7.14/.

Similar cazului anterior, starea inițială este determinată în principal de compoziția cărbunelui, practic de analiza elementară a probei inițiale. Corespunzător scrierii ecuațiilor bilanțului material ale modelului matematic, cărbunele poate fi considerat pe baza elementelor chimice pure - C, H, O, N, S - însoțite de umiditate și masa minerală necombustibilă, în conformitate cu analiza elementară a probei inițiale. De precizat că, acest mod de abordare nu influențează bilanțul masic, întrucât relațiile sunt determinate independent pentru fiecare element chimic. În consecință, modelul matematic cuprinde cele 5 ecuații ale bilanțului material a fiecărui element chimic - relațiile (7.5), (7.11), (7.18), (7.21) și (7.24) - precum și ecuația participațiilor volumice ale componentelor gazului de gazogen - relația (7.25).

O problemă deosebită o constituie descrierea comportării termodinamice ale sistemului reactant pe baza ecuațiilor reacțiilor chimice în care se consideră molecula masei cărbunoase - $C H_{\alpha} O_{\beta}$. Caracterul neliniar al sistemului de ecuații se datorează relațiilor constantelor de echilibru corespunzătoare reacțiilor chimice, necesare și suficiente, care descriu compoziția termodinamică a sistemului reactant. Corespunzător gazificării cărbunilor apar reacții omogene - reactanții și produsele reacțiilor, fiind gaze - și reacții heterogene - reacțiile masei cărbunoase cu componente gazoase. Coeficienții de echilibru corespunzători reacțiilor omogene determină relații matematice neliniare având însă avantajul că puterile necunoscutelor

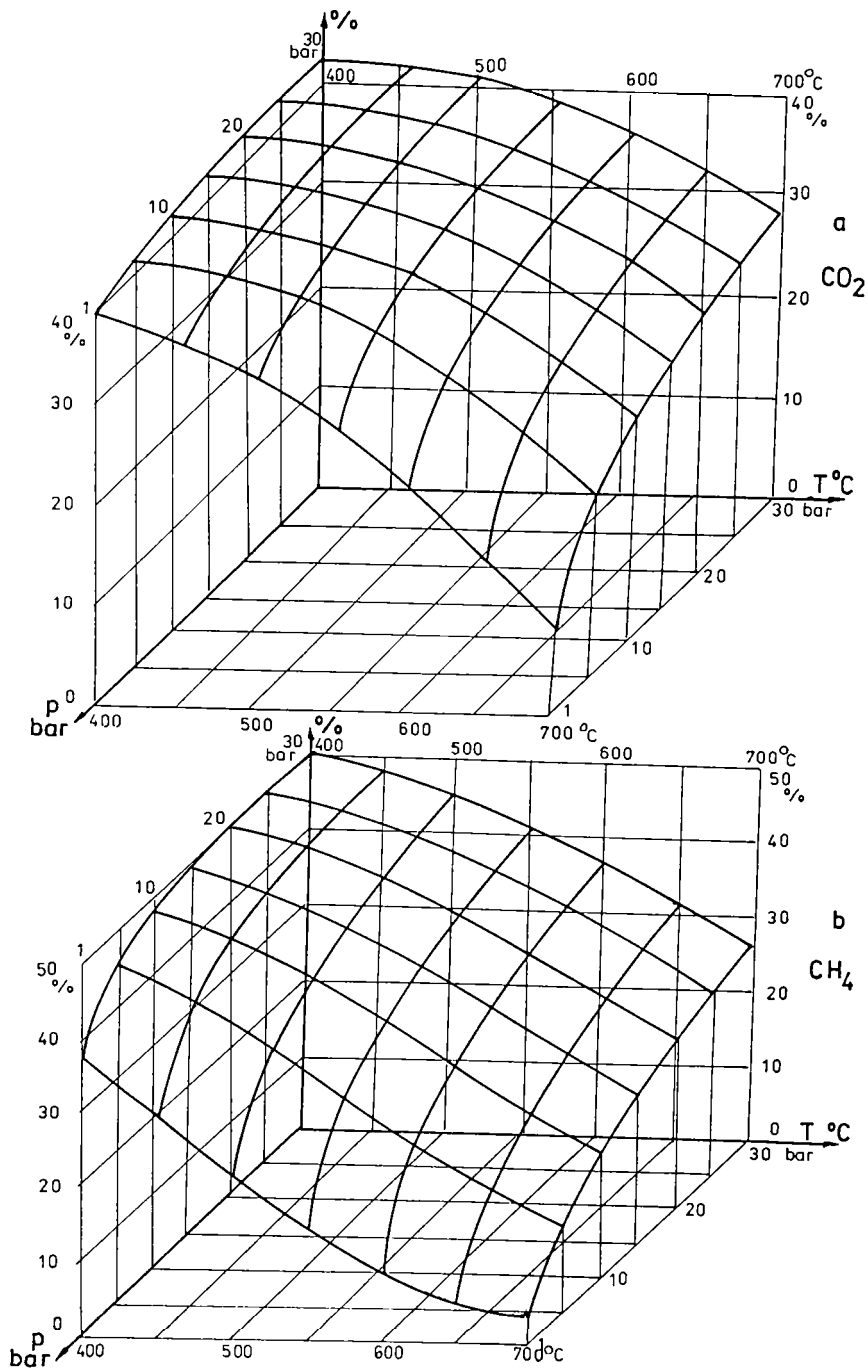


Figura 7.1. Variația compoziției gazului brut anhidru
 a - variația conținutului de CO₂
 b - variația conținutului de CH₄

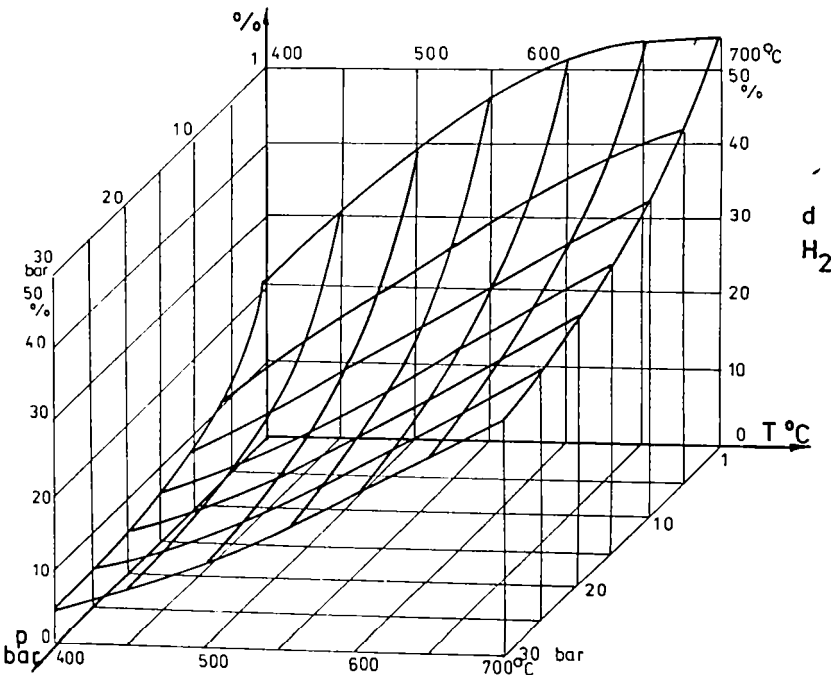
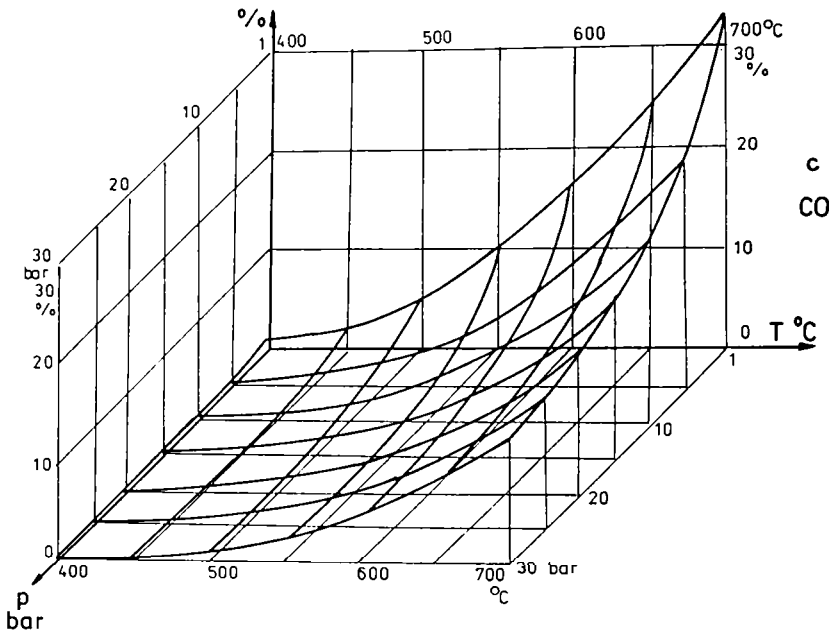


Figura 7.1. Variația compoziției gazului brut anhidru
 c - variația conținutului de CO
 b - variația conținutului de H₂

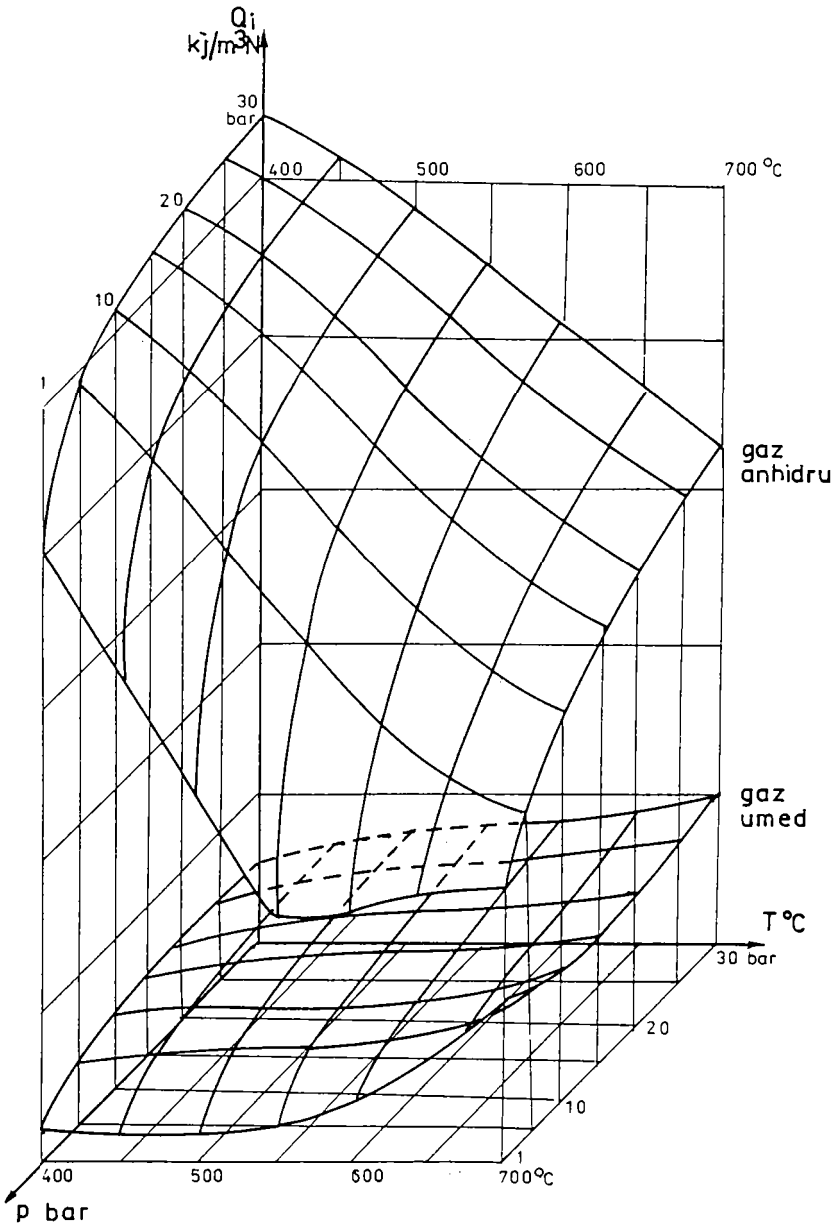


Figura 7.2. Variația puterii calorifice inferioare a gazului brut anhidru, respectiv umed [$\text{kJ/m}^3\text{N}$]

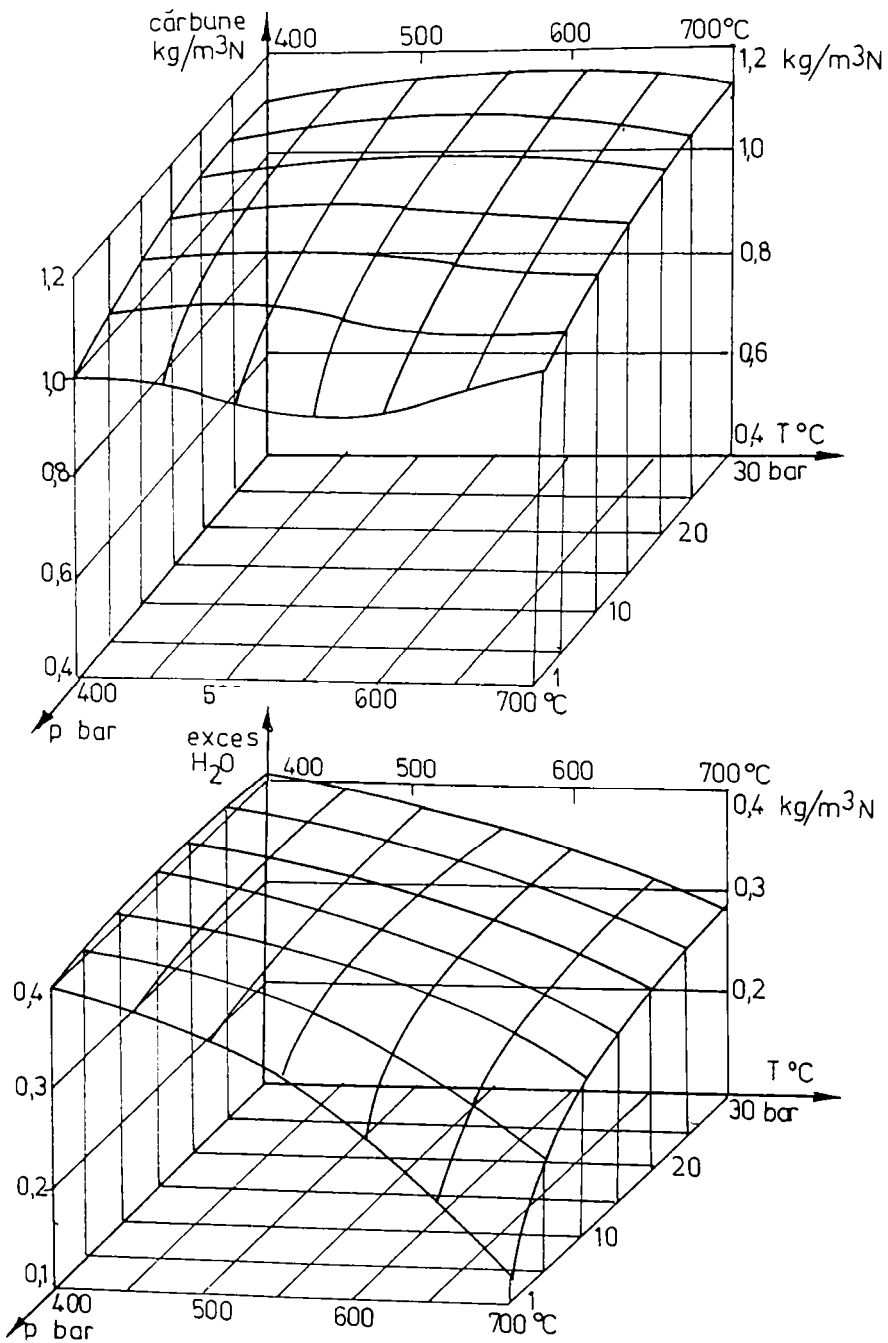


Figura 7.3. Variația consumurilor specifice;
 a - consumul specific de cărbune [kg/m³N gaz anhidru];
 b - consumul specific de exces de umiditate [kg/m³N gaz anhidru]

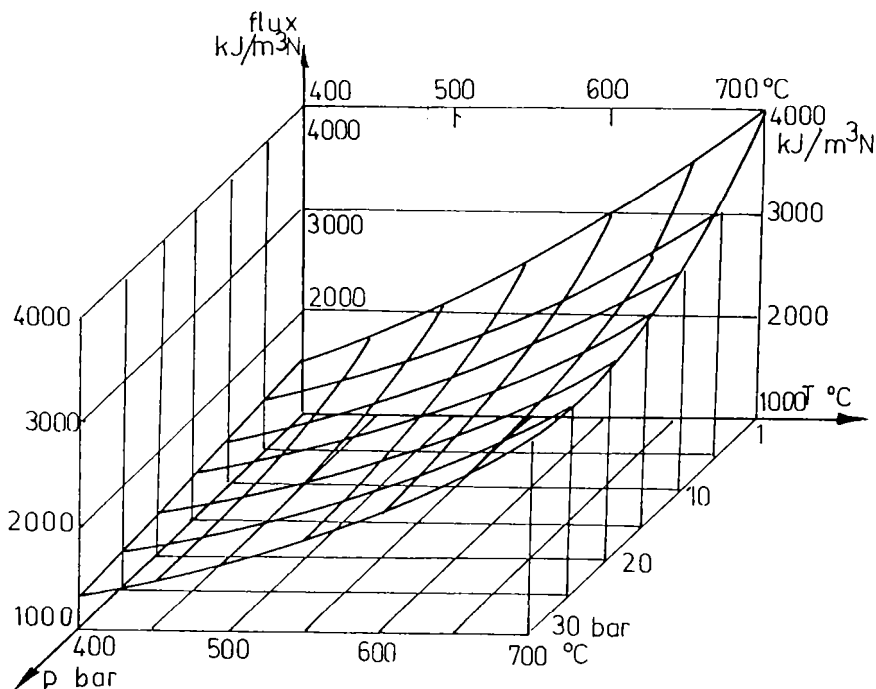
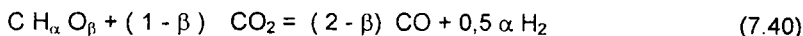


Figura 7.4. Variația necesarului de flux termic furnizat din exterior [kJ/m³N gaz anhidru]

- componente ale gazului de gazogen - sunt numere naturale. În cazul reacțiilor heterogene datorită coeficienților formulei chimice ale masei cărbunoase coeficienții de echilibru conduc la relații matematice neliniare cu exponenți numere reale, funcție de α și β . Diminuarea dificultăților matematice determinate de exponenții reali implică alegerea în principal a reacțiilor chimice omogene și doar a strictului necesar de reacții heterogene.

În consecință, setul de reacții chimice adoptate în vederea descrierii comportării termodinamice a gazificării cuprinde: reacția Boudouard - scrisă pentru molecula masei cărbunoase, reacția omogenă de hidrogenare a oxidului de carbon precum și reacția oxidului de carbon cu vaporii de apă, pe baza relațiilor:

- reacția Boudouard pentru masa cărbunoasă:



Corespunzător reacțiilor chimice adoptate s-au determinat constantele de echilibru funcție de presiunile parțiale ale componentelor gazoase ale reactanților, conform relațiilor:

- reacția Boudouard:

$$K_p = p^{1+0,5\alpha} \frac{r_{CO}^{2-\beta} r_{H_2}^{0,5\alpha}}{r_{CO_2}^{1-\beta}} \quad (7.43)$$

$$K_p = \frac{r_{CO_2} r_{H_2}}{r_{CO} r_{H_2O}} \quad (7.44)$$

$$K_p = \frac{r_{CH_4} r_{CO_2}}{p^2 r_{CO}^2 r_{H_2}^2} \quad (7.45)$$

Calculul constantelor de echilibru aferente reacțiilor chimice anterior adoptate se efectuează pe baza relației 7.32, în conformitate cu variația entalpiei și entropiei standard a reactanților conform tabelului 7.1.

De asemenea, relațiile anterior prezentate, se combină cu ecuația bilanțului termic al gazificării - relația 7.39, care permite determinarea căldurii furnizate din exterior în vederea obținerii unității de gaz de gazogen pe baza gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie.

În consecință, modelul matematic al gazificării cărbunilor - considerându-se formula chimică a masei cărbunoase - cu umiditatea proprie în condiții de echilibru termodinamic, care este practic un sistem format din 10 ecuații neliniare având necunoscutele la puteri naturale și puteri reale, funcție de α și β . Rezolvarea sistemului de ecuații pentru diferite valori uzuale ale parametrilor de operare - temperatură și presiune, permite obținerea următorilor parametri: compoziția gazului de gazogen, consumul specific de cărbune și a excesului de umiditate, precum și a necesarului de căldură furnizată din exterior.

Algoritmii de rezolvare al sistemului neliniar implică dificultăți deosebite datorate exponenților puterilor necunoscutele - puteri naturale și reale. Analizând sistemul de ecuații este posibilă reducerea, pe baza calculului automat al acestuia la un sistem format din 2 relații cu 2 necunoscute la puteri reale. Pentru rezolvarea acestui sistem s-a făcut apel la dezvoltarea puterilor reale ale necunoscutele în serii Taylor de gradul 2 în jurul valorilor necunoscutele, rezultate din modelul simplificat. Astfel sistemul de 2 ecuații se transformă într-un sistem neliniar având necunoscutele la puteri naturale, sistem care se rezolvă iterativ pînă la obținerea unei precizii tehnic suficiente. Demn de menționat că, algoritmul de rezolvare adoptat nu conduce la instabilitatea soluției matematice, fapt frecvent în cazul rezolvărilor prin metode clasice. În concluzie, rezolvarea modelului matematic complex bazat pe formula chimică a masei cărbunoase necesită rezolvarea pentru început a modelului simplificat, bazat pe elementele chimice pure care să permită determinarea punctelor în jurul cărora să se efectueze dezvoltările în serii Taylor.

Programul de calcul și schema logică a acestuia sunt prezentate în anexa nr. 3. Prima etapă constă în introducerea datelor inițiale - analiza elementară a cărbunelui, urmată de verificarea corectitudinii introducerii acestora. Analitic, pe baza analizei elementare a cărbunelui se determină formula chimică a macromoleculii, practic - α și β . În continuare, primul bloc de calcul constă în rezolvarea sistemului modelului matematic simplificat, algoritmul constând în reducerea sistemului prin eliminarea succesivă a necunoscutele pînă la un polinom de grad superior cu puteri naturale, care urmează a fi rezolvat prin metoda Newton-Raphson. În continuare, se selectează soluția unică care verifică sistemul, după care se determină succesiv toate necunoscutele sistemului, fiecare dintre acestea fiind corelată cu intervalul de valori posibil în vederea evitării eventualelor erori.

Programul de calcul cuprinde în continuare al doilea bloc de calcul care permite rezolvarea sistemului neliniar format din 10 ecuații cu necunoscutele la puteri naturale și reale. În prima etapă are loc reducerea sistemului, succesiv pînă la un sistem format din 2 ecuații cu 2 necunoscute având puteri funcție de α și β . Pe baza valorilor corespunzătoare ale necunoscutele determinate din modelul simplificat, are

loc, în continuare, dezvoltarea puterilor necunoscutelor în serii Taylor de gradul 2, ceea ce conduce la un sistem cu 2 ecuații cu două necunoscute de gradul 2. Prin iterații succesive se determină cele 2 soluții ale sistemului, adoptându-se soluția unică care verifică sistemul global, ceea ce permite în continuare determinarea succesivă a tuturor necunoscutelor modelului matematic adoptat. Întregul algoritm de calcul este rulat succesiv pentru diferite valori ale parametrilor de operare - temperatură și presiune - astfel determinându-se practic influența parametrilor de gazificare asupra compoziției gazului brut și a mărimilor energetice ale acestuia.

Conform algoritmului anterior prezentat, s-a efectuat modelarea matematică a gazificării în condiții de echilibru pe baza formulei masei cărbunoase obținându-se parametrii de compoziție și energetici ai gazificării cu umiditatea proprie a ligniților de Voivozi, Rovinari și Borozel. Corespunzător lignitului de Voivozi în vederea ilustrării concluziilor oferite de modelul matematic s-a prezentat în figura 7.5 variația compoziției gazului brut funcție de temperatura și presiunea de operare, respectiv în figura 7.6 sunt prezentate variația puterii calorifice inferioare a gazului brut umed respectiv anhidru. Figura 7.7.a prezintă variația consumului specific de cărbune necesar producerii unității de gaz, respectiv figura 7.7.b necesarului excesului specific de umiditate impus de atingerea echilibrelor chimice. În figura 7.8 este prezentată variația necesarului de flux termic furnizat din exterior ca suport al proceselor endoterme specifice gazificării cu umiditatea proprie.

7.1.3. INFLUENȚA PARAMETRILOR DE OPERARE ASUPRA GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

Parametrii de operare, în principal temperatura și presiunea, prin modificarea echilibrelor chimice influențează sensibil compoziția gazului brut și consumurile specifice de cărbune, a excesului de umiditate și a fluxului furnizat din exterior, permițând în ipoteza verificării experimentale a rezultatelor analitice, conducerea proceselor termochimice spre produșii finali doriți.

7.1.3.1. INFLUENȚA TEMPERATURII DE GAZIFICARE

Variația temperaturii are influențe majore asupra parametrilor de compoziție și consum ai gazificării cu umiditate proprie, datorită deplasării echilibrelor chimice, creșterea temperaturii favorizând reacția heterogenă a gazului de apă și reacția Boudouard, respectiv defavorizând reacția de hidrogenare.

a. Creșterea temperaturii determină majorarea accentuată a conținutului de CO și într-o pondere mai redusă a celui de H₂, în detrimentul celui de CO₂ și CH₄. Creșterea într-o pondere accentuată a conținutului de CO este determinată de favorizarea în domeniul temperaturilor ridicate a reacției Boudouard, ceea ce conduce la scăderea ponderii de CO₂ din gazul brut. Având în vedere că, reacția heterogenă de hidrogenare a carbonului este favorizată de nivelele termice relativ scăzute, cu creșterea temperaturii are loc scăderea ponderii de CH₄ implicând majorarea conținutului de H₂ a gazului brut. De remarcat că, prin creșterea temperaturii se constată scăderea sensibilă a ponderii vaporilor de apă conținuți de gazul brut, influențând favorabil eficiența termică a gazificării.

b. Modificarea compoziției gazului brut implică influențe directe asupra puterii calorifice a acestuia. Majorarea temperaturii determină reducerea sensibilă a puterii calorifice a gazului brut anhidru, evidentă în cazul presiunilor ridicate, datorită

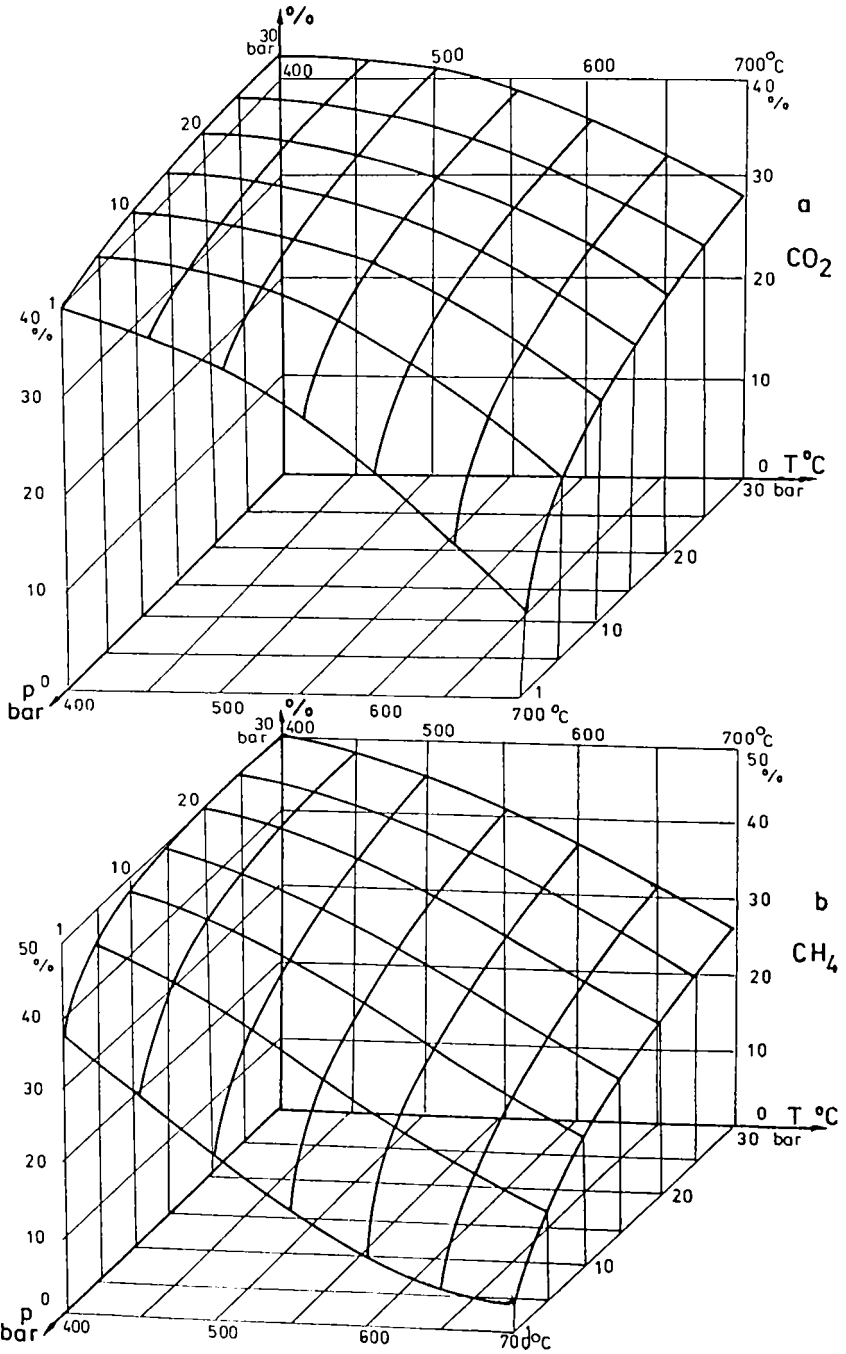


Figura 7.5. Variația compoziției gazului brut anhidru
 a - variația conținutului de CO₂
 b - variația conținutului de CH₄

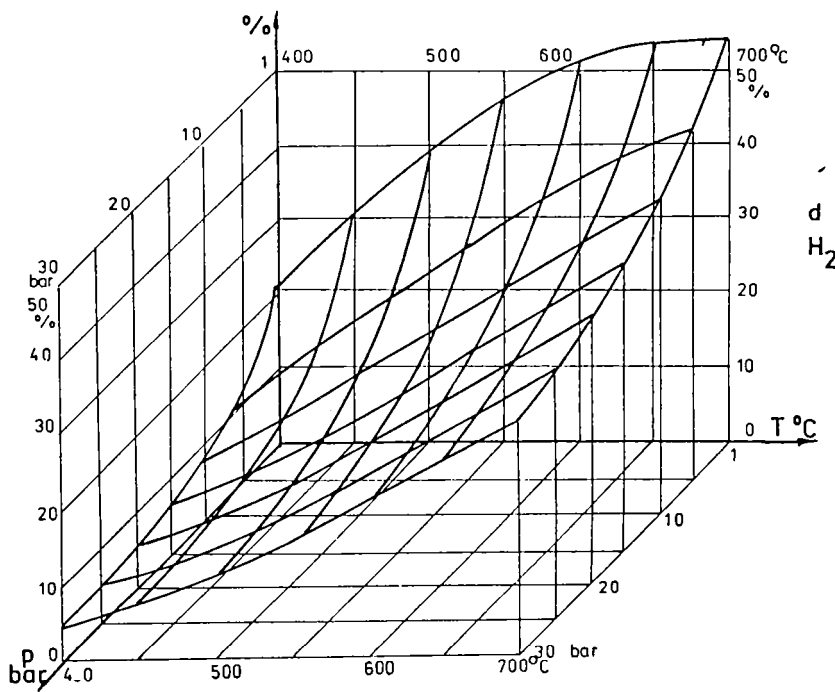
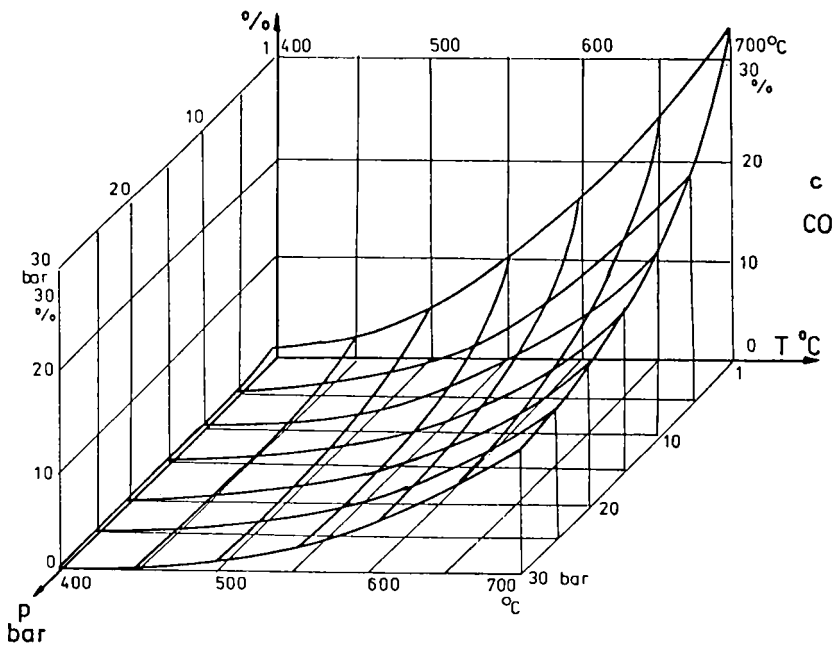


Figura 7.5. Variația compoziției gazului brut anhidru
 c - variația conținutului de CO
 b - variația conținutului de H₂

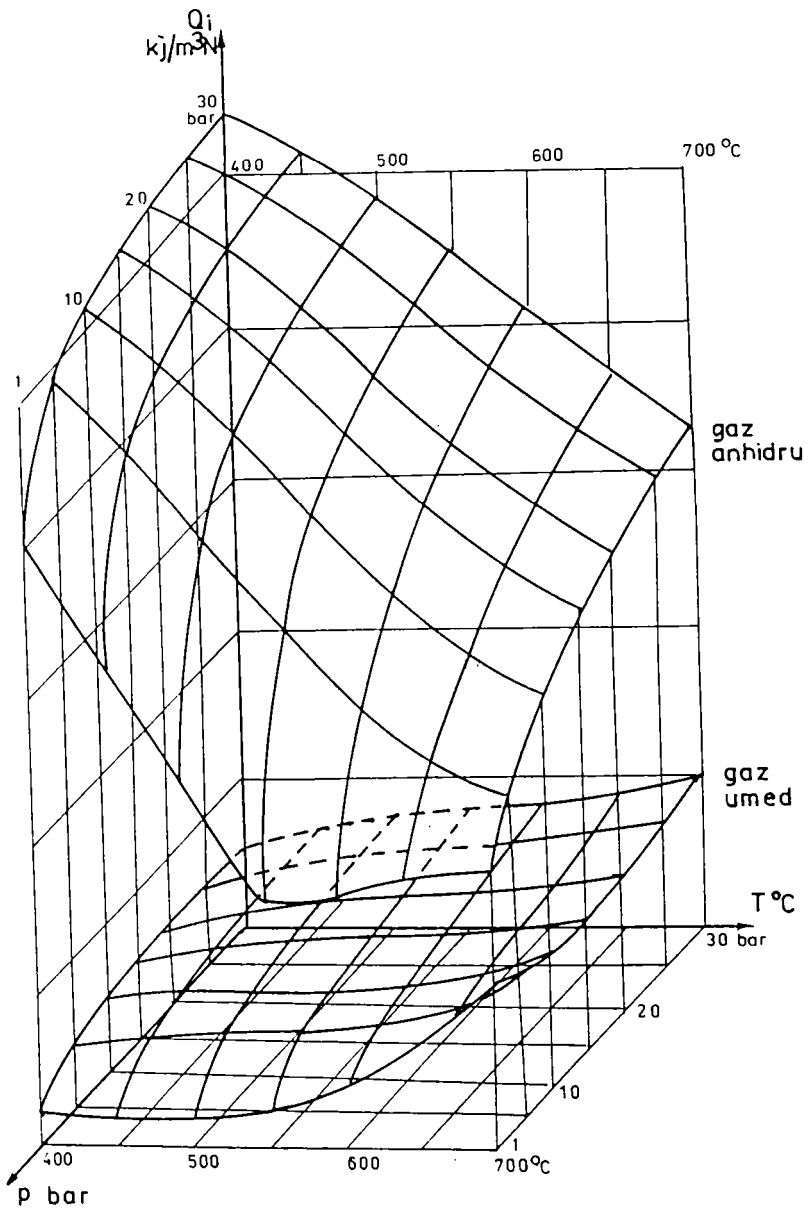


Figura 7.6. Variația puterii calorifice inferioare a gazului brut anhidru, respectiv umed [$\text{kJ/m}^3\text{N}$]

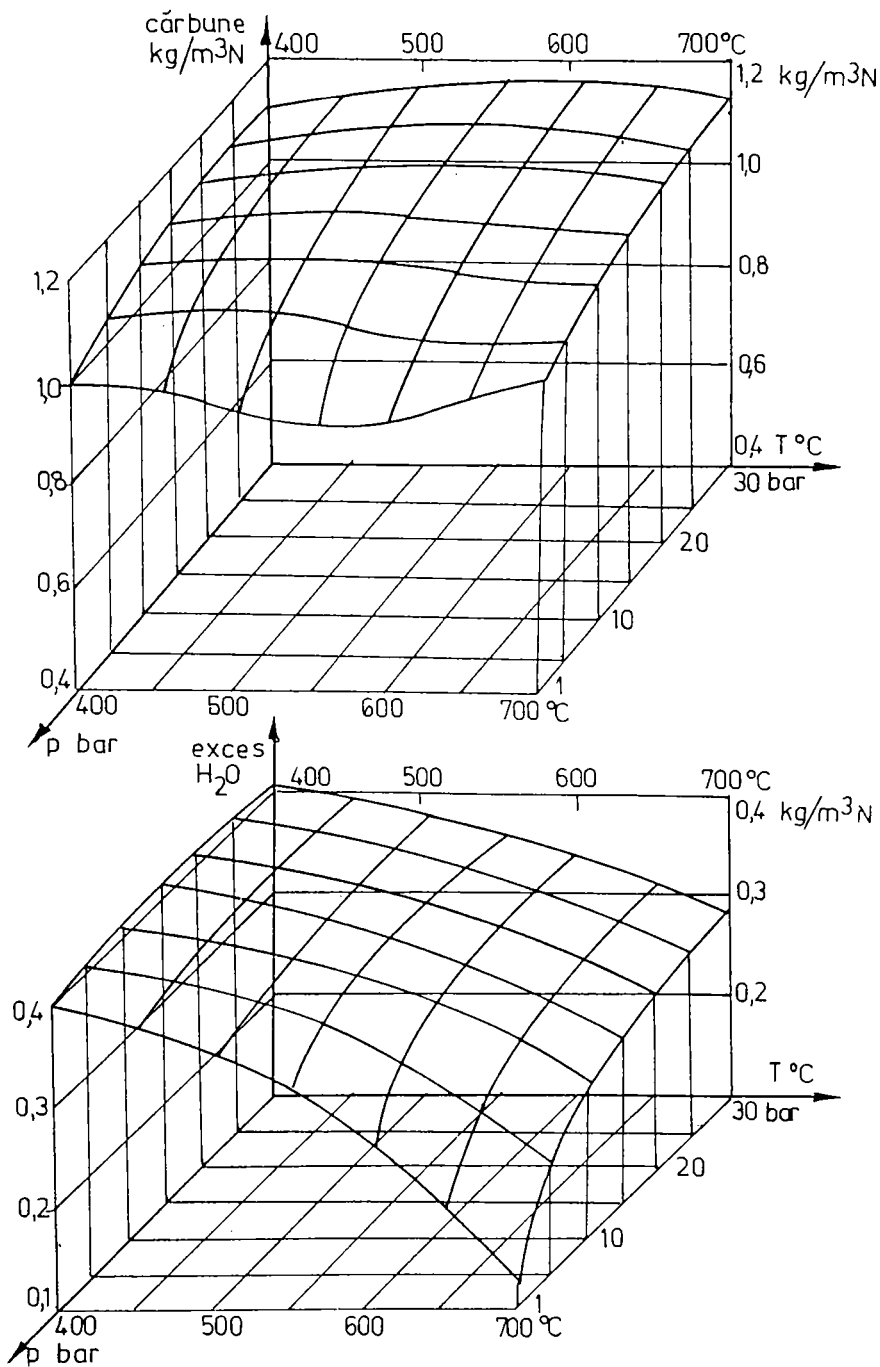


Figura 7.7. Variația consumurilor specifice;
 a - consumul specific de cărbune [$\text{kg/m}^3\text{N}$ gaz anhidru];
 b - consumul specific de exces de umiditate [$\text{kg/m}^3\text{N}$ gaz anhidru]

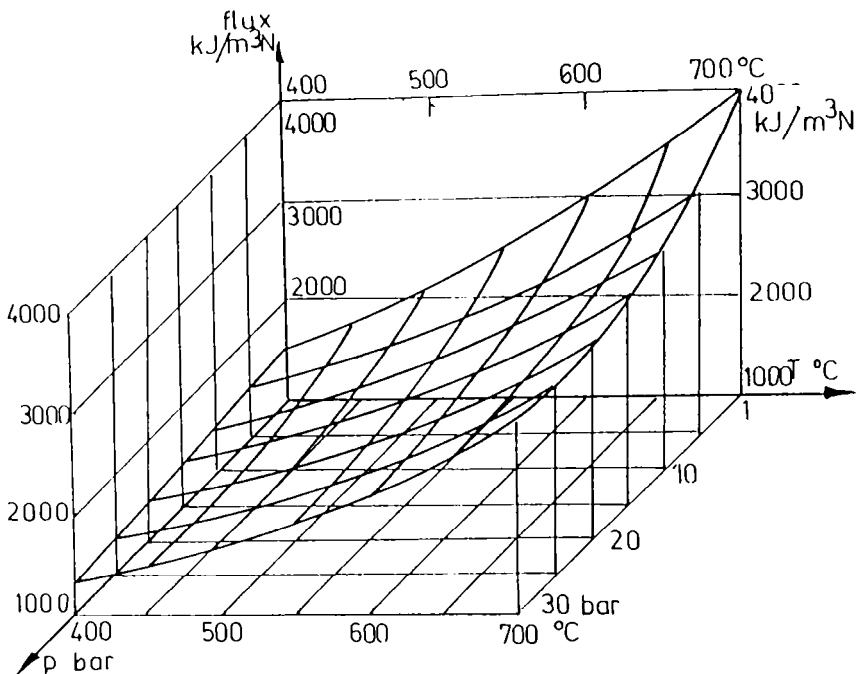


Figura 7.8. Variația necesarului de flux termic furnizat din exterior [kJ/m³N gaz anhidru]

corelării inverse dintre conținutul de metan și temperatură. Referitor la puterea calorică a gazului brut umed, cu creșterea temperaturii se constată o creștere într-o pondere redusă a acesteia, determinată de scăderea cu temperatura a conținutului vaporilor de apă din gazul umed, conducând la majorarea ponderii componentelor combustibile.

c. Consumul specific de cărbune necesar producerii unității de gaz brut este practic constant funcție de temperatură, respectiv corespunzător unității de gaz anhidru consumul specific de cărbune este într-o corelare inversă cu creșterea temperaturii. Scăderea consumului specific de cărbune corespunzător unității de gaz anhidru este practic determinată de reducerea cu temperatura a ponderii vaporilor din gazul brut. La presiune normală, se constată o diminuare redusă a consumului de cărbune, având un minim la valori de 550 - 600 °C, urmată de creșterea acestuia.

d. Referitor la necesarul specific de exces de umiditate se constată scăderea cu temperatura a acestuia, determinată de favorizarea cu temperatura a reacției Boudouard și de defavorizarea reacției de hidrogenare a carbonului. Cu toate că reacția gazului de apă este favorizată de creșterea temperaturii, consumul aburului scade datorită producerii în zona de reacție a acestuia pe baza reacției de reducere a bioxidului de carbon în prezența hidrogenului, reacție accentuată de creșterea temperaturii.

e. Fluxul termic specific furnizat din exterior crește accentuat cu creșterea temperaturii datorită majorării ponderii reacțiilor endoterme în detrimentul reacției slab exoterme de hidrogenare a carbonului. De asemenea, temperaturile ridicate de operare necesită fluxuri sporite pentru asigurarea căldurii sensibile a reactanților.

7.1.3.2. INFLUENȚA PRESIUNII DE GAZIFICARE

Datorită deplasării echilibrelor chimice, variația presiunii influențează parametrii gazificării prin favorizarea, cu majorarea acesteia a reacției de hidrogenare a carbonului și a oxidului de carbon - reacții caracterizate prin scăderea în volum a rezultatelor reacției, respectiv defavorizând reacția Boudouard și reacția gazului de apă.

a. Creșterea presiunii determină majorarea accentuată a conținutului metanului în detrimentul ponderii hidrogenului și a oxidului, respectiv bioxidului de carbon. Conținutul de bioxid de carbon se majorează cu creșterea presiunii la nivele termice ridicate, respectiv se diminuează cu creșterea presiunii în cazul temperaturilor scăzute. De remarcat, majorarea într-o pondere redusă a umidității gazului brut determinată de creșterea presiunii de operare cu efecte negative asupra eficienței termice a gazificării.

b. Influența presiunii de operare asupra compoziției gazului anhidru are implicații și în cazul puterii calorifice, într-o corelare directă cu presiunea, datorită majorării conținutului metanului. Corespunzător gazului umed, puterea calorifică a acestuia este relativ constantă cu presiunea, întrucât majorarea ponderii metanului este în detrimentul celorlalte componente combustibile, remarcându-se totodată creșterea conținutului de umiditate din gazul brut.

c. Creșterea presiunii, în domeniul 1 - 30 bar, determină sporirea într-o pondere de circa 8 - 10 % a consumului specific de cărbune, datorită favorizării reacțiilor cu scăderea volumului produselor gazoase.

d. Variația presiunii nu are efecte semnificative asupra excesului de umiditate al cărbunelui în domeniul temperaturilor scăzute. În domeniul temperaturilor ridicate, consumul specific al umidității se majorează semnificativ cu creșterea presiunii, datorită defavorizării reacției de hidrogenare și creșterii ponderii reacției gazului de apă.

e. Fluxul termic specific furnizat din exterior nu este influențat în mod semnificativ cu creșterea presiunii. În domeniul presiunilor ridicate se constată o diminuare redusă a necesarului de căldură din exterior datorită caracterului slab exoterm al reacției de hidrogenare a carbonului, reacție favorizată de presiunile ridicate.

În vederea evidențierii corectitudinii modelului matematic propus, apare ca necesară compararea datelor experimentale cu cele rezultate în urma calculului analitic.

Corespunzător celor două experimente complete, prezentate în tabelele 6.4 - 6.11, compoziția medie a gazului brut anhidru determinată experimental este: CO^{anh} 22,32 - 22,73 %, CO_2^{anh} 12,72 - 14,92 %, CH_4^{anh} 3,64 - 5,18 %, H_2^{anh} 48,5 - 50,66 %, O_2^{anh} 3,23 - 3,52 % și N_2^{anh} 5,85 - 6,73 %. După cum s-a precizat, prezența oxigenului și azotului în gazul brut se datorează eventualelor neetanșeități la prelevarea probelor de la standul experimental sau la analizorul de gaze, ceea ce implică necesitatea

corijării compoziției gazului prin neglijarea conținutului acestora. În consecință, compoziția corijată a gazului brut anhidru devine: CO^{anh} 24,55 - 25,32 %, CO_2^{anh} 14,17 - 16,41 %, CH_4^{anh} 4,06 - 5,70 % și H_2^{anh} 53,34- 56,45 %. Experiențele s-au efectuat la presiunea atmosferică și într-un domeniu de temperaturi în zona de gazificare cuprins între 680 - 780 °C, corespunzător experimentului nr. 1, respectiv 590 - 680 °C, corespunzător experimentului nr. 2.

Calculule analitice efectuate pe baza modelului matematic indică corespunzător operării la presiune atmosferică și temperatura de 650 °C următoarea compoziție a gazului brut anhidru: CO^{anh} 24,54 %, CO_2^{anh} 15,08 %, CH_4^{anh} 5,86 %, H_2^{anh} 53,36 %, N_2^{anh} 0,66 % și $\text{H}_2\text{S}^{\text{anh}}$ 0,49 %, respectiv în cazul temperaturi de 700 °C compoziția: CO^{anh} 32,58 %, CO_2^{anh} 18,97%, CH_4^{anh} 3,49 %, H_2^{anh} 53,81 %, N_2^{anh} 0,65 % și $\text{H}_2\text{S}^{\text{anh}}$ 0,49 %.

Comparând rezultatele determinărilor experimentale cu cele ale calculului analitic rezultă o concordanță acceptabilă pentru calculele tehnice inginerești datorată faptului că modelul matematic se bazează în principal pe relațiile bilanțului material, consecință a legii conservării maselor. De asemenea, datorită duratei mari de staționare a reactanților, specifică standurilor experimentale de laborator cât și a ponderii ridicate a zonei de gazificare comparativ cu lungimea generatorului, practic în cadrul experiențelor s-a atins o stare cvasistaționară apropiată de echilibru, indicând concordanța cu valorile analitice ale constantelor de echilibru adoptate. Demn de remarcat, decalajul de 50 - 80 °C între temperatura efectivă de operare și cea adoptată pentru datele corespunzătoare ale modelului matematic. Diferența de temperatură corespunzător căreia s-a constatat concordanța datelor experimentale cu cele analitice este rezultatul diferenței dintre reactivitatea chimică a carbonului pur comparativ cu cazul ligniților autohtoni și a semicocsurilor acestora.

În concluzie, modelul matematic care descrie gazificarea ligniților cu umiditatea proprie permite efectuarea cu o precizie satisfăcătoare a calculelor tehnice curente necesare proiectării instalațiilor de gazificarea a cărbunilor, precum și estimarea cu un grad ridicat de concordanță a parametrilor gazului brut necesari analizei utilizării ulterioare a acestuia. Consider că și în cazul real de exploatare a gazogenelor cu umiditate proprie, datorită duratei mari de staționare a cărbunelui în generator estimată, comparativ cu procedeele de gazificare în strat, la 1-3 ore se va atinge o stare cvasistaționară apropiată de echilibru.

CAPITOLUL 8

VARIANTE CONSTRUCTIVE ALE INSTALAȚIEI DE GAZIFICARE A CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

8.1. VARIANTE CONSTRUCTIVE DE GENERATOARE DE GAZIFICARE CU UMIDITATE PROPRIE

Confirmarea experimentală a posibilității gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie coroborată cu analiza datelor furnizate de modelul matematic, precum și avantajele procedurii permit prefigurarea generatorului cât și a instalației globale de gazificare.

Analiza soluțiilor constructive ale generatoarelor specifice diferitelor tehnologii de gazificare a cărbunilor, conform variantelor clasice coroborate cu concluziile rezultate în urma testărilor din cadrul politehnicii din Aachen (R.W.T.H.A.) au permis identificarea principalelor cerințe constructive și funcționale impuse gazogenului cu umiditate proprie. Stadiul actual al cercetării conduce la următoarele cerințe fundamentale ale variantei constructive:

a. STAREA CARACTERISTICĂ A AMESTECULUI REACTANT - GRANULAȚIA CĂRBUNELUI

Sucesiunea fazelor specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie implică cvasiobligatoriu adoptarea variantei gazificării în strat, determinată de următoarele considerente:

- patul fluidizat, respectiv patul antrenat necesită în mod obligatoriu agenți de fluidizare, respectiv de transport pneumatic. Conform variantelor clasice de generatoare, agentul de gazificare amestec de aer, aer îmbogățit sau oxigen cu abur asigură și fluidizarea, respectiv transportul pneumatic al cărbunelui. În cazul gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, în prima etapă a procesului are loc preîncălzirea urmată de uscarea cărbunelui, obținându-se aburul care devine, în stadiile următoare, agentul de gazificare. În consecință, agentul de gazificare, umiditatea proprie nu poate fi utilizată ca agent de transport pneumatic. De remarcat că, patul fluidizat sau antrenat implică utilizarea unui alt agent de transport ceea ce conduce la efecte defavorabile determinate de regăsirea, practic integrală a acestuia între componentele gazului brut. Primele experimentări din cadrul politehnicii din Aachen au adoptat varianta patului fluidizat prin transportul cărbunelui cu bioxid de carbon, care s-a regăsit aproape în totalitate în gazul brut, diminuându-i puterea calorifică. Adoptarea bioxidului de carbon s-a bazat pe considerentul că acesta participă ca adaos de reactant corespunzător reacției Boudouard, de reducere a bioxidului de carbon în prezența carbonului incandescent. Întrucât reacția Boudouard este favorizată de temperaturi ridicate, care nu au fost atinse la operare, ponderea acesteia în sistemul reactant este redusă și în consecință nu se justifică prezența în exces a bioxidului de carbon.

- patul fluidizat, respectiv patul antrenat necesită măcinarea cărbunelui la granulații de maxim 6 - 8 mm, respectiv sub 1 mm. Măcinarea cărbunelui la aceste granulații implică obligativitatea uscării sale, reducându-se în consecință conținutul său de umiditate față de proba inițială. Analiza, pe baza modelului matematic, indică că atingerea echilibrelor chimice solicită introducerea unui exces de umiditate față de cea inițială a cărbunelui. O eventuală preuscare a cărbunelui urmată de introducerea sub formă de abur a excesului de umiditate are efecte defavorabile asupra bilanțului energetic global al procesului anulând avantajele utilizării umidității proprii.

- gazificarea în strat prezintă avantaje deosebite determinate de simplitatea generatorului și a instalațiilor auxiliare. Principal, corespunzător gazificării în strat cu umiditatea proprie, gazogenul este practic un recipient cilindric prevăzut cu: racordul de acces a cărbunelui, respectiv de evacuare a cenușii - realizabile direct din buncărele de serviciu sau prin sisteme cu ecluze duble (obligatorii în cazul gazificării sub presiune), precum și cu racordul de recoitare a gazului brut. Având în vedere caracterul alloterm al procedurii, gazogenul trebuie să fie prevăzut cu suprafețe de transfer termic pentru furnizarea din exterior a fluxului necesar gazificării. De remarcat, simplitatea deosebită a instalațiilor auxiliare necesare preparării cărbunelui și tratării gazului brut, respectiv a subprodușilor rezultați în urma gazificării. Referitor la instalația de preparare a cărbunelui, corespunzător gazificării în strat este necesară doar concasarea, sortarea în game granulometrice restrânse și transportul la buncărul de serviciu al gazogenului. Corespunzător tratării gazului brut, gazificarea în strat necesită desprăfuirea grosieră și fină urmată de răcirea acestuia. De precizat că, în cazul gazificării în strat ponderea particulelor antrenate de gazul brut este net diminuată comparativ cu gazificarea în pat fluidizat sau antrenat, ceea ce conduce la simplificarea instalației de desprăfuire. Funcție de utilizarea ulterioară, indiferent de tehnologia de gazificare adoptată, sunt necesare instalații de purificare, tratare sau separare a diferitelor componente ale gazului brut. De menționat că, ponderea subprodușilor gazificării în strat - ape uzate, gudroane, uleiuri, fenoli, este sensibil majorată comparativ cu celelalte variante tehnologice, ceea ce implică instalații de tratare a apelor uzate relativ complexe. Corespunzător gazificării cu umiditatea proprie, rezultatele experimentale și ale modelului matematic indică faptul că atingerea echilibrelor chimice implică un exces de umiditate, ceea ce permite recircularea în proces a apelor uzate după o prealabilă separare a gudroanelor și uleiurilor, utilizabile drept combustibili lichizi. De asemenea, prin recircularea fenolilor în gazogen are loc descompunerea chimică a acestora, conducând la simplificarea instalației de tratare a apelor uzate.

În concluzie, rezultă avantajele adoptării soluției în strat corespunzătoare gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, ceea ce permite granulații ale cărbunelui în domeniul 10 - 30 mm.

b TRANSPORTUL CĂRBUNELUI

Cvasiobligatoriu, transportul cărbunelui în interiorul gazogenului trebuie realizat mecanic, datorită adoptării variantei gazificării în strat. În principiu, transportul mecanic al cărbunelui se poate realiza fie datorită mișcării de rotație în cuptoare tubulare dispuse înclinat, fie gravitațional în generatoare verticale. Instalațiile de dimensiuni industriale nu se pretează la transportul mecanic prin intermediul șnecurilor elicoidale datorită consumului energetic exagerat și a investițiilor ridicate.

c. TRANSFERUL DE CĂLDURĂ

Caracterul alloterm al gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie implică asigurarea fluxului termic din exterior ceea ce implică dispunerea, preferabil în interiorul generatorului a unui fascicol de țevi scâldate în interior de gaze de ardere. Realizarea unei densități a fluxului termic, raportată la unitatea de volum a generatorului, cât mai mari mare implică adoptarea pentru suprafața de transfer termic a unui fascicol de serpentine elicoidale din țeava. De asemenea, varianta serpentinelor elicoidale aflate în mișcare de rotație față de cărbune asigură atât deplasarea cărbunelui cât și răscolirea stratului evitându-se aglomerarea acestuia.

O posibilă alternativă de obținere a energiei termice, necesare gazificării, se bazează pe fluxul termic generat în urma arderii unei fracțiuni a gazului brut într-un focar industrial, și în consecință instalația globală devine autotermă. În conformitate cu previziunile referitoare la generația a III-a de gazogene, fluxul termic poate fi furnizat din exterior de reactoarele nucleare de temperaturi ridicate prin intermediul unui agent termogen, și în consecință stația de gazificare devine allotermă.

În conformitate cu aceste deziderate, au fost concepute două variante constructive de generatoare de gazificare a cărbunelui cu umiditatea proprie, generatorul rotativ tip tambur - în principiu similar constructiv cuptoarelor sau uscătoarelor rotative utilizate în industria materialelor de construcții, și generatorul în strat cu grătar rotativ.

8.1.2. GENERATORUL ROTATIV TIP TAMBUR

Posibila prefigurare a variantei constructive a gazogenului cu umiditatea proprie poate fi obținută prin combinarea soluției principiale a cuptoarelor sau uscătoarelor rotative tip tambur - utilizate frecvent în industria și instalațiile de uscare a materialelor de construcții - cu un sistem de încălzire interioară indirectă. În principiu, soluția constructivă permite asigurarea cerințelor solicitate de gazificarea cu umiditatea proprie, în speță transportul mecanic al cărbunelui, realizat datorită mișcării de rotație a uscătorului tip tambur și furnizarea fluxului termic necesar proceselor endoterme prin intermediul suprafeței interioare de încălzire. În esență, generatorul rotativ tip tambur este relativ similar cuptorului tubular revolutiv propus în urma cercetărilor din cadrul politehnicii din Aachen / 8.1 /, a cărui testare a confirmat avantajele transportului mecanic al cărbunelui / 8.2, 8.3, 8.4 /.

Generatorul rotativ tip tambur, a fost brevetat / 8.5 /, fiind schematic prezentat în figura 8.1. Generatorul rotativ tip tambur este format dintr-o manta cilindrică protejată în interior de o izolație termorefractară și rezistentă la eroziune mecanică, având dimensiuni estimative - diametru interior 1.000 - 1.500 mm și lungimea de 12 - 15 m - în vederea posibilității prelucrării orare a circa 2 - 3 t cărbune. Tamburul rotativ este dispus înclinat față de orizontală cu 2-5 °, fiind prevăzut în exterior cu căile de rulare și coroana dințată de antrenare. Mișcarea de rotație combinată cu efectul dispunerii înclinate a generatorului, precum și șicanele elicoidale montate în interiorul mantalei cilindrice, determină transportul mecanic al cărbunelui. În interior, în vederea furnizării fluxului termic necesar gazificării, generatorul este prevăzut cu 4-6 serpentine elicoidale fixe, din țeavă, prin interiorul cărora circulă gazele de ardere având temperaturi de intrare de 800 - 850 °C, în contracurent față de combustibilul solid. Forma elicoidală a suprafeței de transfer termic a fost adoptată în vederea majorării căldurii cedate pe unitatea de lungime a generatorului și implicit a sporirii suprafeței de schimb termic. De asemenea, forma elicoidală asigură, datorită mișcării relative față de cărbune un debit relativ constant al transportului mecanic, evitându-se totodată aglomerarea bulgărilor de cărbune.

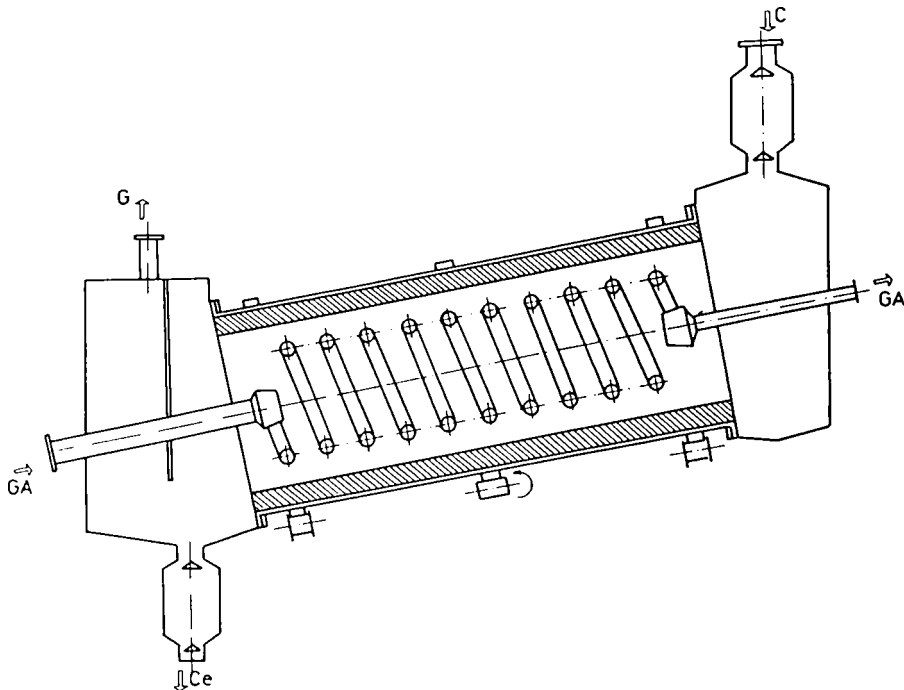


Figura 8.1. Generator cu umiditate proprie rotativ tip tambur
 C - cărbune. Ce - cenușă; G - gaz de gazogen; GA - gaze de ardere

La partea anterioară, generatorul este prevăzut cu camera de alimentare a cărbunelui precum și cu colectorul gazelor de ardere, care datorită temperaturilor relativ ridicate sunt dirijate spre un recuperator de căldură. Camera de alimentare a cărbunelui este dotată cu un sistem de închidere cu ecluză dublă, în vederea izolării generatorului față de mediul ambiant. Generatorul este prevăzut la partea posterioară cu camera de colectare a cenușii și a gazului brut, precum și cu distribuitorul agentului termogen primar în serpentinele schimbătoare de căldură. La bază, camera posterioară este prevăzută cu ecluza dublă de evacuare a cenușii, respectiv la partea transversale care permit desprăfuirea grosieră a gazului brut. Atât camera de alimentare a cărbunelui, cât și cea de evacuare a produselor gazificării sunt etanșate față de mantaua cilindrică prin garnituri realizabile din șnur de azbest grafitat și sistemele aferente presgarniturilor. Etanșarea prin sistemul presgarniturilor permite dilatarea liniară a mantalei evitându-se tensiunile determinate de solicitarea termică.

În vederea furnizării fluxului termic necesar proceselor endoterme de gazificare cu umiditate proprie, generatorul este racordat la un focar industrial care furnizează agentul termogen primar, gaze de ardere la temperaturi de 800-850 °C, eventual obținute prin arderea unei fracțiuni a gazului brut produs. În vederea asigurării necesarului termic la amorsarea instalației, focarul industrial este dotat cu arzătoare funcționând cu combustibil lichid care în timpul funcționării, poate servi la arderea gudroanelor și a subprodusilor secundari rezultați în urma gazificării, conducând la reducerea consumului combustibilului gazos.

Cărbunele, având granulația de 10 - 30 mm este introdus în generator prin camera anterioară fiind transportat mecanic datorită mișcării de rotație și fiind

succesiv preîncălzit, uscat și devolatilizat. Finalul devolatilizării în domeniul 350-400 °C se suprapune cu debutul gazificării cu umiditatea proprie. Semicocsul rezultat în diferite faze de cocsificare este gazificat la temperaturi de până la 600-700 °C și presiuni normale utilizând ca agent de gazificare, aburul rezultat în urma vaporizării umidității proprii și a celei introduse în exces. Procesele endoterme se desfășoară pe baza fluxului termic cedat de gazele de ardere prin intermediul suprafețelor elicoidale.

Generatorul rotativ tip tambur permite, în condițiile de economicitate specifice procedeului cu umiditate proprie, o flexibilitate ridicată datorată modificării facile a parametrilor de operare, fiind caracterizat prin simplitate constructivă. Astfel, modificarea turației generatorului determină variația corespunzătoare a debitului cărbunelui, respectiv modificarea temperaturii agentului termogen permite obținerea parametrilor doriți de exploatare. Principalele limite ale generatorului sunt determinate de presiunea normală de operare, datorită dificultăților implicate de sistemul de etanșare, în cazul majorării presiunii și de temperatura ridicată a gazului brut la recoltarea din generator, datorată circulației în echicurent a reactanților. Recuperarea unei fracțiuni din căldura sensibilă a gazului brut și a gazelor de ardere evacuate din generator în cadrul procesului este posibilă prin preîncălzirea aerului de combustie și/sau a aerului de diluție necesar focarului industrial.

8.1.3. GENERATORUL CU GRĂTAR ROTATIV

Soluția constructivă a generatorului de gazificare a cărbunilor în strat, cu grătar rotativ, varianta Lurgi, poate conduce la prefigurarea gazogenului cu umiditate proprie. Generatorul Lurgi este caracterizat prin caracterul autoterm al procedeului și circulația reactanților în contracurent. Întrucât, gazificarea cu umiditatea proprie este un procedeu alloterm, din generatorul Lurgi trebuie eliminată zona de combustie, a cărei rol de furnizare a fluxului termic este preluat de un sistem de încălzire interioară. Față de circulația în contracurent a reactanților, specifică gazogenului Lurgi, prin utilizarea ca agent de gazificare a aburului rezultat în urma vaporizării umidității cărbunelui, are loc circulația în echicurent a reactanților. Pe de altă parte, generatorul utilizând umiditatea proprie este similar generatorului în strat de tip invers, actualmente rar utilizat. Modificarea gazogenului de tip invers constă în renunțarea la zona de ardere și înlocuirea efectului acestia cu un sistem de încălzire / 8.6, 8.7/.

Generatorul cu grătar rotativ bazat pe gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie este schematic prezentat în figura 8.2 / 8.8 /. Practic, generatorul este un recipient cilindric vertical având diametrul interior estimativ de 1.500 - 2.000 mm și înălțimea de 3.500 - 4.500 mm. Mantaua cilindrică cuprinde în interior o manta tronconică, având în partea superioară baza mică, asamblate etanș prin intermediul unei coroane circulare de mantaua exterioară, respectiv la bază fiind liberă, eventual rigidizată cu nervuri. Geometria mantalei interioare - similare variantei constructive a generatorului Kohlegas-Nordrhein - a fost adoptată în vederea posibilității colectării gazului brut din zona inferioară a generatorului, care în urma mișcării ascendente furnizează parte din căldura sa sensibilă stratului de cărbune adiacent. De asemenea, forma tronconică permite evitarea aglomerării bulgărilor de cărbune, asigurându-se permeabilitatea necesară a stratului. La partea inferioară, în interior, generatorul este prevăzut cu un grătar rotativ care în zona centrală conține distribuitorul agentului termogen care furnizează energia termică necesară gazificării. De asemenea, în interior este dispus un fascicol de serpentine elicoidale din țevă racordate la baza la distribuitor, respectiv în partea superioară la colectorul de gaze arse. Mișcarea de rotație a grătarului rotativ și implicit a sistemului de serpentine interioare este asigurată, din exterior prin intermediul unui grup motoreductor, transmisia realizându-se prin intermediul unui angrenaj dintat dispus în interiorul generatorului. Practic, la

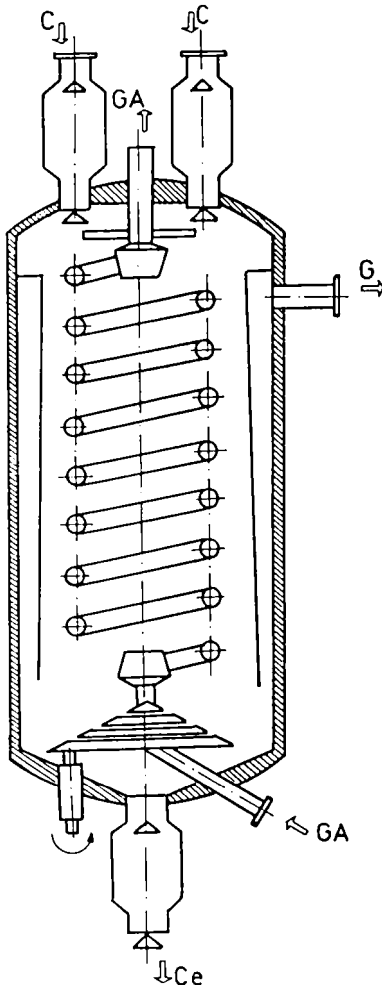


Figura 8.2 Generator cu umiditate proprie
cu grătar rotativ
C - cărbune; Ce - cenușă;
G - gaz de generator; GA - gaze de ardere

baza grătarului este prevăzută o roată dințată din partea interioară antrenată de roata dințată motoare. Adoptarea geometriei elicoidale determinată de necesitatea majorării suprafeței de transfer termic și implicit a fluxului termic pe unitatea de înălțime a generatorului, conduce datorită mișcării sale de rotație la facilitarea transportului cărbunelui, evitându-se aglomerarea sa. În partea superioară, sistemul de încălzire rotativ antrenează un agitator care determină distribuția relativ uniformă a cărbunelui în secțiunea transversală a generatorului.

Generatorul este prevăzut în partea superioară cu racordurile de alimentare ale cărbunelui, prin intermediul unor buncăre de serviciu, cu sisteme cu ecluze duble și cu racordul de evacuare a gazelor de ardere. Racordul de colectare al gazului brut este amplasat pe suprafața laterală, superioară a mantalei, permițând prelevarea gazului brut din zona inferioară a generatorului prin spațiul tubular cuprins între mantaua interioară și cea exterioară. La baza, generatorul este prevăzut cu camera de evacuare a cenușii prin intermediul unui sistem cu ecluză dublă.

Similar generatorului rotativ tip tambur, fluxul termic necesar gazificării este furnizat din exterior prin arderea unei fracțiuni a gazului brut produs într-un focar indus ri l.

Cărbunele cu granulația de 10 - 30 mm intră în generator prin partea superioară a acestuia deplasându-se descendent sub acțiunea forțelor gravitaționale, fiind succesiv preîncălzit, uscat și devolatilizat. Finalul devolatilizării

în domeniul 350-400 °C se suprapune cu debutul gazificării cu umiditatea proprie. Semicocsul rezultat în diferite faze de cocsificare este gazificat cu aburul rezultat în urma vaporizării umidității proprii a cărbunelui, pe baza fluxului termic furnizat din exterior. Gazificarea se desfășoară la temperaturi de până la 600 - 700 °C și presiuni variind între cea normală și 20 - 35 bar, posibile datorită soluției constructive similare generatorului Lurgi. De menționat că, nivelul termic relativ redus de operare combinat cu presiunile medii favorizează reacția de metanare, fiind previzibilă obținerea unui gaz brut cu conținut sporit de metan, utilizabil după o tratare ulterioară ca substitut de gaze naturale. Referitor la productivitatea specifică a generatorului, ea poate fi estimată la valori similare generatorului Lurgi, variind între

550 - 750 kg/m² h obținută practic la gazificarea în strat a ligniților autohtoni și 3.500 - 4.500 kg/m² h caracteristice variantelor Lurgi Mark IV și Mark V, condiționată în principal de cinetica proceselor termochimice și de transferul termic în stratul de cărbune.

Generatorul cu gratar rotativ pare soluția constructivă cea mai indicată în cazul gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, în ipoteza rezolvării problemelor legate de stabilirea parametrilor funcționali optimi - temperatură, presiune, granulație - corelați cu cinetica proceselor endoterme specifice și transferul de căldură. Generatorul cu gratar rotativ permite combinarea avantajelor proprii gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, cu cele specifice procedeele de gazificare în strat. De asemenea, sunt eliminate principalele dezavantaje ale generatorului rotativ tip tambur permițând presiuni medii de operare și posibilitatea recuperării direct în reactor a unei fracțiuni a căldurii sensibile a gazului brut.

Variantele constructive anterioare nu prezintă dificultăți previzibile la proiectare și realizare, întrucât soluțiile indicate se bazează pe rezolvări tehnice curente în construcția uscătoarelor rotative tip tambur, respectiv a generatoarelor de gazificare în strat. Supozițiile teoretice prezentate trebuie confirmate de date experimentale complexe, viabilitatea variantelor propuse necesitând confirmarea pe piloti de dimensiuni reduse.

8.2. STAȚIA COMPLEXĂ DE GAZIFICARE A CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

Instalația complexă de gazificare trebuie să asigure, pe lângă gazificarea ligniților autohtoni cu umiditatea proprie și pregătirea combustibilului precum și tratarea gazului brut și îndepărtarea - eventual refolosirea reziduurilor: cenușă, gudroane, uleiuri și ape fenolice.

Având în vedere că gazificarea cu umiditatea proprie este un procedeu alloterm, instalația complexă de gazificare trebuie să cuprindă instalația de ardere a unei fracțiuni a gazului brut produs, în vederea furnizării fluxului termic necesar proceselor endoterme. De asemenea, pentru majorarea eficienței termice a stației de gazificare sunt necesare recuperatoare de căldură ale unei fracțiuni a căldurii sensibile a gazului de gazogen, respectiv ale gazelor de ardere în vederea preîncălzirii aerului de combustie și a celui de diluție.

Instalația complexă de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este principal prezentată în figura 8.3 / 8.9 /.

Gospodăria de combustibil trebuie, în principiu să asigure stocarea cantității curente de cărbune precum și pregătirea acestuia conform cerințelor granulometrice ale generatorului. În consecință, gospodăria de cărbune este alcătuită din rampe, buncăre de alimentare ale instalației de concasare - sortare și buncărele finale de stocare ale combustibilului sortat, racordate între ele - conform fluxului tehnologic - prin benzi transportoare și elevatoare. De menționat că, spre deosebire de utilizarea clasică prin ardere a ligniților autohtoni, nu este necesară uscarea acestora, umiditatea proprie a cărbunelui constituind agentul de gazificare. În vederea atingerii condițiilor de echilibru chimic, modelul matematic al gazificării indică necesitatea asigurării unui exces de umiditate, comparativ cu cea a probei inițiale, ceea ce implică umezirea cărbunelui, eventual cu o fracțiune a apei uzate colectate, după o prealabilă separare a gudroanelor și uleiurilor, utilizabile drept combustibili lichizi.

Pentru gazogen poate fi adoptată fie varianta constructivă a generatorului rotativ tip tambur, fie cea a generatorului cu gratar rotativ, anterior prezentate.

Instalația de tratare a gazului brut trebuie să asigure desprăfuirea, răcirea și eliminarea subprodusilor secundari condensabili. Gazul brut recoltat la presiunea și

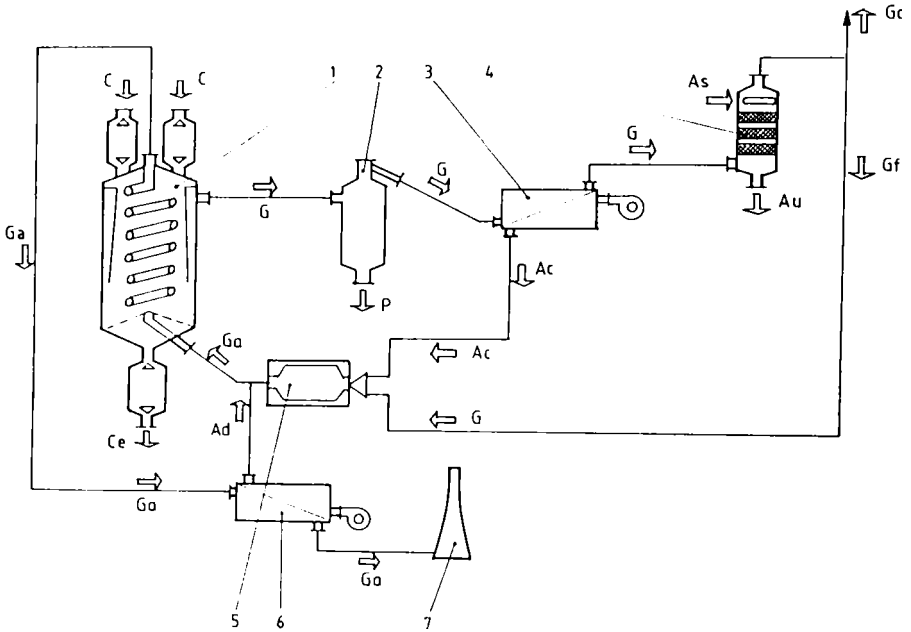


Figura 8.3 Stație complexă de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie
 1 - gazogen cu umiditate proprie; 2 - ciclon; 3 - preîncălzitor aer combustie; 4 - scrubber;
 5 - focar ciclon; 6 - preîncălzitor aer diluție; 7 - coș fum
 Ac - aer combustie; As - apă de spălare; Au - apă uzată; C - cărbune; Ce - cenușă;
 G - gaz de gazogen; Ga - gaze de ardere; Gc - gaz de gazogen spre consumator;
 Gf - gaz de gazogen spre focar; P - praf

temperatura de operare prin intermediul racordului gazogenului (1) este succesiv desprăfuit grosier într-o stație de multicicloane (2) și răcit prin intermediul unui recuperator de căldură (3), în vederea preîncălzirii aerului de diluție utilizat de focarul industrial (5). Gazul brut, parțial desprăfuit și răcit, este desprăfuit fin prin spălare într-o instalație de scrubere (4), apa uzată conținând gudroane, uleiuri și fenoli, urmând a fi colectată într-un rezervor după care urmează a fi tratată și recirculată. În cazul cărbunilor cu conținut ridicat de sulf este necesară, eventuala tratare a gazului în vederea eliminării hidrogenului sulfurat, pentru reducerea impactului compușilor acestuia asupra agregatelor ulterioare și a mediului ambiant. De precizat că, purificarea gazului de gazogen de hidrogen sulfurat este net mai facilă comparativ cu eliminarea compușilor sulfului din gazele de ardere, întrucât SO_2 sau SO_3 se rețin relativ dificil pe calcar sau dolomită. Corespunzător hidrogenului sulfurat conținut de gazul brut, prin procedeele Claus este posibilă recuperarea sulfurului, materie primă utilizabilă în industria chimică. În urma obținerii gradului de desprăfuire și purificare dorit, gazul brut este distribuit consumatorilor, transportul acestuia fiind asigurat fie prin intermediul unei stații de compresoare - în cazul gazificării la presiune normală, fie datorită presiunii de recoltare din generator, în cazul operării sub presiune. De remarcat că, este necesară prelevarea unei fracțiuni din gazul brut produs (după o destindere prealabilă la presiunea ambiantă în cazul operării sub presiune) în vederea furnizării suportului termic al proceselor endoterme de gazificare, prin arderea acestuia în instalația de ardere.

Instalația de ardere cuprinde focarul ciclon (5) care se pretează cel mai bine la arderea combustibililor gazoși inferiori, datorită posibilității asigurării omogenității

amestecului combustibilului cu aerul necesar arderii - determinată de gradul ridicat de turbulență din interior - și a stabilității arderii - determinată de radiația învelișului incandescent termorezistent asupra amestecului carburant proaspăt (vezi 3.8.1).

Majorarea eficienței termice a stației de gazificare implică recuperarea unei fracțiuni din căldura sensibilă a gazului brut după desprăfuirea grosieră a acestuia, respectiv a gazelor de ardere după ieșirea acestora din gazogen. Recuperarea căldurii sensibile a gazului brut se face prin intermediul unui schimbător de căldură (3) în vederea preîncălzirii aerului de combustie necesar arderii în focarul ciclon. Întrucât la ieșirea din focarul ciclon, gazele de ardere au o temperatură ridicată, net peste cea impusă de gazificarea cu umiditatea proprie, este necesară diluția gazelor de ardere după care acestea acced în gazogen.

În urma transferului termic util, care constituie suportul proceselor de gazificare, gazele de ardere părăsesc gazogenul la temperaturi relativ ridicate. În consecință, în vederea recuperării unei fracțiuni din căldura sensibilă a acestora și a recirculării în proces a acestui flux, apare ca rațională amplasarea unui recuperator (6), care permite preîncălzirea aerului de diluție utilizat în focarul ciclon. În urma răcirii, gazele de ardere sunt evacuate la coșul de fum (7).

Subprodusul secundari - colectați într-un rezervor - sunt separați prin decantare, gudroanele și uleiurile putând fi utilizate drept combustibil lichid, iar apele fenolice urmând a fi tratate în stația de epurare. Apele uzate, astfel tratate sunt recirculate în proces - atât la instalația de scrubere cât și ca exces de umiditate necesar gazificării, fenolii urmând a fi descompuși termic în gazogen. De menționat, rezultatele încurajatoare ale utilizării gudroanelor și uleiurilor în amestec cu păcură - 50 %, obținându-se un combustibil lichid cu puteri calorifice de 32.000 - 33.600 kJ/m³N. Cenușa rezultată în urma gazificării este transportată în depozitul de serviciu urmând a fi evacuată în haldă.

CAPITOLUL 9

ANALIZA TEORETICĂ ȘI EXPERIMENTALĂ A ARDERII COMBUSTIBILILOR GAZOȘI INFERIORI

GENERALITĂȚI

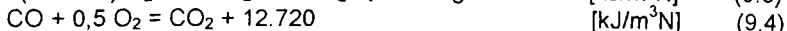
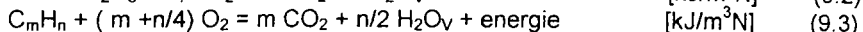
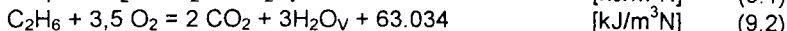
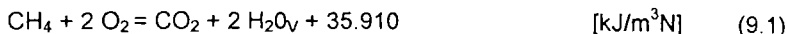
Sinteza stadiului actual al dezvoltării tehnologiilor de gazificare indică faptul, că cu excepția câtorva dintre ele, aflate în stadiu comercial, marea majoritate a procedeelor sunt la nivel de piloți demonstrativi sau de dimensiuni cvasiindustriale. În marea lor majoritate instalațiile de gazificare a cărbunilor sunt utilizate în vederea producerii de materie primă pentru industria chimică sau a sintezei de hidrocarburi. Utilizările energetice sunt relativ reduse datorită prețului actual al combustibilului gazos produs, actualmente necompetitiv cu hidrocarburile naturale. Mențiune aparte merită centralele termoelectrice de la Lunen având puterea instalată de 170 MW, respectiv Barstow de 90 MW, bazate pe gazificarea cărbunilor și ciclul mixt. De o importanță deosebită, o constituie centrala termoelectrică de la Puertollano - Spania, bazată pe gazificarea a 2.500 t cărbune zilnic și având o putere instalată de 320 MW pe baza ciclului mixt al aburului și gazelor de ardere. Proiectul intră în exploatare în 1998, fiind rezultatul colaborării dintre Krup - Koppers care a pus la dispoziție generatoarele în pat antrenat Prenflo și Babcock care contribuie cu agregatele energetice.

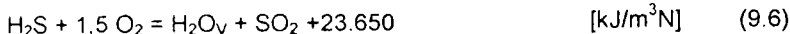
În consecință, apare ca necesară analiza posibilităților utilizării energetice a gazului brut rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditate proprie, comparativ cu gazele naturale și cu gazul de gazogen, conform testelor autohtone de gazificare în strat. Analiza comportării energetice a combustibilului gazos implică atât analiza bilanțului material și termic al arderii cât și analiza cineticii și a condițiilor de stabilitate ale arderii.

9.1. BILANȚUL MATERIAL ȘI TERMIC AL ARDERII COMBUSTIBILILOR GAZOȘI INFERIORI

Calculul proceselor de ardere, constând în oxidarea exotermă a combustibilului, este fundamentat pe ecuațiile reacțiilor chimice de oxidare - în condiții de stoichiometrie - a componentelor combustibile. Ecuațiile reacțiilor chimice, considerate global, fără a pune în evidență mecanismul complex al procesului de oxidare, permite evaluarea bilanțului material și termic al arderii.

Considerând cazul general al combustibilului gazos - caracterizat prin participațiile volumice ale componentelor - rezultă ecuațiile reacțiilor chimice de oxidare a componentelor combustibile, prezentate împreună cu efectele lor termice:





Bilanțul material al arderii, reprezintă un caz particular al legii conservării maselor, constând în egalitatea dintre suma maselor reactanților și cea a produselor reacțiilor de oxidare specifice arderii. Pe baza bilanțului material al arderii se determină, pe de-o parte cantitatea minimă de oxigen necesară arderii stoichiometrice a unității volumice de combustibil:

$$O_{\min} = 2 (\text{CH}_4)_c + 3,5 (\text{C}_2\text{H}_6)_c + (m + n/4) (\text{C}_m\text{H}_n)_c + 0,5 (\text{CO})_c + 0,5 (\text{H}_2) + 1,5 (\text{H}_2\text{S})_c - (\text{O}_2)_c \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.7)$$

respectiv a cantității reale de aer în cazul arderii în exces:

$$L = \lambda \cdot O_{\min} / 0,21 \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.8)$$

De asemenea, bilanțul material al arderii permite determinarea cantității produselor arderii, în ipoteza arderii complete în exces de aer a unității volumice de combustibil gazos:

$$V_{\text{CO}_2} = (\text{CH}_4)_c + 2 (\text{C}_2\text{H}_6)_c + m (\text{C}_m\text{H}_n)_c + (\text{CO})_c + (\text{CO}_2)_c \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.9)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}} = 2 (\text{CH}_4)_c + 3 (\text{C}_2\text{H}_6)_c + n/2 (\text{C}_m\text{H}_n)_c + (\text{H}_2)_c + (\text{H}_2\text{S})_c \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.10)$$

$$V_{\text{SO}_2} = (\text{H}_2\text{S})_c \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.11)$$

$$V_{\text{O}_2} = (\lambda - 1) O_{\min} \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.12)$$

$$V_{\text{N}_2} = (\text{N}_2)_c + 0,79 L \quad [\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}] \quad (9.13)$$

Bazat pe legea conservării energiei, bilanțul termic al arderii reprezintă egalitatea dintre suma energiilor intrate sau generate în procesul arderii și suma fluxurilor utile și a pierderilor specifice. Analiza parametrilor de stare permite divizarea teoretică a proceselor termice complexe din focare: în arderea adiabatică, rezultând gaze de ardere cu o temperatură teoretică, urmată de transferul de căldură către sistemul radiant.

În consecință, rezultă temperatura teoretică de ardere ținând cont de aporturile termice ale combustibilului - căldura chimică și sensibilă, și ale aerului de combustie - căldura sensibilă a aerului preîncălzit și a aerului rece pătruns prin neetanșeitățile focarului, precum și pierderile specifice determinate de arderea incompletă din punct de vedere chimic, în conformitate cu relația:

$$t_0 = [Q_i (1 - q_3) + (C_c t_c + \lambda_f L_{\min} C_{pap} t_{ap} + \Delta\lambda_f L_{\min} C_{par} t_{ar})] / V_g C_{pg} \quad [^\circ\text{C}] \quad (9.14)$$

Datorită temperaturilor ridicate ale arderii apare fenomenul de disociere al gazelor rezultate ale arderii la temperaturi de circa 1500 °C. Influențe sensibile se constată la temperaturi de peste 1700 °C, datorită faptului că gradul de disociere al CO₂ este de 1,5 %, respectiv al vaporilor de apă de circa 0,5 %. Ținând cont de cantitatea de căldură consumată de reacțiile endoterme de disociere, având valori relative de circa 2,5 % la 1700 °C, respectiv de circa 7,0 % la 2000 °C, temperatura teoretică de ardere trebuie diminuată corespunzător, funcție de domeniul de temperaturi.

Principalele elemente ale bilanțului material și energetic al arderii gazului combustibil rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie sunt prezentate în tabelul 9.1. Comparativ sunt redate elementele similare în cazul arderii metanului pur, a gazelor naturale de Ardeal și a gazului de gazogen rezultat în urma gazificării ligniților autohtoni cu amestec de aer cu abur la presiune normală și sub presiune, precum și în cazul gazului brut de gazogen obținut prin gazificarea cărbunelui brun de Rin cu amestec de aer sau oxigen cu abur, conform tehnologiei Lurgi

Nr. crt.	Parametri	U.M.	Metan	Gaze naturale	Gazificare în strat				Gazificare umiditate proprie
					Aer		Lurji		
					Pres. norm.	Sub pres.	Aer	Oxygen	
1.	Compoziție CH ₄ ^{anh}	%	100	98,51	3,2	1,4	7,03	11,0	11,86
3.	CO ^{anh}	%		--	23,5	21,7	13,75	21,5	14,32
4.	H ₂ ^{anh}	%		--	12,8	17,7	24,3	38	39,98
5.	CO ₂ ^{anh}	%		--	9,3	6,2	18,36	28,5	16,26
6.	O ₂ ^{anh}	%		0,15	0,2	1,5	--	--	5,09
7.	N ₂ ^{anh}	%		0,54	50,7	51,5	35,56	--	12,49
8.	H ₂ S ^{anh}	%		--	0,3	--	1,0	1,0	--
9.	Putere calorifică inferioară	kJ/m ³ N	35.910	36.122	5.592	5.175	7.134	11.025	10.398
10.	Oxygenul minim	m ³ N/m ³ N	2,0	2,01	0,25	0,25	0,35	0,53	0,46
12.	Aer combustie λ = 1,05	m ³ N/m ³ N	10,00	10,04	1,24	1,05	1,73	2,66	2,29
13.	λ = 1,1	m ³ N/m ³ N	10,04	10,52	1,30	1,1	1,81	2,79	2,40
15.	Gaze de ardere CO ₂	m ³ N/m ³ N	1,0	1,01	0,36	0,29	0,39	0,61	0,42
16.	H ₂ O	m ³ N/m ³ N	2,00	2,00	0,19	0,21	0,39	0,61	0,52
18.	N ₂ λ = 1,05	m ³ N/m ³ N	7,90	7,94	1,49	1,34	1,72	2,10	1,93
19.	N ₂ λ = 1,1	m ³ N/m ³ N	8,28	8,31	1,53	1,38	1,79	2,20	2,01
21.	O ₂ λ = 1,05	m ³ N/m ³ N	0,10	0,10	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03
22.	O ₂ λ = 1,1	m ³ N/m ³ N	0,20	0,20	0,02	0,02	0,03	0,05	0,05
24.	SO ₂	m ³ N/m ³ N	--	--	0,003	--	0,01	0,01	--
26.	Volum gaze arse λ = 1,05	m ³ N/m ³ N	11,00	11,05	2,06	1,85	2,53	3,36	2,82
27.	λ = 1,10	m ³ N/m ³ N	11,22	11,25	2,09	1,87	2,57	3,43	2,85
29.	Entalpia teoretică de ardere	kJ/m ³ N	36.173	36.386	5.647	5.225	7.202	1.115	10.478,8
30.	Entalpia specifică	kJ/m ³ N	3.437	3.443	2.827	2.898	2.938	3.438	3.758,7
31.	Temperatura teoretică ardere	°C	2.058	2.061	1.692	1.740	1.741	1.962	2.166,3
32.	Limita inferioară	%	5,3	5,28	17,84	5,53	11,65	7,45	7,40
33.	Limita superioară	%	13,9	13,85	55,22	64,44	45,18	44,82	41,69
34.	Viteza normală front flacără	cm/s	37	29,48	34,01	45,81	53,02	89,30	120,20

Tabelul 9.1 Caracteristicile de compoziție și energetice ale arderii metanului, gazelor naturale și gazului de gazogen

Analiza elementelor bilanțului termic indică valori ale temperaturii teoretice de ardere în condițiile arderii perfecte, sensibil mai mari în cazul gazului rezultat prin gazificarea cărbunilor cu umiditate proprie - 2166 °C - comparativ cu metanul pur - 2058 °C - sau gazele naturale de Ardeal - 2061 °C, în condițiile unui conținut de componente combustibile și a unei puteri calorifice sensibil mai reduse. Explicația consta în reducerea netă a cantității aerului de combustie și implicit a componentelor inerte din gazele de ardere, în principal azotul, corespunzător gazului rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, comparativ cu metanul sau gazele naturale de Ardeal. De menționat, că pe lângă temperatura teoretică de ardere superioară, gazele de ardere au un conținut majorat de componente triatomice - $r_{CO_2+r_{H_2O}} = 33\%$, ceea ce conduce la mărirea factorului de emisie al acestora în focare cu circa 8-9 %.

În concluzie, pe baza considerentelor furnizate de transferul termic prin radiație în focarul agregatelor de cazane, rezultă comportarea avantajoasă a combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, determinate de valori sporite ale temperaturii teoretice de ardere și a factorului de emisie. Ținând cont de valoarea scăzută a puterii calorifice, implicând caracterul neeconomic al transportului și stocării, apare rațională utilizarea gazului de gazogen în imediata vecinătate a zonei de producție. În vederea transportului sau a stocării este necesară tratarea gazului brut în scopul obținerii substitutului de gaze naturale.

În scopul caracterizării comportării termice în focare a combustibililor apare rațională utilizarea entalpiei teoretice de ardere specifice, constând practic din raportul puterii calorifice inferioare la volumul normal al gazelor rezultate ale arderii teoretice, denumită "putere calorifică efectivă". Puterea calorifică efectivă permite evaluarea "densității de căldură" degajate în focar și implicit a temperaturii teoretice de ardere, precum și compararea din punctul de vedere al arderii, pe o bază unitară a tuturor combustibililor indiferent de starea lor de agregare. De remarcat că, puterea calorifică conform noțiunii clasice caracterizează combustibilul din punctul de vedere al transportului și depozitării, reprezentând practic "densitatea de căldură chimică" intrinsecă a combustibilului. Pe considerentul, puterii calorifice efective a combustibililor gazoși, ierarhia clasică se modifică în favoarea acetilenei - 4962 kJ/m³N - urmată de oxidul de carbon - 4360 kJ/m³N - hidrogen - 3733 kJ/m³N și de metan 3395 kJ/m³N / 9.3 /.

În consecință, conceptul de gaze "combustibile sarace" bazat pe valoarea puterii calorifice inferioare a acestora, caracterizând efectele economice ale transportului și stocării, neglijează comportarea termică prin ardere conform considerentelor transferului termic prin radiație în focar.

9.2. VITEZA NORMALĂ DE PROPAGARE A FRONTULUI FLĂCĂRII

O importanță deosebită în adoptarea soluției constructive și proiectarea instalațiilor de ardere o are viteza normală de propagare a frontului flăcării - caracterizată printr-un regim laminar de curgere, respectiv în cazul curgerii turbulente.

Frontul flăcării reprezintă locul geometric al suprafeței de separație a zonei de reacție de amestecul carburant proaspăt. În consecință, viteza normală de propagare a frontului flăcării laminare reprezintă viteza liniară relativă a elementului frontului frontului flăcării față de amestecul carburant după direcția normală la suprafața de acestuia.

Teoriile existente privind propagarea frontului flăcării consideră că rolul fundamental revine fie încălzirii amestecului combustibil de la gazele de ardere anterior formate, fie difuziei radicalilor activi - atomi de hidrogen, radicali oxidrilii, etc. - spre amestecul carburant proaspăt. De menționat că, teoriile existente nu permit clarificarea tuturor aspectelor fenomenului complex de propagare a frontului flăcării,

cea ce a impus utilizarea datelor furnizate de determinările experimentale. Propagarea frontului flăcării depinde de compoziția combustibilului și concentrația acestuia în amestecul carburant precum și de regimul de curgere.

Literatura de specialitate consultată prezintă relații empirice, bazate pe determinări experimentale, care permit estimarea vitezei maxime de propagare a frontului flăcării în cazul amestecurilor de gaze combustibile cu inerte, caracteristic combustibililor gazeși inferiori.

Componentele inerte determină diminuarea vitezei de propagare a frontului flăcării, în principal datorită reducerii concentrației reactanților și diminuării temperaturii teoretice de ardere, precum și datorită conductivității termice mai scăzute ale componentelor inerte comparativ cu gazele combustibile ($\lambda_{CO_2} = 0,014 \text{ W/mK}$, $\lambda_{N_2} = 0,0241 \text{ W/mK}$, $\lambda_{CH_4} = 0,036 \text{ W/mK}$, $\lambda_{H_2} = 0,166 \text{ W/mK}$, $\lambda_{CO} = 0,0231 \text{ W/mK}$).

În consecință, viteza normală de propagare a frontului flăcării la arderea combustibililor conținând componente inerte (CO_2 , N_2) - S'_u - se va diminua comparativ cu cazul combustibililor gazeși lipsiți de inerte - S_u , / 9.4 / conform relației:

$$S'_u = S_u [1 - (N_2)_c - 1,2 (CO_2)_c] \quad [\text{cm/s}] \quad (9.15)$$

respectiv conform relației relativ similare:

$$S'_u = S_u [1 - 0,8 (N_2)_c - 1,6 (CO_2)_c + 3 (O_2)_c] \quad [\text{cm/s}] \quad (9.16)$$

Relațiile anterior prezentate permit obținerea de rezultate adecvate pentru un conținut relativ redus de componente inerte limitat la maxim $(CO_2)_c$ 15 % și respectiv maxim $(N_2)_c$ 10 %, domeniu în care dependența este liniară - erorile devenind sensibile odată cu creșterea conținutului balastului. Determinări experimentale recente / 9.5, 9.6 /, analizând arderea gazelor naturale cu conținut ridicat de inerte - practic gaze combustibile formate din $CH_4 - CO_2 - N_2$, au permis obținerea unei relații analitice similare:

$$S_u = \alpha [1 - \beta (N_2)_c - \gamma (CO_2)_c] \quad [\text{cm/s}] \quad (9.17)$$

a cărei coeficienți α , β , λ sunt funcție de excesul de aer, conform tabelului 9.2.

Nr. crt.	Exces aer λ	Coeficient α	Coeficient β	Coeficient γ
1.	0,91	39,50	0,5049	1,098
2.	1,00	38,49	0,5236	1,1507
3.	1,11	33,55	0,59	1,2581

Tabelul 9.2 Coeficienții relației analitice (9.17) de determinare a vitezei normale de propagare a frontului flăcării

În cazul amestecului $CH_4 - N_2$, la un conținut redus de azot este valabilă relația liniară, conform relațiilor (9.15) și (9.16), respectiv odată cu majorarea ponderii acestuia, viteza normală de propagare a frontului flăcării este descrisă de o funcție de gradul 2 / 9.7 /, conform relației:

$$S_u = S_{uCH_4} [1 - 0,36 (N_2)_c - 0,79 (N_2)_c^2] \quad [\text{cm/s}] \quad (9.18)$$

Determinarea vitezei normale de propagare a frontului flăcării corespunzătoare amestecurilor de hidrocarburi este posibilă pe baza mediei ponderate a vitezei arderii componentelor, funcție de ponderea acestora / 9.2 /, conform relației:

$$S_v = \frac{37(\text{CH}_4)_c + 40(\text{C}_2\text{H}_6)_c + 38(\text{C}_3\text{H}_8)_c + 37(\text{C}_4\text{H}_{10})_c + 63(\text{C}_2\text{H}_4)_c}{(\text{CH}_4)_c + (\text{C}_2\text{H}_6)_c + (\text{C}_3\text{H}_8)_c + (\text{C}_4\text{H}_{10})_c + (\text{C}_2\text{H}_4)_c} \quad [\text{cm/s}] \quad (9.19)$$

Viteza normală de propagare a frontului flăcării obținută pe baza mediei ponderate a componentelor, valabilă în cazul amestecurilor de hidrocarburi, conduce la erori mari în cazul combustibililor gazoși conținând CO și/sau H₂.

În vederea estimării vitezei normale maxime de propagare a frontul flăcării amestecurilor combustibile, constând din hidrocarburi, CO, H₂ și componente inerte N₂, CO₂ / 9.8 / este posibilă prin utilizarea relației:

$$S_v^{\text{max}} = \frac{2,8[61(\text{CO})_c + 339(\text{H}_2)_c + 148(\text{CH}_4)_c + 30(\text{C}_2\text{H}_6)_c + 398(\text{C}_3\text{H}_8)_c + 513(\text{C}_4\text{H}_{10})_c]}{L_{\text{min}} + 1 + 5[(\text{CO}_2)_c + (\text{N}_2)_c] - 18,8(\text{O}_2)_c} \quad [\text{cm/s}] \quad (9.20)$$

De menționat, caracterul empiric și limitele de aplicare al calculului analitic al vitezei normale de propagare a frontului flăcării, ceea ce poate conduce la neconcordanțe sensibile față de cazul real de funcționare. În consecință, în vederea evitării eventualelor erori precum și a necesității preciziei determinării acesteia, apare ca rațională, în cazul amestecurilor combustibile insuficient studiate analiza datelor experimentale efectuate pentru combustibilul gazos respectiv.

Deosebit de importantă este determinarea concentrațiilor limită - inferioară și superioară - la care este posibilă propagarea frontului flăcării în aer. În cazul amestecului de gaze combustibile, determinarea limitelor de inflamabilitate în aer se realizează în conformitate cu relațiile lui Le Chatellier / 9.8, 9.9 /:

$$X_1^{\text{inf}} = \frac{100}{\frac{(\text{CO})_c}{12,5} + \frac{(\text{H}_2)_c}{4,1} + \frac{(\text{CH}_4)_c}{5,3} + \frac{(\text{C}_2\text{H}_6)_c}{3,1} + \frac{(\text{C}_3\text{H}_8)_c}{2,4} + \frac{(\text{C}_4\text{H}_{10})_c}{1,7}} \quad [\%] \quad (9.21)$$

$$X_1^{\text{sup}} = \frac{100 - 100[(\text{CO}_2)_c + (\text{O}_2)_c + (\text{N}_2)_c]}{\frac{(\text{CO})_c}{74} + \frac{(\text{H}_2)_c}{74} + \frac{(\text{CH}_4)_c}{13,9} + \frac{(\text{C}_2\text{H}_6)_c}{12,5} + \frac{(\text{C}_3\text{H}_8)_c}{9,5} + \frac{(\text{C}_4\text{H}_{10})_c}{8,4}} \quad [\%] \quad (9.22)$$

Relațiile lui Le Chatellier sunt valabile în cazul amestecurilor de gaze combustibile care nu conțin componente inerte, ponderea ridicată a acestora modificând sensibil concentrațiile limită de propagare a flăcării. Determinarea limitelor de inflamabilitate, în cazul combustibililor gazoși cu conținut ridicat de inerte se efectuează pe baza diagramelor rezultate prin asocierea unui component inert la un gaz combustibil. În vederea determinării limitelor de propagare a flăcării pentru amestecul combustibil global se însumează limitele corespunzătoare de inflamabilitate ale subdiviziunilor combustibil - inert, în conformitate cu legea lui Le Chatellier. De asemenea, în calcule aproximative, limitele de inflamabilitate în cazul amestecurilor de gaze combustibile cu inerte pot fi determinate pe baza

concentrațiilor limită ale combustibilului gazos lipsit de componente inerte - X_1^{sup} - determinate pe baza legii lui Le Chatellier și corijate funcție de ponderea balastului, conform relației:

$$X_1^{inf(sup)} = \frac{X_1^{inf(sup)} \frac{100 + (CO_2)_c + (N_2)_c}{100 - (CO_2)_c - (N_2)_c}}{1 + X_1^{inf(sup)} \frac{(CO_2)_c + (N_2)_c}{100 - 100[(CO_2)_c + (N_2)_c]}} \quad [\%] \quad (9.23)$$

Dependența vitezei normale de propagare a frontului flăcării funcție de concentrația combustibilului din amestecul carburant proaspăt este explicată prin variația efectului termic al reacției de ardere raportat la unitatea de amestec reactant, conducând la modificarea temperaturii și implicit a cineticii reacției chimice. De asemenea, o influență majoră o are difuzia radicalilor activi necesari inițierii reacției chimice. Determinările experimentale indică dependența vitezei normale de propagare a flăcării funcție de concentrația inițială a combustibilului având forma unui clopot, mărginit de concentrațiile limită de inflamabilitate și având maximumul deplasat spre concentrații superioare celei stoichiometrice. Viteza normală de propagare a frontului flăcării, funcție de concentrația combustibilului este exprimată pe baza limitei superioare și inferioare de inflamabilitate, conform relației:

$$S_U = S_{U1} + A (X - X_1^{INF}) (X_1^{SUP} - X) \quad [cm/s] \quad (9.24)$$

în care: X este concentrația combustibilului în amestecul carburant, în numere reale;

S_{U1} - valoarea minimă a vitezei normale de propagare a frontului flăcării, în cm/s;

A - coeficient determinat experimental.

Influențe majore asupra vitezei normale de propagare a frontului flăcării o are temperatură inițială a amestecului carburant și într-o pondere mai mică presiunea acestuia, conform relațiilor:

$$S_U^T = S_U^{T_0} \left(\frac{T}{T_0} \right)^n \quad [cm/s] \quad (9.25)$$

respectiv:

$$S_U \cong p^{(v/2-1)} \quad [cm/s] \quad (9.26)$$

în care: n = 0,6 - 1,65

v -este gradul reacției chimice.

Conform datelor experimentale trecerea de la regimul laminar la cel turbulent, conduce la majorarea accentuată a vitezei de propagare a frontului flăcării într-o corelare directă cu gradul turbulenței. Modelul fizic clasic, care descrie arderea în regim turbulent, se bazează pe considerarea existenței frontului laminar de propagare a flăcării în condițiile modificării formei acestuia determinate de intensitatea turbulenței. Curbarea frontului flăcării în cazul unui grad redus al turbulenței, respectiv ruperea acestuia în volume izolate, rezultate odată cu mărirea intensității turbulenței conduc la majorarea semnificativă a suprafeței de ardere și implicit la mărirea aparentă a vitezei de ardere. În consecință, viteza de ardere în regim turbulent depinde doar de intensitatea turbulenței, fără a ține cont de alți factori fizico-chimici. Necesitatea concordanței determinărilor experimentale cu cele analitice implică considerarea schimbului de masă în regim turbulent, difuzivitatea termică și parametrii turbulenței, etc. De asemenea, se consideră modelul arderii

microvolumetrică bazat pe mecanismul turbulent de amestecare a volumelor elementare de combustibil gazos care sunt în contact cu produsele fierbinți ale arderii.

În conformitate cu relațiile analitice corespunzătoare, s-au determinat viteza normală maximă de propagare, precum și concentrațiile limită de propagare a frontului flăcării, fiind prezentate în tabelul 9.1. Referitor la viteza maximă de propagare a frontului flăcării gazului de gazogen se constată valoarea ridicată a acesteia comparativ cu cazul metanului și al gazelor naturale, determinată de conținutul de hidrogen. Concentrațiile limită inferioare de propagare ale flăcării sunt sensibil majorate în cazul gazului de gazogen cu conținut redus de hidrogen, respectiv relativ similare odată cu creșterea ponderii hidrogenului comparativ cu metanul și gazele naturale. Limita superioară de inflamabilitate este net superioară față de metan și gazele naturale datorită ponderii mari de hidrogen și oxid de carbon.

De remarcat, referitor la gazul de gazogen rezultat în urma gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, caracteristicile favorabile de propagare ale frontului flăcării implică utilizarea relativ facilă energetică a acestuia. Mărirea vitezei normale de propagare a frontului flăcării conduce la diminuarea, practic reducerea riscurilor de rupere a flăcării, implicând dezavantajul returului acesteia.

Caracterul empiric al relațiilor analitice de calcul al parametrilor de propagare al frontului flăcării, precum și necesitatea evidențierii dependenței acesteia față de concentrația combustibilului în amestecul carburant au implicat determinarea experimentală a vitezei normale de propagare a arderii pentru cazul combustibilului gazos analizat.

9.3. CONDIȚIILE DE STABILITATE ALE ARDERII

Funcționarea normală a instalațiilor de ardere echipând generatoarele de abur sau cuptoarele industriale depinde de asigurarea condițiilor de stabilitate ale arderii, necesare evitării riscurilor de retur și de rupere ale flăcării, care pot conduce la accidente grave precum și a zonei luminoase, caracterizate prin pierderi importante datorită arderii incomplete din punct de vedere chimic.

Analiza condițiilor de stabilitate ale arderii conduce la concluzia că este suficient ca într-o zonă a frontului flăcării să se respecte egalitatea vitezei de deplasare a amestecului carburant cu cea de propagare a frontului flăcării, condiție similară cu egalitatea gradientilor celor două viteze. În cazul arderii în regim laminar condiția de stabilitate este îndeplinită în stratul limită adiacent peretelui capului arzătorului, având în vedere că ambele viteze tind spre valori nule, echivalența fiind stabilită la adâncimea de penetrare. Diminuarea vitezei de deplasare a amestecului carburant conduce, datorită valorii sensibil superioare a vitezei de propagare a frontului flăcării la pătrunderea acestuia în interiorul arzătorului. În caz contrar, la mărirea vitezei de deplasare a amestecului carburant apare desprinderea locală a frontului flăcării de pereții arzătorului, urmată de ruperea și implicit stingerea flăcării. De remarcat că, la arderea amestecurilor bogate frontul flăcării se poate stabiliza la o anumită distanță față de secțiunea finală a arzătorului, ruperea flăcării fiind determinată de creșterea vitezei amestecului carburant. De asemenea, în cazul amestecurilor bogate, datorită deficitului oxidantului flacăra devine luminoasă, datorită apariției carbonului incandescent, rezultat din descompunerea pirogenetică a hidrocarburilor, conducând la arderea incompletă a acestuia. Fenomenele de rupere sau retur ale flăcării sunt determinate de natura și concentrația inițială a combustibilului datorită influențelor majore asupra vitezei de propagare a frontului flăcării, de profilul vitezei amestecului carburant și de dimensiunile și temperatura pereților capului arzătorului.

Arderea stabilă are loc în domeniul cuprins în interiorul curbelor limită de rupere - eventuale desprindere locală - și retur a flăcării, evitându-se zona arderii luminoase, semnalată de apariția punctelor galbene. Domeniul de stabilitate al arderii este reprezentat fie prin variația vitezei de rupere și retur ale flăcării, funcție de gradul de aerare al amestecului carburant, fie prin variația gradientului acestor viteze funcție de concentrația combustibilului în amestec, raportată la concentrația corespunzătoare stoichiometriei.

Determinarea analitică a vitezei normale de propagare a frontului flăcării în cazul combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie permite estimarea caracteristicilor stabilității arderii. Vitezele ridicate de propagare ale frontului flăcării, determinate de conținutul ridicat de hidrogen al combustibilului indică riscuri relativ reduse de rupere a flăcării, respectiv tendințe evidente de retur ale acestuia. Conținutul relativ redus de hidrocarburi, precum și ponderea majoră a hidrogenului indică flăcări practic transparente și în consecință tendințe reduse de apariție a punctelor galbene. Returul flăcării în interiorul arzătorului, fenomen care limitează sarcina minimă a acestuia, poate fi evitat prin adoptarea variantelor instalațiilor de ardere cu amestecare exterioară a combustibilului cu aerul, în aceste condiții riscurile returului fiind anulate. Tendințele reduse de rupere ale flăcării conduc la posibilitatea adoptării de sarcini termice relativ ridicate fără a fi necesare măsuri suplimentare de stabilizare a arderii.

Implicațiile majore ale stabilității arderii asupra exploatării normale și siguranței instalațiilor de ardere, precum și adoptarea limitelor mari de reglaj ale sarcinii termice, au condus la necesitatea determinării experimentale ale limitelor de apariție a rupei și returului flăcării și implicit ale domeniului de stabilitate al arderii.

9.4. INSTALAȚIE EXPERIMENTALĂ DE DETERMINARE ALE CARACTERISTICILOR ARDERII

Dintre posibilitățile experimentale de determinare ale vitezei normale de propagare a frontului flăcării, cea mai facilă și implicit cea mai frecvent utilizată este metoda dinamică constând în arderea liberă a combustibilului gazos în atmosferă prin intermediul unui arzător Bunsen, care permite realizarea curgerii laminare. Datorită distribuției parabolice a vitezei de ieșire din arzător a amestecului carburant - conform legii lui Poiseuille - frontul flăcării are o formă relativ conică. Suprafața reală a frontului flăcării se abate de la forma conică, întrucât în vecinătatea pereților tubului are loc o diminuare a vitezei de admisie a combustibilului în stratul limită, precum și reducerea mai puțin accentuată a vitezei normale de propagare, datorită răcirii amestecului carburant la contactul cu pereții tubului. Vârful conului flăcării este aplatisat ca urmare a măririi locale a vitezei normale de ardere comparativ cu aducerea amestecului carburant, datorită creșterii concentrației radicalilor activi și a majorării temperaturii determinată de aportul furnizat de arderea straturilor învecinate.

Interpretarea datelor experimentale se bazează pe legea lui Gouy-Michelson, conform căreia, suprafața staționară a conului flăcării reprezintă locul geometric al punctelor în care componenta normală a vitezei jetului amestecului carburant este egală cu viteza normală de propagare a flăcării. În consecință, determinarea vitezei normale de ardere se poate efectua prin raportarea debitului amestecului carburant, adus la starea normală, la suprafața staționară a conului flăcării, reprezentând practic cu caz particular al legii continuității.

Standul experimental conține, pe lângă becul Bunsen, instalația de realizare a amestecului combustibil - aer, în diverse proporții, precum și aparatura necesară determinării debitului și compoziției amestecului carburant și a dimensiunilor flăcării. Pe plan mondial, în vederea măririi preciziei rezultatelor experimentale, compoziția

amestecului carburant, anterior reglată este verificată prin cromatografiere, iar determinarea exactă a vitezei se realizează utilizând anemometre laser - doppler. Determinarea dimensiunilor conului flăcării se realizează prin fotografierea directă sau în umbră pe baza interferometriei schlieren.

O importanță deosebită, o are adoptarea soluției constructive a arzătorului de testare în vederea obținerii caracteristicilor flăcării, practic a vitezei normale de propagare a arderii și a curbelor limită care descriu domeniul de stabilitate al arderii. În consecință, arzătorul de testare trebuie să permită realizarea condițiilor de curgere laminară, un grad ridicat de omogenitate al amestecului carburant și pe cât posibil, o distribuție uniformă a vitezelor jetului. De remarcat că, experiența utilizării arzătoarelor de testare indică că nu este suficientă analiza comportării flăcării pe un singur tip de arzător în vederea prevederii performanțelor combustibilului gazos.

Literatura de specialitate indică pe lângă varianta clasică a arzătorului Bunsen și alte tipuri constructive, parțial similare becului Bunsen, cele mai reprezentative fiind principial prezentate în figura 9.1.

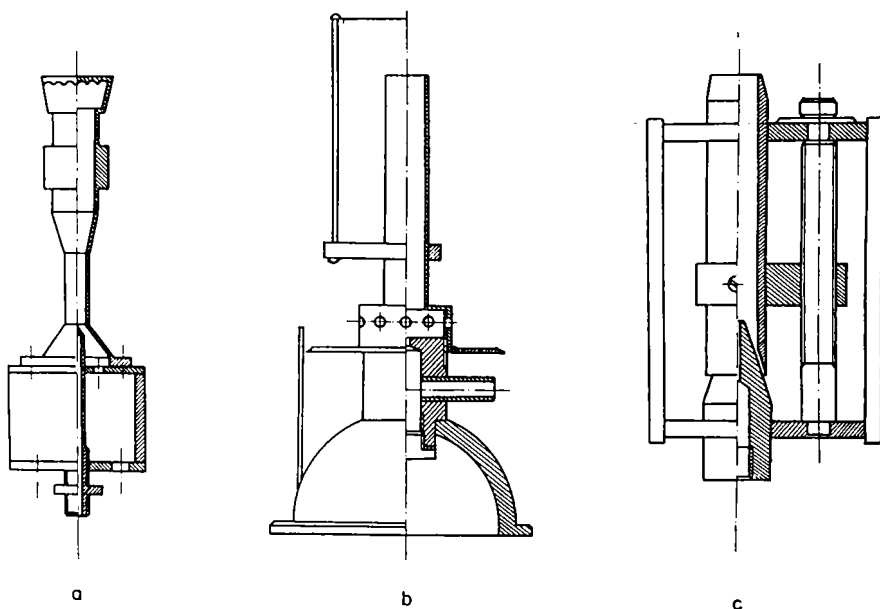


Figura 9.1. Arzătoare pentru determinarea caracteristicilor arderii
a - arzătorul A.G.A., b - arzătorul Rochester, c- arzătorul Ott;

Arzătorul de precizie A.G.A., schematic prezentat în figura 9.1.a, constă dintr-un tub Venturi care asigură omogenitatea amestecului, având la capul arzătorului o cupă tronconică de stabilizare. Combustibilul gazos este introdus prin intermediul unui racord prevăzut la partea superioară cu un ajutoraj, a cărui formă exterioară conică permite, prin deplasarea axială a acestuia reglarea debitului aerului primar. Arzătorul de testare Rochester, prezentat în figura 9.1.b, este similar becului Bunsen constând dintr-un tub cilindric, destinat omogenizării amestecului carburant, având la baza camera de acces a combustibilului și aerul necesar arderii. Combustibilului gazos este reglat prin modificarea secțiunilor de intrare, fiind măsurat prin intermediul unei rigle gradate. De asemenea, arzătorul este prevăzut cu o riglă gradată care permite

citirea rapidă a înălțimii conului flăcării. Arzătorul Ott, prezentat schematic în figura 9.1.c, constă dintr-o țevă de amestecare al combustibilului gazos și aerului necesar arderii, deplasabilă axial prin intermediul unui șurub de precizie, ceea ce permite modificarea secțiunii de acces a combustibilului. La bază arzătorul este prevăzut cu ajutorul de expansiune al combustibilului, având extremitatea conică în vederea obținerii fantei de dimensiuni variabile de acces al aerului necesar arderii. Prin intermediul unei scale circulare gradate dispusă în partea superioară a arzătorului se poate determina debitul aerului.

Utilizarea variantelor clasice de arzătoare, anterior prezentate conduce la dificultăți în determinarea cu precizie a debitului aerului de combustie, întrucât acesta este aspirat prin ejecție. Arzătorul de testare adoptat în vederea determinării experimentale a vitezei normale de propagare a frontului flăcării se caracterizează prin introducerea directă a amestecului carburant realizat prin intermediul unui amestecator. Justificarea se bazează, pe de-o parte, pe necesitatea realizării unui grad ridicat de omogenitate a amestecului carburant, respectiv pe facilitatea determinării debitului aerului la introducerea forțată a acestuia, comparativ cu cazul aerului aspirat prin ejecție de către combustibilul gazos, pe de alta parte. În cazul variantei constructive a becului Bunsen, datorită curgerii laminare prin țeava arzătorului, distribuția vitezelor este parabolică ceea ce implică diminuarea componentei normale la suprafața de reacție de la centru spre periferia secțiunii arzătorului. În vederea obținerii unei forme a frontului flăcării cât mai apropiate de cea conică este necesară realizarea, pe cât posibil a unei viteze uniforme a amestecului carburant în secțiunea de ieșire din arzător. În consecință, s-a adoptat pentru secțiunea finală a arzătorului un orificiu cu perete gros, având în vedere similitudinea curgerii prin ajutaje, ceea ce conduce la viteze relativ paralele și uniforme. Soluția constructivă a arzătorului experimental oferă posibilitatea obținerii unui front de flăcără având practic o formă conică, datorită gradului ridicat de omogenitate a amestecului și a unei viteze a amestecului carburant relativ uniformă.

Standul experimental, prezentat schematic în figura 9.2, cuprinde instalația de obținere, reglare și măsurare a debitului componentelor combustibilului gazos și a aerului necesar arderii precum și arzătorul adoptat / 9.10, 9.11 /.

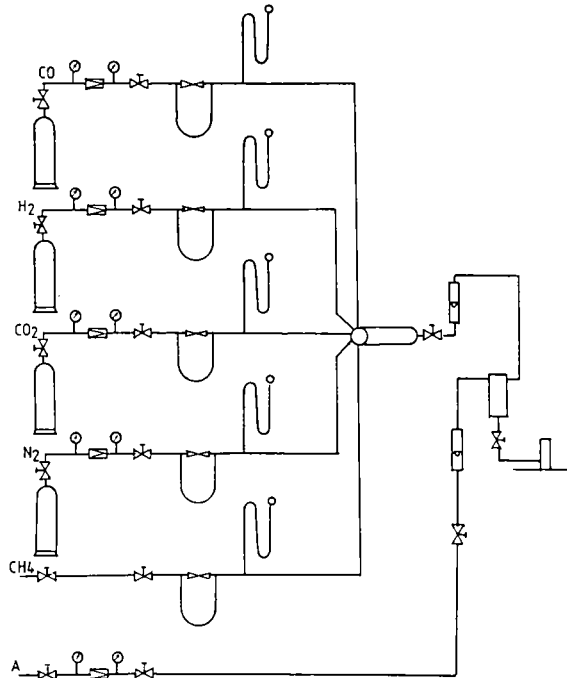


Figura 9.2. Stand experimental pentru determinarea caracteristicilor arderii gazului de gazogen

Obținerea combustibilului gazos, similar compoziției medii rezultate în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, se realizează prin amestecarea componentelor - CH_4 , CO , H_2 , CO_2 și N_2 - preluate din butelii. Fiecare circuit al constituenților combustibilului este prevăzut cu un reducător de presiune, urmat de un robinet cu ventil necesar reglării adecvate a debitului. Măsurarea debitului fiecărui gaz component se efectuează prin intermediul unui flowmetru, care permite evidențierea căderii presiunii la trecerea printr-un capilar având diametrul de 1 mm și măsurarea acesteia la un tub U. În vederea determinării debitului în condiții normale pe fiecare circuit este prevăzut un manometru cu tub U permițând obținerea suprapresiunii față de cea atmosferică, temperatura fiind practic cea a mediului ambiant. Circuitele componentelor combustibilului gazos sunt racordate la un amestecător, care este practic o țevă având la partea anterioară, dispuse periferic, racordurile de intrare ale constituenților, iar la partea posterioară un racord central de ieșire a combustibilului gazos. În interior, amestecătorul conține trei palete radiale care asigură omogenitatea compoziției combustibilului gazos. În vederea verificării corectitudinii compoziției combustibilului gazos, pe circuitul de ieșire din amestecător este prevăzut un racord de prelevare a probelor pentru analiza cromatografică.

Aerul necesar arderii, furnizat de instalația de aer comprimat parcurge succesiv reducătorul de presiune urmat de un robinet cu ventil ac necesar reglării corespunzătoare a debitului măsurat prin intermediul unui rotametrul.

Debitele, corespunzător reglate și măsurate ale combustibilului gazos și aerului necesar arderii, sunt introduse într-un amestecător, conducând la omogenizarea amestecului carburant, urmând a intra în arzătorul de testare. În vederea posibilității modificării debitului amestecului carburant la ieșirea din amestecător este prevăzut un robinet de reglare.

Instalația experimentală permite determinarea vitezei normale de propagare a frontului flăcării prin determinarea debitului componentelor amestecului carburant și a dimensiunilor conului flăcării, prin fotografiere directă. De asemenea, domeniul de stabilitate al arderii a fost determinat prin evidențierea limitelor de rupere și retur ale flăcării precum și a celei de apariție a zonelor galbene, prin variația vitezei amestecului carburant și al gradului de aerare. În vederea determinărilor experimentale s-a utilizat un arzător tubular având diametrul interior de 8 mm.

9.5. REZULTATELE DETERMINĂRILOR EXPERIMENTALE

Instalația de laborator a permis determinarea experimentală a vitezei normale de propagare a frontului flăcării, precum și a limitelor de stabilitate ale arderii utilizând un combustibil gazos similar celui rezultat din gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie. De remarcat că, teoretic gazul de gazogen este lipsit de oxigen datorită faptului că acesta nu este conținut de agentul de gazificare cât și datorită reactivității sale ridicate. Datorită acestor considerente, în cazul determinărilor experimentale s-a renunțat la introducerea oxigenului, în principal pentru diminuarea riscului de retur al flăcării și a unei arderi în interiorul tubulaturii de sticlă a instalației. Viteza normală de propagare a frontului flăcării a fost determinată pentru diferite concentrații ale amestecului carburant, practic prin variația debitului aerului și implicit a gradului de aerare, dimensiunile flăcării fiind determinate prin fotografierea directă a acesteia. Datorită conținutului ridicat de hidrogen flacăra este practic transparentă întâmpinându-se dificultăți deosebite la fotografierea ei. Rezultatele determinărilor experimentale împreună cu fotografiile frontului flăcării pentru gama de reglaje a debitului aerului primar cuprins în domeniul limitelor de inflamabilitate sunt prezentate în anexa nr 4.

Variația vitezei normale de propagare a frontului flăcării funcție de concentrația combustibilului gazos - având compoziția: CO_2 13,63 %, H_2 43,77 %, N_2 13,82 %, CH_4 13,82 % și CO 14,96 % - este prezentată în figura 9.3. Conform determinărilor experimentale viteza maximă de propagare a frontului flăcării are valori în domeniul 96 - 110 cm/s, funcție de compoziția combustibilului gazos, fiind practic similară valorilor rezultate în urma calculului analitic.

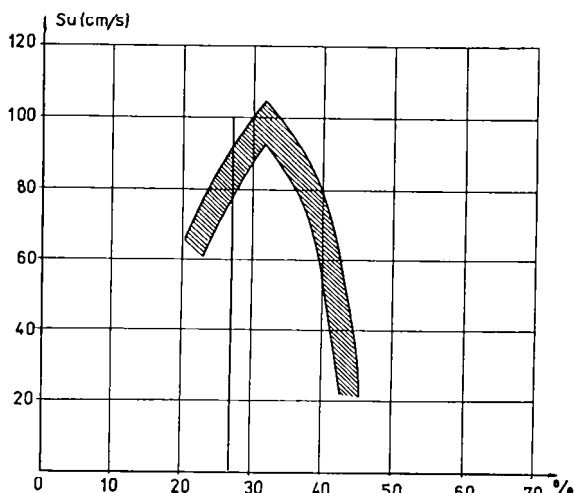


Figura 9.3. Viteza normală de propagare a frontului flăcării

Maximul vitezei de propagare a frontului flăcării se obține la concentrații ale combustibilului de 27 - 34 %, deplasate față de concentrația stoichiometrică de 24 - 27 %. Determinările experimentale confirmă ipotezele teoretice și implică caracteristicile avantajoase ale gazului rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, evidențiind posibilitățile relativ facile de utilizare energetică a acestuia.

În vederea determinării domeniului de stabilitate al arderii combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cu umiditate proprie s-au evidențiat vitezele limită de rupere și retur ale flăcării pentru diferitele debite ale gazului și aerului necesar arderii, practic pentru diferite viteze și grade de aerare ale amestecului carburant. Principalele valori ale vitezelor de rupere și retur ale flăcării în cazul arderii combustibilului gazos analizat sunt prezentate în tabelul 9.3, respectiv domeniul de stabilitate al arderii în figura 9.4. Referitor la vitezele de rupere ale flăcării, acestea variază liniar între 6 m/s, corespunzător unui grad de aerare de 0,55, respectiv 2,7 m/s la un grad de aerare de 1,1, menținându-se relativ constantă cu creșterea cantității aerului primar. Vitezele de retur ale flăcării sunt caracterizate prin valori

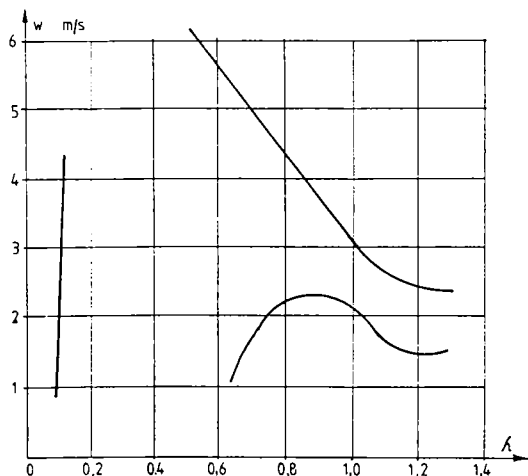


Figura 9.4. Domeniul de stabilitate al arderii gazului de gazogen

maxime de circa 2,3 m/s, corespunzător unui grad de aerare de 0,85 - 0,95, diminuându-se progresiv odată cu mărirea, respectiv scăderea cantității aerului primar. Conținutul redus de hidrocarburi determină, în general o flăcără practic transparentă, zona arderii luminoase semnalată prin apariția punctelor galbene fiind într-un domeniu îngust, corespunzător unui grad de aerare de 0,08-0,12.

9.5.1. CONCLUZIILE DETERMINĂRILOR EXPERIMENTALE

Analiza determinărilor experimentale și a datelor furnizate de calcule analitice, referitoare la arderea combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditate proprie permit evidențierea următoarelor concluzii, necesare adoptării soluției constructive și proiectării instalațiilor de ardere:

1. Viteza normală de propagare a frontului flăcării având valori ridicate de 96-110 cm/s, determină posibilități facile de utilizare energetică a combustibilului gazos;
2. Valorile ridicate ale limitei de rupere a flăcării conduc la diminuarea sensibilă a riscurilor, permițând adoptarea de sarcini ridicate ale arzătorului;
3. Riscurile ridicate de retur ale flăcării, determinate de valorile ridicate ale vitezei limită de retur conduc la necesitatea adoptării soluției constructive a arzătoarelor cu amestecare exterioară a componentelor amestecului carburant;
4. Zona redusă a flăcării luminoase determină valori reduse ale pierderilor prin ardere incompletă, din punct de vedere chimic și totodată randamente sporite ale arderii.

Caracteristicile favorabile ale arderii combustibilului gazos rezultat în urma gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, coroborate cu valorile ridicate ale temperaturii teoretice de ardere și ale factorului de emisie ale gazelor arse, sensibil majorate față de cazul metanului și al gazelor naturale determină comportări favorabile în focarul agregatului de cazan sau al cuptoarelor industriale, ceea ce pledează pentru utilizarea energetică a acestora. De menționat că, la nivelul actual al prețurilor hidrocarburilor naturale utilizarea gazului de gazogen este necompetitivă și datorită puterii calorifice reduse nu este economic transportul acestuia la distanță.

9.6. INTERSCHIMBABILITATEA COMBUSTIBILILOR GAZOȘI

Practica exploatarea instalațiilor de ardere indică posibilități relativ frecvente de modificare a calității combustibililor gazoși - datorită variației compoziției gazelor rezultate din diferite procese tehnologice funcție de parametrii de operare - respectiv schimbarea combustibilului gazos cu altul, având eventual caracteristici total diferite.

Majoritatea covârșitoare a instalațiilor de ardere autohtone au fost concepute în vederea utilizării gazelor naturale, constând aproape exclusiv din metan. Utilizarea gazelor combustibile sărace, în speță a gazului de gazogen impune analiza teoretică și practică a interschimbabilității cu gazele naturale, în vederea evidențierii posibilităților adoptării actualelor arzătoare bazate pe gaze naturale. De asemenea, analiza posibilităților de interschimbabilitate a combustibililor gazoși permite determinarea parametrilor de reglare sau a modificărilor constructive necesare substituirii combustibililor.

Principial, interschimbabilitatea combustibililor gazoși indică posibilitatea utilizării unui gaz de substituție în locul combustibilului uzual fără a necesita reglări și/sau modificări constructive ale arzătorului. Lipsa unei definiții explicite a interschimbabilității combustibililor gazoși confirmă complexitatea sa. Datorită acestui fapt s-au efectuat cercetări intense în vederea determinării posibilităților de corelare a proprietăților complexe ale combustibililor gazoși care permit prevederea interschimbabilității acestora. De asemenea, cu excepția gazelor combustibile

"perfect" interschimbabile, trebuie determinate limitele abaterilor acceptabile, care variază atât funcție de caracteristicile complexe ale combustibililor cât și funcție de posibilitățile de reglare ale arderii și de toleranța consumatorului, corelată cu specificul utilizării.

Din punct de vedere istoric, primele criterii de interschimbabilitate ale combustibililor gazeși se bazează pe corelarea factorilor energetici - putere calorifică inferioară - și gazodinamici - în principal densitatea și suprapresiunea combustibilului - în vederea asigurării fluxului termic corespunzător.

Studiul ulterior evidențiază necesitatea combinării factorilor energetici cu caracteristicile de stabilitate ale arderii. Aplicarea acestor factori au condus la pronosticarea interschimbabilității, cu diferite grade de certitudine corelate cu limitele de aplicabilitate și abaterile tolerate. De remarcat că, actualele metode nu permit prevederea eventualelor evenimente defavorabile generate de substituție, ca de exemplu: zgomotul arzătorului, posibilitățile de aprindere, riscul de retur la închidere, miros, etc.

Probabilitatea având gradul maxim de prevedere a interschimbabilității combustibililor gazeși este conferită de determinările experimentale pe arzătoare de testare sau pe arzătoarele reprezentative utilizate.

9.6.1. INDICI DE INTERSCHIMBABILITATE BAZATI PE CRITERII ENERGETICE

În condițiile substituției combustibililor gazeși, una dintre cerințele fundamentale constă în necesitatea asigurării fluxului termic solicitat de menținerea parametrilor funcționali ai agregatului de cazan sau ai cuptorului industrial. Considerând că, fluxul termic generat în urma arderii combustibililor gazeși este determinat în principal de caldura chimică a acestora, practic de puterea calorifică inferioară și debitul combustibilului, aflat într-o corelare inversă cu densitatea, rezultă importanța acestor factori în prevederea interschimbabilității combustibililor.

Bazat pe puterea calorifică inferioară - Q_i - și densitatea combustibilului - ρ_g - cifra Wobbe, reprezintă una dintre caracteristicile importante ale interschimbabilității, fiind definită conform relației:

$$Wo = \frac{Q_i}{\sqrt{\rho_g}} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}] \quad (9.27)$$

respectiv utilizând densitatea relativă comparativ cu aerul - ρ_g' :

$$Wo' = \frac{Q_i}{\sqrt{\rho_g'}} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}] \quad (9.28)$$

Pe considerentul echivalenței fluxului termic, doi combustibili gazeși pot fi substituți, fără a fi necesare modificări constructive sau de reglare ale instalației de ardere, cu condiția egalității cifrelor Wobbe. În cazul combustibililor având cifre Wobbe diferite, menținerea sarcinii termice este realizabilă prin modificarea suprapresiunii și/sau a secțiunii de trecere a gazelor combustibile, în corelație cu relația:

$$\frac{Wo_1}{Wo_2} = \sqrt{\frac{\Delta p_2 S_1}{\Delta p_1 S_2}} \quad (9.29)$$

în care: Δp este suprapresiunea combustibilului gazos, în mm H_2O ;
 S - secțiunea de trecere a combustibilului gazos, în mm^2 ;
 1 - gaz de bază; 2 - gaz de substituție.

De asemenea, substituția combustibililor gazeși determină variația cantității de aer necesar arderii, ceea ce implică adoptarea modificărilor corespunzătoare, la care trebuie corelate și obligativitatea asigurării sarcinii termice a arzătorului.

Metoda de prevedere a interschimbabilității elaborată de Knoy se bazează pe considerentul ca puterea calorifică a amestecului carburant, în secțiunea de ieșire a arzătorului este o măsură a capacității de substituire a combustibililor gazeși, fiind aplicabilă în cazul arzătoarelor cu preamstec de joasă presiune. Pe baze experimentale s-a constatat ca arzătoarele cu preamstec funcționează în condiții satisfăcătoare în cazul unui amestec carburant în capul arzătorului având o putere calorifică inferioară de $6.520 \text{ kJ/m}^3\text{N}$ (175 BTU/ft^3). În consecință, coroborând puterea calorifică inferioară a combustibilului și valoarea optimă a acesteia, în cazul amestecului carburant cu densitatea relativă a combustibilului gazos comparativ cu aerul rezultă factorul lui Knoy / 9.14 /, conform relației:

$$K = \frac{(Q_i - 6.520)}{\sqrt{\rho'}} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}] \quad (9.30)$$

Determinând valorile factorului lui Knoy atât pentru combustibilul gazos de bază cât și pentru cel de substituție, condiția de interschimbabilitate constă în variații ale factorului lui Knoy în limite de $\pm 5 \%$, în cazuri speciale $\pm 10 \%$.

Similar indicelui Knoy, interschimbabilitatea combustibililor gazeși poate fi evaluată pe baza puterii calorifice a amestecului carburant din secțiunea finală a arzătorului (Q_i^{am}), determinată conform relației:

$$Q_{i2}^{\text{am}} = \frac{Q_{i2} \rho_{g1}}{\left(\frac{Q_{i1} - Q_{i1}^{\text{am}}}{Q_{i1}^{\text{am}}} \right) \rho_{g2} + \rho_{g1}} \quad [\text{kJ/m}^3\text{N}] \quad (9.31)$$

Pentru ca două gaze combustibile să fie interschimbabile, puterea calorifică a amestecului carburant determinată în secțiunea finală a arzătorului pentru gazul de substituție trebuie să fie similară valorii corespunzătoare pentru gazul de bază, eventual cu o abatere de maxim $\pm 15 \%$.

De menționat că, atât cifra Wobbe cât și indicele Knoy bazate pe puterea calorifică și densitatea combustibilului gazos permit aprecierea interschimbabilității combustibililor pe baza echivalenței sarcinii termice a instalației de ardere. Pe de altă parte, la schimbarea combustibilului gazos este posibilă modificarea temperaturii teoretice de ardere, a coeficientului de emisie și dimensiunilor flăcării, cu influențe majore asupra fluxului termic transmis prin radiație în focar și implicit asupra sarcinii termice a agregatului, în condițiile echivalenței fluxurilor termice ale arzătorului. Viabilitatea concluziei necesită evaluarea caracteristicilor stabilității arderii combustibilului de bază și a celui de substituție, în caz contrar rezultatele putând fi eronate.

9.6.2. INDICI DE INTERSCHIMBABILITATE BAZAȚI PE CRITERII ENERGETICE ȘI DE STABILITATE A ARDERII

Prevederea interschimbabilității combustibililor gazeși necesită, pe lângă echivalarea sarcinii termice a instalației de ardere și analiza stabilității arderii gazului de substituție.

În vederea obținerii criteriilor necesare evaluării interschimbabilității combustibililor gazeși America Gas Association (A.G.A.) a desfășurat o vastă cercetare finalizată prin determinarea unor relații empirice de prevedere a interschimbabilității gazelor combustibile artificiale, respectiv naturale cu puteri calorifice sub $30.000 \text{ kJ/m}^3\text{N}$ / 9.15 /, conform criteriului de interschimbabilitate:

$$C = \frac{Q_{i2}L_{o2}P_{r1}}{Q_{i1}L_{o1}P_{r2}} + \left(\frac{Q_{i1}L_{o1}}{5.000\Delta I_1 F_1} - \frac{Q_{i2}L_{o2}}{5.000\Delta I_2 F_2} \right) \quad (9.32)$$

în care: ΔI este variația entalpiei specifice a gazelor de ardere în domeniul 15 °C și 870 °C, în kJ/m³N;

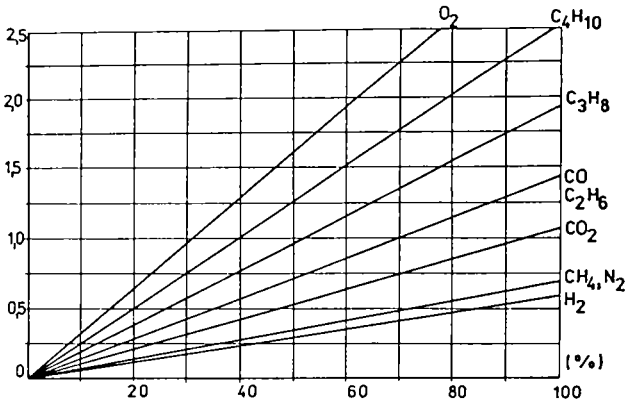


Figura 9.5. Determinarea factorului F
- relația 9.32

supraunitate ale criteriului A.G.A. indică tendințe de rupere a flăcării și de ardere incompletă, respectiv valorile subunitare indică riscul returului flăcării.

Estimarea interschimbabilității combustibililor gazoși cu puteri calorifice de peste 30.000 kJ/m³N, necesită analiza indicilor de rupere și retur ale flăcării precum și apariția zonelor de ardere luminoasă, pe baza criteriilor furnizate de A.G.A. / 9.15 /, conform relațiilor adaptate Sistemului Internațional:

- indicele de rupere al flăcării:

$$I_1 = \frac{K_1}{L_{o2} \left(K_2 - \lg \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \right) \sqrt{r_{r1}}} \leq 1,0 \quad (9.32)$$

- indicele de retur al flăcării:

$$I_F = \frac{K_2 f_2}{K_1 f_1} \sqrt{\frac{Q_{i2}}{37.260}} \leq 1,18 \quad (9.33)$$

- indicele de apariție al punctelor galbene:

$$I_y = \frac{L_{o1} Y_1}{L_{o2} Y_2} \sqrt{\frac{\rho_{g2}}{\rho_{g1}}} \geq 1,0 \quad (9.34)$$

- în care: K este constanta limitei de rupere a flăcării, determinată pe baza relației:

$$K = \frac{F}{\rho_g} \quad (9.35)$$

F - inversul cifrei Wobbe, considerând densitatea relativă în aer a combustibilului;

Y - valoarea gradului de aerare la apariția zonelor galbene în flacără, conform relației:

$$Y = \frac{2,18(\text{CH}_4)_c + 5,8(\text{C}_2\text{H}_6)_c + 9,8(\text{C}_3\text{H}_8)_c + 16,8(\text{C}_4\text{H}_{10})_c - 4,7(\text{O}_2)_c}{L_o + 7((\text{CO}_2)_c + (\text{N}_2)_c) - 26,3(\text{O}_2)_c} \quad (9.36)$$

Indicele de rupere al flăcării reprezintă raportul gradelor de aerare pentru combustibilul de bază și cel de substituție la care apare ruperea flăcării combustibilului de substituție corespunzător echivalării sarcinii termice. Indici de rupere subunitari implică un grad de aerare mai mic decât cel corespunzător limitei de rupere a gazului de substituție, în condițiile echivalenței sarcinii termice și implicit gazele sunt interschimbabile din punctul de vedere al rupei flăcării. Valori supraunitare ale indicelui de rupere apar în cazul unui grad de aerare superior limitei de rupere, evidențiind tendințele de pierdere a stabilității arderii. De menționat că, practic indicele de rupere poate depăși unitatea, având în vedere că în cazurile reale de funcționare ale arzătoarelor densitatea fluxului termic este sensibil mai mare decât valoarea adoptată.

Determinarea indicelui de retur a flăcării s-a realizat exclusiv empiric, întrucât în cazul gazelor bogate cu un conținut ridicat de hidrocarburi, returul flăcării apare într-un domeniu îngust influențat de soluția constructivă și temperatura capului arzătorului. Analiza factorilor indică că tendințele de retur ale flăcării apar în cazul unui grad ridicat de aerare, depășind stoichiometria - datorită vitezelor maxime de propagare a frontului arderii - cât și la sarcini termice diminuate - caracterizate prin viteze reduse ale amestecului carburant.

Indicele de apariție a zonei luminoase de ardere a fost determinat pe baza corelării rapoartelor gradului de aerare cu valoarea limită a acestuia corespunzătoare apariției punctelor galbene ale gazului de bază și pentru cel de substituție. Valori supraunitare ale indicelui implică un grad de aerare superior limitei de apariție a arderii luminoase, conducând la posibilitatea înlocuirii combustibililor gazoși. În cazul valorilor subunitare există tendințe de apariție a punctelor galbene în flacără, dar din considerente similare indicelui rupei este posibilă abaterea față de unitate depinzând de condițiile locale și de reglare ale arzătorului.

Fundamentat parțial pe analiza teoretică și parțial pe elemente empirice, indicii Weaver / 9.15 / permit prevederea interschimbabilității combustibililor gazoși, pe baza relațiilor:

- indicele de modificare al sarcinii termice:

$$I_H = \frac{Q_{i2}}{Q_{i1}} \sqrt{\frac{\rho_{g1}}{\rho_{g2}}} \quad \text{ideal } 1,0 \quad (9.37)$$

admis 0,94 - 1,06

- indicele de modificare al gradului de aerare:

$$I_A = \frac{L_{o2}}{L_{o1}} \sqrt{\frac{\rho_{g1}}{\rho_{g2}}} \quad \text{ideal } 1,0 \quad (9.38)$$

admis 0,94 - 1,06

- indicele de rupere al flăcării:

$$I_L = I_A \frac{S_{u2}}{S_{u1}} \frac{1 - (\text{O}_2)_{c2}}{1 - (\text{O}_2)_{c1}} \quad \text{ideal } 1,0 \quad (9.39)$$

admis 0,64

- indicele de retur al flăcării:

$$I_F = \frac{S_{u2}}{S_{u1}} - 1,4I_A + 0,4 \quad \text{ideal } 0 \quad (9.40)$$

admis 0,08

- indicele de apariție a punctelor galbene:

$$I_Y = I_A + \frac{N_2 - N_1}{110} - 1 \quad \text{ideal 0} \quad (9.41)$$

admis 0,14

- indicele de formare al oxidului de carbon:

$$I_{CO} = I_A - 0,366 \frac{R_2}{R_1} - 0,634 \quad \text{ideal 0} \quad (9.42)$$

admis 0,1

în care: S_u este viteza maximă de propagare a frontului flăcării, în cm/s;

N - numărul atomilor de carbon eliberați cu "ușurintă" prin ardere, raportat la 100 molecule de combustibil gazos, referitor la hidrocarburi se presupune posibilitatea eliberării unui atom de carbon pe moleculă;

R - raportul dintre numărul atomilor de hidrogen din gazul combustibil la numărul atomilor de carbon din hidrocarburi.

Analiza substituției combustibililor gazoși pe baza indicilor Weaver implică ca valorile acestora să fie egale celor ideale, eventual în limitele de toleranță admisibile.

În vederea analizei posibilităților substituției gazelor naturale - utilizate într-o pondere covârșitoare în instalațiile de ardere autohtone - cu gazul de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor în strat sau cu umiditatea proprie, s-au determinat indicii de interschimbabilitate a caror valori sunt prezentate în tabelul 9.4.

9.6.3. DETERMINAREA INTERSCHIMBABILITĂȚII PE BAZA DIAGramei DE STABILITATE A ARDERII

Prevederea substituției gazelor naturale cu gazul de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie pe baza indicilor de interschimbabilitate anterior prezentați poate conduce la concluzii eronate, întrucât relațiile indicilor au fost determinate pe baze experimentale și statistice care pot conduce la abateri față de condițiile reale de exploatare. De asemenea, literatura de specialitate recomandă determinări experimentale pe arzătoare de testare sau pe arzătoare reprezentative în vederea unei probabilități maxime a prevederii interschimbabilității combustibililor gazoși. De precizat că, indicii clasici de prevedere a interschimbabilității nu cuprind elementele constructive specifice ale arzătorului.

În consecință, analizând actualele metode de prevedere a interschimbabilității combustibililor gazoși se propune o metodă originală bazată pe diagramele de stabilitate ale arderii corespunzătoare combustibilului de bază și a celui de substituție. Abordarea caracteristicilor stabilității arderii la pronosticarea interschimbabilității combustibililor gazoși necesită utilizarea diagramei de stabilitate a arderii, reprezentând curbele limită de rupere, retur și zonă luminoasă funcție de gradul de aerare, care trebuie corelată cu obligativitatea asigurării sarcinii termice a arzătorului. Estimarea sarcinii termice, corelată cu condițiile de stabilitate ale arderii este realizabilă prin transpunerea diagramei clasice de stabilitate - având drept coordonate gradul de aerare și viteza amestecului carburant, într-o nouă diagramă în funcție de gradul de aerare și densitatea fluxului termic generat de unitatea de secțiune a capului arzătorului. Transpunerea diagramei clasice de stabilitate a arderii în noile coordonate se realizează pentru curbele limita de retur, rupere și zonă luminoasă prin determinarea analitică a densității fluxului termic pe baza puterii calorifice a combustibililor, a gradului de aerare și a vitezei de aducere a amestecului carburant. În vederea exemplificării diagramei de stabilitate ale arderii în varianta clasică și pe baza densității fluxului termic, acestea au fost trasate pentru cazul gazelor naturale de Ardeal, fiind prezentate în figura 9. 6 / 9.17, 9.18/.

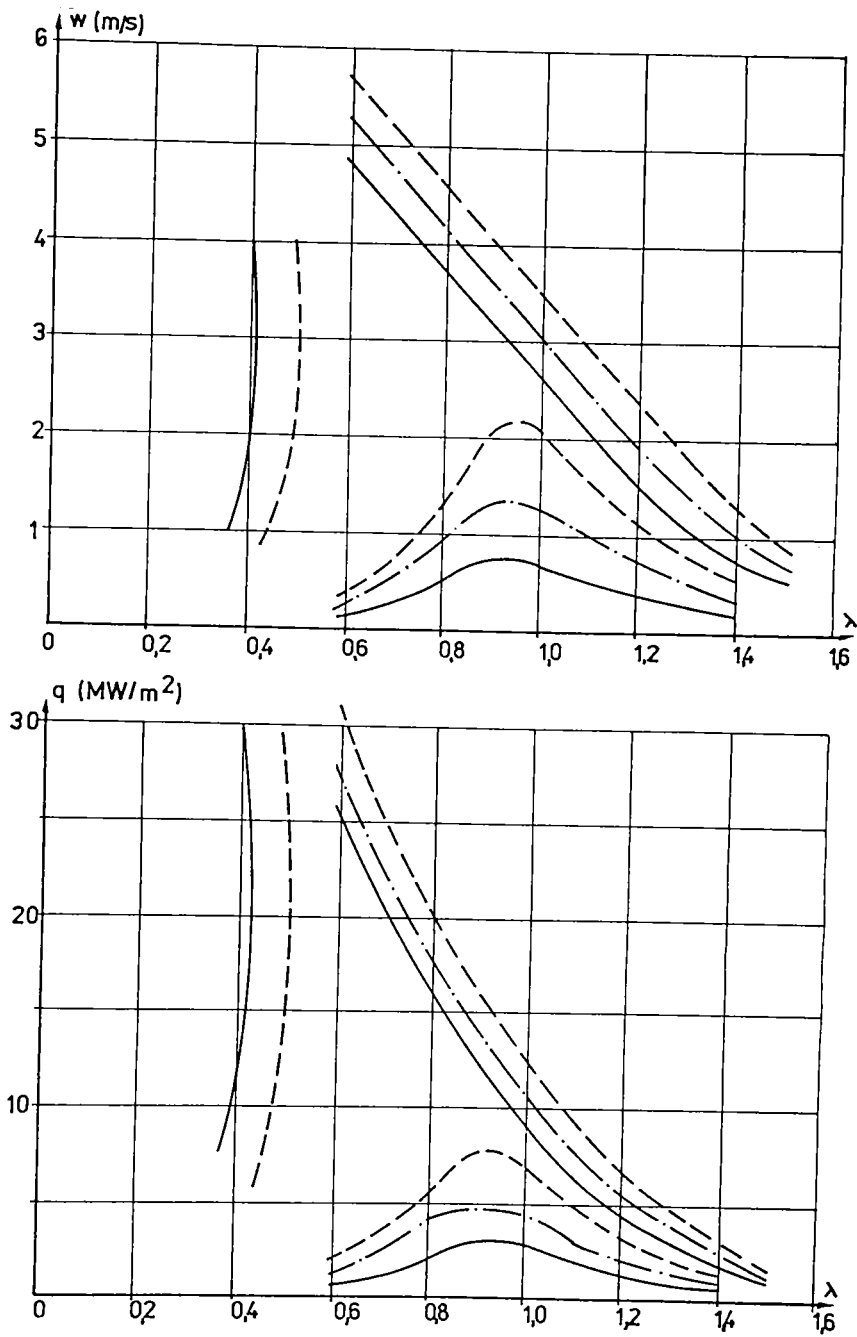


Figura 9.6. Determinarea interschimbabilității pe baza diagramei stabilității arderii

Nr. crt.	Criterii de interschimbabilitate	U.M.	Metan	Gas de gazogen				Gazificare cu umiditate proprie
				Presiune normală	Sub presiune	Aer	Oxygen	
1.	Cifra Wobbe	$\text{kJ/m}^3\text{N}$	42.497,8	5.222,4	4.972,1	6.918,8	11.279,1	11.299,2
2.	Indicele Knoy	$\text{kJ/m}^3\text{N}$	39.550,5	-985,9	-1.470	677,5	5.241	4.792,1
3.	Indici Weaver - sarcină			0,123	0,117	0,163	0,265	0,266
4.	- aer			0,0988	0,085	0,142	0,23	0,21
5.	- rupere			0,09	0,104	0,203	0,555	0,648
6.	- retur			1,182	1,519	1,635	2,49	3,354
7.	- zonă galbenă			-1,568	-1,614	-1,578	-1,384	-1,461
8.	- oxid de carbon			-2,246	-3,572	-1,491	-1,402	-1,407

Tabelul 9.4 Indicii de interschimbabilitate a combustibililor gazosi

Prin combinarea celor doua diagrame care descriu stabilitatea arderii, trasate pentru combustibilul gazos de bază și pentru cel de substituție este posibilă prevederea, cu un grad ridicat de certitudine interschimbabilitatea acestora. Practic, prevederea interschimbabilității se face prin suprapunerea celor două diagrame de stabilitate ale arderii - a combustibilului de bază și a celui de substituție. Suprapunând cele două diagrame, interschimbabilitatea combustibililor este posibilă pentru parametrii de reglaj ai domeniului comun de stabilitate al arderii. În consecință, în cazul în care punctul care caracterizează funcționarea arzătorului utilizând combustibilul de bază se află în interiorul domeniului de stabilitate al arderii combustibilului de substituție este posibilă interschimbabilitatea combustibililor.

Utilizarea diagramelor de stabilitate ale arderii necesită determinarea modificărilor condițiilor de exploatare ale arzătorului rezultate în urma substituției. Astfel, estimarea modificării sarcinii termice și implicit a densității fluxului termic este descrisă practic prin raportul cifrelor Wobbe, permițând determinarea fluxului termic q - după substituție, conform relației:

$$q_2 = q_1 \frac{Q_{i2} \sqrt{\rho_{g1}}}{\sqrt{\rho_{g2}} Q_{i1}} \quad [W/m^2] \quad (9.43)$$

Gradul de aerare corespunzător celor doi combustibili este dat de raportul dintre aerul primar aspirat prin ejecție de către combustibilul gazos și volumul de aer necesar arderii stoichiometrice. Corelând gradele de aerare ale combustibilului de bază și a celui de substituție și având în vedere egalitatea secțiunilor corespunzător accesului combustibilului și aerului necesar arderii, precum și a suprapresiunilor acestora, rezultă posibilitatea estimării modificării gradului de aerare prin substituție:

$$\lambda_1 = \lambda_2 \frac{L_{o1} \sqrt{\rho_{g2}}}{\sqrt{\rho_{g1}} L_{o2}} \quad (9.44)$$

în care: L_0 este aerul necesar arderii stoichiometrice, în m^3N/m^3N ;

1 - gaz de bază;

2 - gaz de substituție.

Similar, prin determinarea vitezei amestecului carburant - w - corespunzător combustibilului de bază și a celui de substituție, rezultă posibilitatea prevederii modificării acesteia după înlocuire, conform relației:

$$w_2 = w_1 \frac{1 + \lambda_2 L_{o2} \sqrt{\rho_{g1}}}{\sqrt{\rho_{g2}} (1 + \lambda_1 L_{o1})} \quad [m/s] \quad (9.45)$$

Estimarea domeniului de reglaj al instalației de ardere în care este posibilă interschimbabilitatea este realizabilă prin suprapunerea diagramelor de stabilitate corespunzătoare celor doi combustibili gazosi. De asemenea, este necesară determinarea modificărilor limitelor de stabilitate rupere - retur - zona luminoasă rezultate în urma substituției combustibilului de bază, în conformitate cu relațiile anterior prezentate (9.43), (9.44) și (9.45), pentru valorile curbelor limită. Domeniul de reglaj al arzătorului, pentru care este posibilă interschimbabilitatea combustibililor gazosi este domeniul comun de stabilitate al arderii, obținut prin modificarea corespunzătoare substituției a diagramei de stabilitate a flăcării combustibilului de bază cu cea a combustibilului de substituție.

Estimarea interschimbabilității combustibililor gazosi pentru un anumit reglaj al arzătorului utilizând combustibilul de bază - caracterizat prin densitatea fluxului termic, viteza amestecului carburant și gradul de aerare - este previzibilă pe baza domeniului de stabilitate al arderii combustibilului de substituție. Astfel, în conformitate cu relațiile analitice anterior prezentate se determină modificările parametrilor de reglaj după

înlocuire. Prin transpunerea parametrilor de reglaj ai arzătorului, rezultați după înlocuirea combustibililor în diagrama de stabilitate a arderii combustibilului de substituție, estimarea interschimbabilității este determinată de necesitatea ca parametri funcționali să corespundă interiorului zonei de siguranță a arderii.

9.6.4. CONCLUZII

Analiza criteriilor de interschimbabilitate ale gazelor naturale cu cele de gazogen indică imposibilitatea substituției fără modificări semnificative ale instalației de ardere, fapt evident datorită discrepantei puterilor calorifice și implicit a dificultăților implicate de asigurarea echivalenței sarcinilor termice. De asemenea, datorită valorilor ridicate ale vitezei normale de propagare a frontului arderii, sensibil majorate în cazul gazului de gazogen comparativ cu gazele naturale, există riscuri deosebite de pierdere a stabilității arderii prin returul flăcării, fenomen evidențiat de indicii corespunzători. Referitor la tendințele de rupere a flăcării, respectiv de apariție a zonelor de ardere luminoasă, acestea sunt net diminuate față de cazul arderii gazelor naturale.

În concluzie, este practic imposibilă interschimbabilitatea gazelor naturale cu gazul combustibil rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie în cazul instalațiilor de ardere utilizând arzătoare cu preamestecarea parțială sau totală a aerului necesar arderii, chiar în ipoteza unei modificări constructive sau dimensionale semnificative. În cazul arzătoarelor cu amestecare exterioră a combustibilului gazos și a aerului necesar arderii, practic majoritatea arzătoarelor utilizate în scopuri energetice sau industriale, substituirea gazelor naturale cu combustibilul gazos analizat este posibilă prin modificări constructive și funcționale care să asigure triplarea debitului combustibilului gazos, fie prin modificări ale secțiunii ajutorajelor fie prin majorarea suprapresiunii gazului, eventual prin combinarea ambelor variante. Referitor la asigurarea debitului aerului necesar arderii, instalația aferentă nu necesită modificări constructive întrucât, în condițiile echivalenței sarcinii termice gazul de gazogen necesită circa 80 % din aerul necesar arderii gazelor naturale, modificare realizabilă pe baza reglajelor. Stabilitatea arderii în condițiile substituției gazelor naturale cu gazul de gazogen analizat este asigurată datorită evitării tendințelor de rupere a flăcării - determinată de viteza de ardere sensibil majorată a gazului de gazogen, respectiv urmare a anulării riscurilor de retur ale flăcării - implicate de amestecarea exterioră.

CAPITOLUL 10

UTILIZAREA GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

10.1. GENERALITĂȚI

Ligniții autohtoni sunt caracterizați printr-un conținut ridicat de balast, care pe lângă diminuarea puterii calorifice are un efect inertizat asupra aprinderii și arderii acestora. Aceste aspecte coroborate cu efectele economice - determinate de cheltuielile ridicate de transport și preparare a combustibilului și cenușii - precum și aspectele nocive legate de poluarea mediului ambiant situează uneori agregatele energetice clasice - bazate pe arderea cărbunilor - la limita inferioară a posibilităților economice de utilizare.

În consecință, dificultățile implicate de utilizarea convențională a cărbunilor conduc la concluzia că, forma solidă prezintă dezavantaje în cazul marilor consumatori energetici, la micii consumatori, fiind total inutilizabilă în unele domenii energetice sau ca materie primă în chimie. În concluzie, apare ca rațională analiza posibilităților oferite de gazificarea ligniților autohtoni cu umiditatea proprie în vederea utilizării gazului de gazogen în instalațiile de termoficare, în instalațiile energetice de producere a energiei electrice sau ca materie primă în chimie.

10.2. ANALIZA COMPARATIVĂ A INSTALAȚIILOR DE TERMOFICARE CLASICE ȘI A CELOR BAZATE PE GAZIFICAREA CĂRBUNILOR

Abordarea acestei tematici implică compararea pe criterii energetice a variantei instalației de termoficare bazată pe gazificarea cărbunilor cu varianta clasică bazată pe arderea acestora. În consecință este necesară întocmirea și analiza bilanțului termic corespunzător celor două soluții funcționale / 10.1 /.

10.2.1 BILANȚUL TERMIC AL STAȚIEI DE GAZIFICARE A CĂRBUNILOR

Instalația complexă de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este prezentată detaliat în capitolul 8.2, figura 8.3. Principial, stația complexă de gazificare, cuprinde pe lângă gazogenul specific gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, instalația de tratare a gazului brut, instalația de ardere necesară furnizării fluxului termic exterior, precum și stația de tratare, recirculare și epurare a subprodușilor secundari. Astfel, conform figurii 8.3 gazul brut, produs în gazogenul (1) este succesiv desprăfuit grosier într-o stație de cicloane (2), urmând a fi răcit prin intermediul unui recuperator de căldură (3) care permite preîncălzirea aerului de combustie și, în final desprăfuit fin prin intermediul scruberelor (4). O fracțiune a gazului, astfel tratat, este ars în focarul ciclonei (5) în vederea furnizării fluxului exterior necesar proceselor endoterme specifice gazificării cu umiditatea proprie. Datorită faptului că gazele de ardere părăsesc focarul ciclonei la temperaturi ridicate este necesară diluția lor cu aer, anterior preîncălzit. În continuare, gazele de ardere diluate parcurg gazogenul, furnizează fluxul termic necesar gazificării, având la ieșire temperaturi relativ ridicate.

În consecință, gazele de ardere cedează o fracțiune din căldura lor sensibilă în recuperatorul (6), în vederea preîncălzirii aerului de diluție, după care sunt evacuate la coșul fum (7).

Bilanțul termic, reprezentând un caz particular al legii conservării energiei, constă în egalitatea dintre suma fluxurilor intrate și generate în contur, pe de-o parte și suma fluxurilor ieșite sub forma energiei utile și a pierderilor specifice, pe de altă parte, aduse la echivalență sub forma energiei termice. Bilanțul termic global al stației de gazificare a cărbunilor implică analiza bilanțurilor termice parțiale ale agregatelor și instalațiilor componente, evidențiind posibilitățile de majorare a eficienței termice.

10.2.1.1. BILANȚUL TERMIC AL GAZOGENULUI

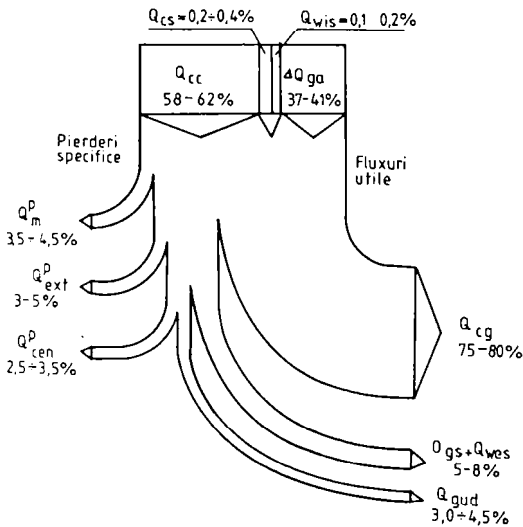


Figura 10.1. Bilanțul termic al gazogenului cu umiditate proprie - diagrama Sankey

Întocmirea bilanțului termic al gazogenului implică utilizarea modelului matematic al gazificării cu umiditate proprie în condiții de echilibru termodinamic, care funcție de analiza elementară a cărbunelui, corespunzător parametrilor de operare adoptați - temperatură și presiune - permite determinarea compoziției și a cantității de gaz brut produs corespunzătoare unității de masă de cărbune, precum și a necesarului excesului de umiditate a cărbunelui față de proba inițială.

Elementele bilanțului termic al gazogenului sunt prezentate în figura 10.1, pe baza diagramei Sankey, care

permite evidențierea intuitivă a tuturor fluxurilor termice.

Fluxurile termice intrate se determină analitic pe baza relațiilor:

- fluxul termic determinat de căldura chimică a cărbunelui:

$$Q_{cc} = B H_{ci} \quad [\text{kW}] \quad (10.1)$$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a cărbunelui:

$$Q_{cs} = B c'_c t'_c \quad [\text{kW}] \quad (10.2)$$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a apei în exces:

$$Q_{wis} = B w'_{exc} c'_w t'_w \quad [\text{kW}] \quad (10.3)$$

- fluxul termic furnizat din exterior de gazele de ardere ca suport termic al proceselor endoterme de gazificare:

$$\Delta Q_{ga} = B V_{ga} (c'_{pga} t'_{ga} - c''_{pga} t''_{ga}) \quad [\text{kW}] \quad (10.4)$$

în care: B reprezintă consumul de cărbune, în kg/s;

H_{ci} - puterea calorică inferioară a cărbunelui, în kJ/kg;

c'_c, c'_w - căldura specifică a cărbunelui, respectiv a excesului de umiditate la intrare, în kJ/kg K;

t'_c, t'_w - temperatura cărbunelui, respectiv a excesului de umiditate la intrare, în °C;

w'_{exc} - cantitatea de exces de umiditate corespunzătoare unității de cărbune, în kg_w/kg_c ;

V_{ga} - volumul gazelor de ardere diluate corespunzător unității de cărbune necesare furnizării fluxului termic în gazogen, în m^3N/kg_c ;

C'_{pga}, C''_{pga} - căldura specifică la presiune constantă a gazelor de ardere la intrare, respectiv ieșire din gazogen, în $kJ/m^3N K$;

t'_{ga}, t''_{ga} - temperatura gazelor de ardere diluate la intrare, respectiv ieșire din gazogen, în $^{\circ}C$.

Fluxurile termice utile ieșite din gazogen se determină pe baza relațiilor:

- fluxul termic determinat de căldura chimică a gazului de gazogen anhidru:

$$Q_{cg} = B D_g H_{gi} \quad [kW] \quad (10.5)$$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a gazului de gazogen anhidru și a excesului de umiditate, s-au considerat fluxuri termice utile întrucât o fracțiune poate fi recuperată în proces:

$$Q_{gs} = B D_g C''_{pg} t''_g \quad [kW] \quad (10.6)$$

$$Q_{wes} = B D_g W_g (C''_{pw} t''_w + l_v) \quad [kW] \quad (10.7)$$

- fluxul termic determinat de căldura chimică a gudroanelor și uleiurilor condensate din gazul de gazogen:

$$Q_{gud} = B D_g C_{gud} H_{gud i} \quad [kW] \quad (10.8)$$

în care: D_g - cantitatea de gaz de gazogen rezultat din gazificarea unității de cărbune, în m^3N/kg_c ;

w_g - conținutul de umiditate al gazului, în m^3N/m^3N ;

H_{gi} - puterea calorifică inferioară a gazului de gazogen anhidru, în $kJ/m^3N K$;

C'_{pg}, C''_{pw} - căldura specifică la presiune constantă a gazului de gazogen, respectiv a vaporilor în exces, la ieșire, în $kJ/m^3N K$;

t'_g, t''_w - temperatura gazului de gazogen, respectiv a vaporilor, la ieșire din gazogen, în $^{\circ}C$;

l_v - căldura latentă de vaporizare - condensare a vaporilor, în kJ/m^3N ;

C_{gud} - conținutul de gudroane și uleiuri corespunzătoare unității de gaz anhidru, în kg/m^3N ;

$H_{gud i}$ - puterea calorifică inferioară a gudroanelor în kJ/kg .

Similar oricărui agregat termic, generatorul de gazificare are pierderi specifice care se determină analitic pe baza relațiilor:

- fluxul termic pierdut datorită gazificării incomplete din punct de vedere mecanic, determinată de fracțiunea de semicocs nereacționat evacuat în cenușă sau antrenat de gazul de gazogen:

$$Q^p_m = B a^i (a_{cen} C_{cen} + a_{ant} C_{ant}) 33900 \quad [kW] \quad (10.9)$$

- pierderile prin schimb termic global cu mediul ambiant a învelișului izolației termice a gazogenului:

$$Q^p_{ext} = \sum S_{ext} k_{c-r} \Delta t \quad [kW] \quad (10.10)$$

- pierderile datorită evacuării cenușii la temperaturi ridicate:

$$Q^p_{cen} = B a^i (1 - a_{ant}) C_{cen} t''_{cen} \quad [kW] \quad (10.11)$$

în care: a^i - reprezintă conținutul de masă minerală necombustibilă a cărbunelui;

a_{cen}, a_{ant} - fracțiunea din masa minerală necombustibilă evacuată în cenușă, respectiv antrenată de gazul de gazogen;

C_{cen}, C_{ant} - conținutul de carbon al cenușii, respectiv al antrenatelor;

S_{ext} - suprafața exterioară a învelișului gazogenului, în m^2 ;

k_{c-r} - coeficientul global de transfer termic prin convecție și radiație între învelișul izolației gazogenului și mediul ambiant, în kW/m^2K ;

Δt - diferența de temperatură dintre învelișul gazogenului și mediul ambiant, în $^{\circ}\text{C}$;

c_{cen} - căldura specifică a cenușii, în kJ/kg K ;

t'_{cen} - temperatura de evacuare a cenușii din gazogen, în $^{\circ}\text{C}$;

În conformitate cu elementele bilanțului termic, anterior prezentate rezultă randamentul termic al gazogenului, pe baza relației:

$$\eta = 100 \frac{Q_{\text{cg}} + Q_{\text{gs}} + Q_{\text{wex}} + Q_{\text{gud}}}{Q_b} \quad [\%] \quad (10.12)$$

În principiu, bilanțul termic al gazogenului permite determinarea necesarului fluxului termic furnizat de gazele rezultate ale arderii, ca suport termic al proceselor endoterme de gazificare.

10.2.1.2. BILANȚUL TERMIC AL FOCARULUI CICLON

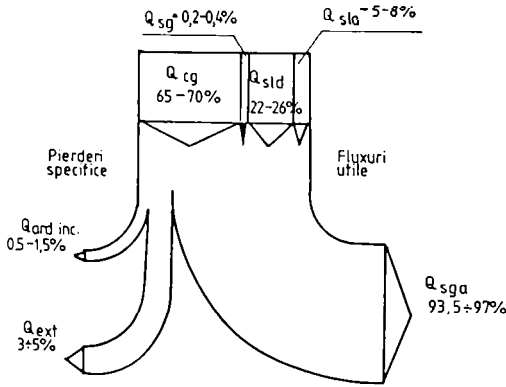


Figura 10.2 Bilanțul termic al focarului ciclon
- diagrama Sankey

Focarul ciclon serveste la furnizarea fluxului termic solicitat de procesele endoterme de gazificare, bilanțul termic al acestuia permițând determinarea fracțiuni din gazul brut produs ars ca suport termic al gazificării.

Elementele bilanțului termic al focarului ciclon sunt prezentate în figura 10.2, pe baza diagramei Sankey, care permite evidențierea fluxurilor termice într-o serie de termeni pe baza relațiilor:

- fluxul termic determinat de căldura chimică a gazului de gazogen ars:
 $Q_{\text{cg}} = B D_{\text{ga}} H_{\text{gi}} \quad [\text{kW}] \quad (10.13)$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a gazului de gazogen ars:
 $Q_{\text{sg}} = B D_{\text{ga}} c'_{\text{g}} t'_{\text{g}} \quad [\text{kW}] \quad (10.14)$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a aerului necesar arderii:
 $Q_{\text{sla}} = B D_{\text{ga}} L c'_{\text{pl}} t'_{\text{l}} \quad [\text{kW}] \quad (10.15)$

- fluxul termic determinat de căldura sensibilă a aerului de diluție:
 $Q_{\text{slid}} = D_{\text{ld}} c'_{\text{pld}} t'_{\text{ld}} \quad [\text{kW}] \quad (10.16)$

în care: D_{ga} - reprezintă cantitatea de gaz de gazogen anhidru arsă în vederea furnizării fluxului termic necesar gazificării unității de cărbune, în $\text{m}^3\text{N/kg}_c$;

c'_{g} - căldura specifică a gazului de gazogen anhidru la intrarea în focar, în $\text{kJ/m}^3\text{N K}$;

t'_{g} - temperatura gazului de gazogen anhidru la intrarea în focar, practic temperatura de ieșire din scruber, în $^{\circ}\text{C}$;

L - aerul necesar arderii în exces a unității de gaz de gazogen, determinată funcție de compoziția gazului anhidru pe baza bilanțului material al arderii, în $\text{m}^3\text{N/m}^3\text{N}_g$;

c'_{pl} - căldura specifică a aerului necesar arderii, în kJ/m³N K, determinată funcție de t'_i temperatura de ieșire din preîncălzitorul aerului de combustie;

D_{id} - debitul aerului de diluție, în m³N/s, determinat din bilanțul termic al preîncălzitorului aerului de diluție;

c'_{pld} - căldura specifică a aerului de diluție, în kJ/m³N K, determinată funcție de t'_{id} temperatura de ieșire din preîncălzitorul aerului de diluție.

Fluxul termic util este determinat de căldura sensibilă a gazelor de ardere furnizate de focarul ciclonei ca suport termic al proceselor endoterme de gazificare, determinat pe baza parametrilor adoptați la bilanțul gazogenului, conform relației:

$$Q_{sga} = B V_{ga} c'_{pga} t'_{ga} \quad [\text{kW}] \quad (10.17)$$

Bilanțul termic al focarului ciclonei trebuie să țină cont de pierderile specifice:

- pierderea datorită arderii incomplete din punct de vedere chimic ($Q_{ard inc}$), estimată la maxim 0,5-1 % datorită caracteristicilor favorabile ale cineticii și stabilității arderii gazului de gazogen cât și a avantajelor conferite de focarul ciclonei adoptat;

- pierderea datorită schimbului termic global al învelișului izolației cu mediul ambiant (Q_{ext}), estimată funcție de calitatea izolației termice la maxim 3-5 %.

În principiu, bilanțul termic al focarului ciclonei permite determinarea fracțiunii de gaz de gazogen arse ca suport al reacțiilor endoterme de gazificare, valoarea acesteia fiind direct determinată de fluxurile recirculate datorate recuperatoarelor de căldură.

10.2.1.3. BILANȚUL TERMIC AL PREÎNCĂLZITOARELOR DE AER

Bilanțul termic al preîncălzitoarelor de aer se bazează pe egalitatea dintre fluxul termic cedat de agentul termogen primar și fluxul primit de agentul termogen secundar corijat prin prisma pierderii prin schimb termic global al învelișului izolației recuperatoarelor și mediul ambiant, având valori de 2-5 %.

Corespunzător cazului recuperatorului de preîncălzire a aerului necesar arderii, agentul termogen primar îl constituie gazul de gazogen, a cărui parametrii termodinamici și de compoziție sunt furnizați de modelul matematic al gazificării și de bilanțul termic al gazogenului. Agentul termogen secundar îl reprezintă aerul de combustie, a cărui debit este funcție de parametrii gazificării - compoziția și temperatura gazului de gazogen, cât și de bilanțul termic al focarului ciclonei - necesarul fluxului termic. În principiu, bilanțul termic al recuperatorului servește la determinarea temperaturii de preîncălzire a aerului de combustie.

În cazul recuperatorului de preîncălzire a aerului de diluție, agentul termogen primar îl constituie gazele de ardere evacuate din gazogen, a căror parametrii - temperatură, debit - sunt determinați de bilanțul focarului și al gazogenului. Agentul termogen secundar îl reprezintă aerul de diluție, a cărui parametrii - temperatura - sunt determinați de parametrii gazificării și de bilanțul termic al focarului ciclonei. Scopul bilanțului termic al recuperatorului îl constituie determinarea debitului aerului de diluție.

10.2.1.4. PROGRAM DE CALCUL AUTOMAT AL BILANȚULUI TERMIC

Calculul analitic al bilanțului termic al stației complexe de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este extrem de laborios datorită numeroșilor parametrii de compoziție și termodinamici care apar cât și datorită intercondiționării, pe criteriile energetice a elementelor bilanțurilor parțiale ale componentelor, determinate de dependența funcțională a agregatelor stației complexe de gazificare a

cărbunilor. Practic, nu pot fi efectuate independent bilanțurile termice parțiale ale agregatelor stației, ceea ce implică analiza bilanțului global care conduce la un sistem de ecuații neliniar având ca necunoscute debitele specifice, parametrilor termodinamici și temperaturile intermediare ale agenților termogeni. De asemenea, în vederea unei analize, cât mai complexe, pe criteriile eficienței energetice a gazificării cărbunilor autohtoni cu umiditatea proprie, apare ca necesară efectuarea bilanțului termic a stației complexe de gazificare pentru diferite calități de cărbuni, în condiții diferite ale parametrilor de gazificare.

Analiza corelării funcționale a agregatelor stației complexe de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie în vederea calculului bilanțului termic global indică principalele necunoscute:

- fluxul termic necesar gazificării furnizat de focarul industrial;
- debitul fracțiunii de gaz de gazogen ars în focarul industrial;
- debitul aerului de diluție utilizat la diluția gazelor de ardere la ieșirea din focarul industrial;
- temperatura de preîncălzire a aerului de combustie rezultată în urma recuperării unei fracțiuni din căldura sensibilă a gazului de gazogen.

În consecință, bilanțul termic global al stației complexe de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie este descris de un sistem de 5 ecuații neliniar întrucât apar produse debit - entalpie care la rândul ei este funcție de gradul 3 de temperatură. De asemenea bilanțul termic al recuperatorului aerului de diluție permite determinarea analitică a temperaturii gazelor de ardere evacuate la coșul de fum, aceasta reprezentând un parametru care indică corectitudinea întocmirii bilanțului termic prin compararea cu valorile tehnic recomandate.

În concluzie, datorită complexității aparatului matematic cât și în vederea asigurării posibilității analizei calității cărbunelui și a parametrilor de gazificare, apare ca necesară elaborarea unui program de calcul automat al bilanțului termic al stației complexe de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie, prezentat în anexa nr. 5.

Programul de calcul automat permite determinarea analitică a tuturor elementelor semnificative ale parametrilor funcționali și ai bilanțului material corespunzător fiecărui agent termogen cât și bilanțul termic a fiecărui agregat atât raportat la unitatea de cărbune cât și corespunzător sarcinii utile a stației complexe de gazificare. De asemenea sunt indicate randamentele corespunzătoare fiecărui agregat cât și eficiența totală a stației globale ceea ce oferă suportul măsurilor tehnice de majorarea a eficienței acestora.

Pe baza programului de calcul anterior prezentat rezultă eficiențe termice globale ale stației complexe de gazificare a cărbunilor în domeniul 64,3-68,4 %.

10.2.2. ANALIZA COMPARATIVĂ A TERMOFICĂRII CU GAZIFICAREA CĂRBUNILOR

Producerea căldurii în cadrul unei centrale termice utilizând cărbuni, în principal cărbuni inferiori, în contextul actualelor cerințe de protecție a mediului ambiant conduce la reorințarea principiilor de amplasare a acestora. Corespunzător cazului combustibililor lichizi sau gazoși este rațională amplasarea centralei termice în interiorul zonei urbane, în centrul de greutate al consumului, în vederea diminuării pierderilor termice și energetice la transportul agentului termogen și totodată pentru reducerea investițiilor. Utilizarea cărbunilor inferiori implică amplasarea centralei termice distanțat față de centrele urbane, în zonele periferice sau în exterior. În cazul existenței în imediata vecinătate a exploatărilor carbonifere - la distanțe de până la 10-30 km - apare ca rațională amplasarea centralei termice în apropierea zăcămintului și transportul agentului termogen consumatorului, datorită efectelor

economice determinate de transportul cantităților masive de cărbune și cenușă precum și în vederea evitării poluării directe a atmosferei urbane.

În consecință, apare ca rațională gazificarea cărbunilor în imediata vecinătate a zonei de exploatare, transportul gazului de generator rezultat spre consumator, urmată de arderea acestuia în vederea preparării agentului termogen necesar încălzirii și în scopuri menajere. Astfel, apa caldă este produsă într-o centrală termică dispusă în centrul de greutate al consumatorilor, după transportul printr-o rețea de conducte a combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor.

Analiza caracteristicilor arderii gazului de gazogen indică comportarea favorabilă a acestuia, determinată de viteza ridicată de propagare a frontului flăcării și a stabilității arderii, conferite de conținutul relativ ridicat de hidrogen. În consecință, este posibilă estimarea, prin metoda indirectă a randamentului agregatului de cazan pe baza ponderii pierderilor specifice combustibililor gazoși. Pierderile prin ardere naturale, datorită vitezei sporite de propagare a frontului flăcării precum și a temperaturii reduse de aprindere ale oxidului de carbon și în special a hidrogenului. Pierdere datorită evacuării gazelor de ardere la temperaturi ridicate la coș este determinată practic de regimul transferului termic al cazanului, respectiv pierdere prin schimb termic global cu mediul ambiant este datorată calității izolației termice. În consecință, randamentul termic al agregatului de cazan utilizând gaz de gazogen este practic similar variantei cu gaze naturale, înscriindu-se în domeniul 88-91 %.

În conformitate cu eficiența termică globală a stației de gazificare a cărbunilor - 64,3-68,4 %, urmată de transportul la distanță a gazului de gazogen, coroborată cu randamentul agregatului de cazan - 88-91 %, rezultă eficiența termică globală a instalației complexe de termoficare, prezentată sintetic sub forma diagramei Sankey, în figura 10.3. Astfel, eficiența termică globală a termoficării bazate pe gazificarea

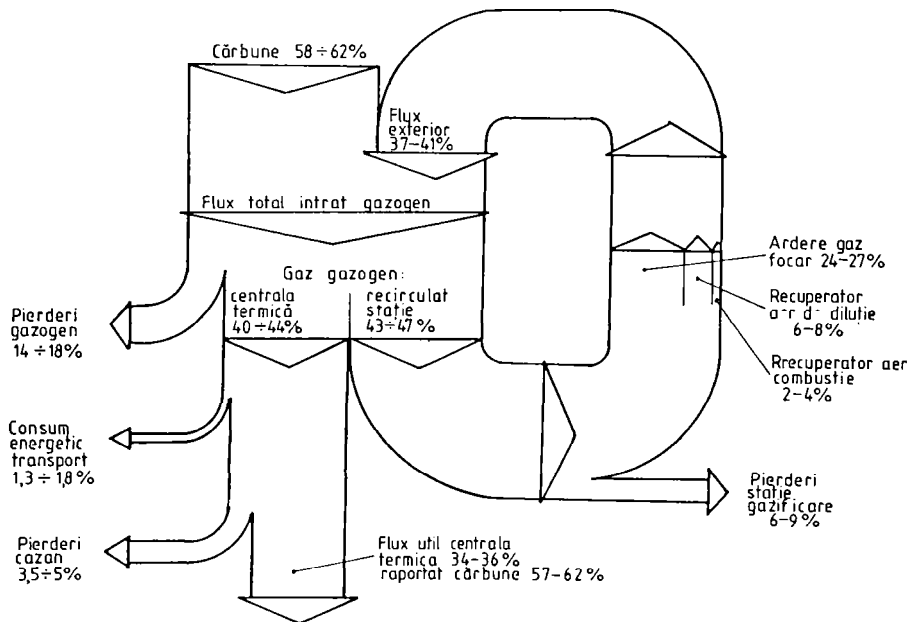


Figura 10.3. Bilanțul termic global al termoficării bazate pe gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie - diagrama Sankey

cărbunilor cu umiditatea proprie ia valori de 57,5-62,4 %. De menționat, consumul energetic solicitat de transportul combustibilului gazos de până la 1,3-1,8 % din sarcina termică utilă pentru distanțe de 20 km, conducând la eficiențe termice globale de 55,7 - 60,3 %.

În vederea analizei comparative s-a adoptat varianta unei centrale termice pentru termoficare urbană utilizând cărbuni inferiori amplasată în zona exploatării carbonifere. Agregatele minim necesare centralei termice constau în cazanele de apă fierbinte cu instalațiile anexe de transport și preparare - uscare, concasare, sortare - a cărbunelui și cenușii, stația de desprăfuire a gazelor rezultate ale arderii, precum și utilajele necesare preparării apei dedurizate, pompării, distribuției respectiv colectării agentul termogen. Rețeaua de termoficare servind transportului și distribuției energiei termice cuprinde pe lângă rețeaua propriu-zisă de conducte și stații intermediare de pompare și puncte termice care permit prepararea apei calde de încălzire și menajere precum și distribuția spre consumatori.

Eficiența termică a instalației complexe de termoficare bazată pe arderea cărbunelui este determinată de randamentul cazanelor de producere a apei fierbinți, de eficiența rețelei de transport și a schimbătoarelor de căldură din punctele termice. Cazanele autohtone de producere a apei fierbinți, în cazul arderii în strat a lignitului au randamente în gama 70-73 %, respectiv în cazul arderii în suspensie randamentele urca la 80-82 %. Randamentul termic al rețelei de transport este determinat de fluxul termic cedat mediului ambiant, caracterizat de pierderea de temperatură pe unitatea de lungime a rețelei. Astfel, în cazul apei fierbinți având temperatura de tur de 150 °C, s-a considerat pierderea termică specifică de 1-1,5

°C/km, respectiv în cazul temperaturii de re.u. de 70 °C pierderea specifică este de 0,4-0,8 °C/km. Prepararea apei calde în punctele termice se realizează cu o eficiență de term. a. ... randamentul termic al schimbătoarelor de căldură, estimat la 95-97 %.

Pe baza randamentelor termice ale cazanului de preparare a apei fierbinți, a rețelei de termoficare și a schimbătoarelor de căldură s-a estimat eficiența globală a instalației complexe de termoficare pentru diferite distanțe de transport a fluidului termogen, valorile medii fiind prezentate sub forma diagramei Sankey în figura 10.4.

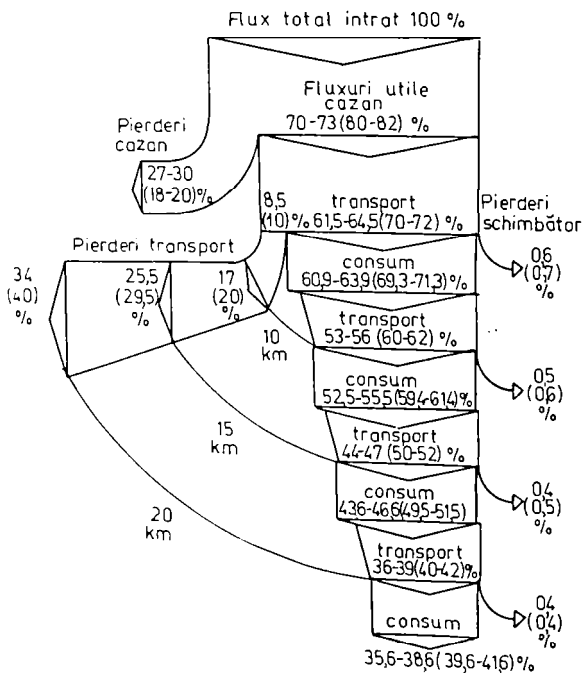


Figura 10.4 Bilanțul termic global al termoficării bazat pe arderea cărbunilor în strat (în suspensie) - diagrama Sankey

Diagrama Sankey evidențiază corelarea inversă a eficienței termice globale a termoficării cu distanța de transport a agentului termogen, distanțele ridicate fiind justificate doar prin prisma efectelor asupra mediului ambiant predominante față de eficiența termică.

Analiza comparativă - pe criteriul eficienței termice globale - a termoficării și gazificării cărbunilor necesită evidențierea variației randamentului termic global funcție de distanța de transport a agentului termogen, prezentată în figura 10.5. Ținând cont de randamentul termic global al sistemelor de încălzire centrală bazate pe combustibilul gazos rezultat în urma gazificării cu umiditate proprie a cărbunilor la presiune normală apar avantaje economice față de termoficarea clasică, cu ardere în strat pentru distanțe de peste 4,3 - 8,8 km, respectiv în cazul arderii în suspensie pentru distanțe de peste 8,5-13,2 km.

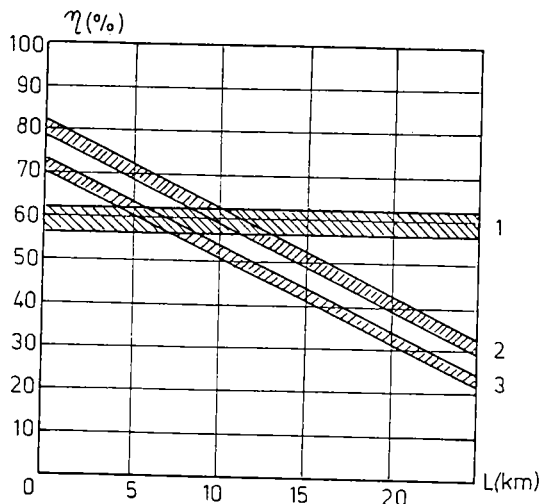


Figura 10.5. Variația eficienței termoficării funcție de distanță
 1 - gazificare cu umiditate proprie;
 2 - termoficare CAF ardere în suspensie
 3 - termoficare CAF ardere în strat

Analiza comparativă a termoficării clasice comparativ cu cazul termoficării bazate pe gazificarea cărbunilor evidențiază domeniile de aplicabilitate ale acestora, pe considerentul eficienței termice globale. Concluziile definitive necesită și analiza economică a investițiilor - sensibil majorate în cazul utilizării gazificării cărbunilor, comparativ cu posibilitățile de amortizare ale acestora, prin prisma eficienței termice sporite și a diminuării cheltuielilor de transport a cantităților masive de cărbune și cenușă. De asemenea trebuie să se țină cont și de impactul ambelor variante asupra mediului ambiant.

10.3. CICLU MIXT DE PRODUCERE A ENERGIEI ELECTRICE UTILIZÂND GAZIFICAREA SUB PRESIUNE A CĂRBUNILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

10.3.1. GENERALITĂȚI

Prin prisma necesităților mereu crescânde de energie s-a impus orientarea fermă spre variantele tehnologice de producere a energiei electrice cu eficiență sporită, deci implicit spre consumuri specifice reduse. Având în vedere puterea mereu crescândă a agregatelor de turbine de abur, o ameliorare oricât de mică a randamentului acestora are implicații importante în economia de combustibil.

Variantele moderne, optimizate de producere a energiei electrice presupun utilizarea ciclului mixt, lucrul mecanic tehnic obținându-se atât prin destinderea aburului supraîncălzit într-o turbină de vapori, cât și prin destinderea gazelor rezultate ale arderii sub presiune a combustibilului într-o turbină de gaze, ceea ce determină o creștere a randamentului termic odată cu reducerea considerabilă a gabariturii instalațiilor și implicit a investițiilor.

În actualele condiții tehnologice cea mai tentantă posibilitate de implementare a combustibililor solizi în vederea producerii energiei electrice utilizând ciclul mixt, o constituie gazificarea sub presiune a cărbunilor. Mențione aparte merită centrala termoelectrică de 170 MW de la Lunen-Germania, dotată cu 5 generatoare în strat sub presiune Lurgi - tipul Mark V și cea de la Barstow - S.U.A. de 90 MW care utilizează combustibilul produs prin gazificarea sub presiune în pat antrenat conform tehnologiei Texaco în varianta RuhrKohle A.G. - Ruhrchemie (R.A.G.-R.C.H.) în vederea producerii energiei electrice pe baza ciclului mixt. De o importanță deosebită, o constituie centrala termoelectrică de la Puertollano - Spania, bazată pe gazificarea a 2.500 t cărbune zilnic și având o putere instalată de 320 MW pe baza pe ciclului mixt al aburului și gazelor de ardere. Proiectul intră în exploatare în 1998-1999, fiind rezultatul colaborării dintre Krup - Koppers care a pus la dispoziție generatoarele în pat antrenat Prenflo și Babcock care contribuie cu agregatele energetice / 10.2 /.

În consecință apare ca rațională analiza unor variante funcționale ale ciclului mixt obținut prin combinarea ciclurilor: gazului de generator - rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, a gazelor de ardere și a aburului. Energia electrică poate fi produsă pe baza gazului de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, fie prin arderea la presiune normală după o prealabilă desprăfuire, purificare și destindere într-o turbină de gaze, fie prin arderea sub presiune urmată de destinderea ulterioară a gazelor de ardere, fie prin combinarea celor două variante. Arderea directă în focarul cazanelor de tipul Velox este realizabilă în cazul unor presiuni reduse de gazificare, respectiv presiunile ridicate de gazificare necesită destinderea prealabilă a gazului de generator la limitele impuse de solicitările mecanice ale generatoarelor de abur, fiind un caz particular al combinării primelor două variante. În cazul arderii sub presiune, aceasta se realizează în camera de ardere a unei instalații de turbine de gaze urmată de destinderea gazelor arse în turbină de gaze și recuperarea căldurii sensibile a acestora pentru producerea aburului supraîncălzit.

10.3.2. CICLU MIXT CU TURBINĂ DE DETENTĂ A GAZULUI DE GAZOGEN ȘI ARDERE LA PRESIUNE ATMOSFERICĂ

Gasul rezultat din stația de gazificare (v. cap. 8.2, fig. 8.3) în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, după o prealabilă desprăfuire și purificare, parcurge ciclul mixt prezentat schematic în figura 10.6. În urma obținerii gradului de desprăfuire dorit, are loc destinderea gazului de generator de la presiunea de gazificare la cea normală într-o turbină de gaze (10), după care o fracțiune a gazului destins accede în focarul stației de gazificare în vederea furnizării suportului termic al proceselor endoterme de gazificare. Restul gazului de gazogen împreună cu aerul necesar arderii, a cărui circulație este activată prin intermediul ventilatorului (8), acced în focarul generatorului de abur energetic (9), în vederea producerii aburului supraîncălzit care parcurge ciclul Rankine-Hirn, producându-se energie electrică prin destinderea aburului în turbină de vaporii. Schema ciclului mixt anterior prezentată realizează inserierea instalației de turbină de gaze cu turbină de vaporii fără suprapunerea termodinamică a ciclului gazelor cu cel al aburului.

În urma calculului analitic al bilanțului energetic global aferent ciclului mixt cu arderea gazului de generator la presiune normală, ținând cont de lucrul mecanic tehnic generat în turbină de gaze și cea de abur, rezultă randamentul global de circa 29,5 - 29,5 - 30,5 %, care depășește cu puțin cazul clasic al unei centrale termoelectrice funcționând cu combustibili solizi. Ciclul Rankine-Hirn al aburului este de tipul celor din centralele termoelectrice de mare putere și atinge randamente termice de 44-46 % datorită particularităților legate de:

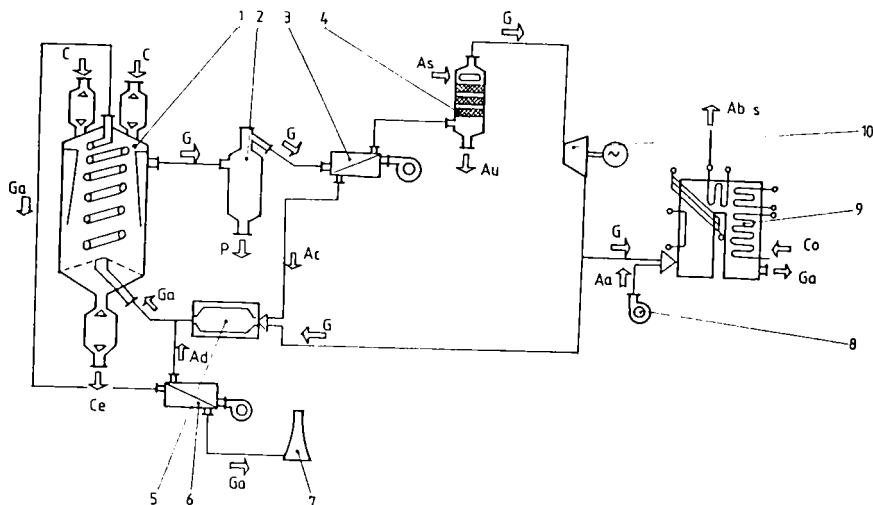


Figura 10.6. Ciclu mixt cu turbină cu detentă a gazului de gazogen și ardere la presiune ambiantă

- 1 - gazogen cu umiditate proprie; 2 - ciclon; 3 - preîncălzitor aer combustie; 4 - scruber
 5 - focar ciclon; 6 - preîncălzitor aer diluție; 7 - coș fum; 8 - ventilator; 9 - generator de abur;
 10 - turbină destindere gaz de gazogen

Aa - aer ardere; Abs - abur supraîncălzit; Ac - aer ardere preîncălzit; Ad - aer diluție;
 As - apă de spălare; Au - apă uzată; C - cărbune; Ce - cenușă; Co - condens;
 G - gaz de gazogen; Ga - gaze de ardere P - praf

- posibilitatea utilizării parametrilor înalți ai aburului supraîncălzit și de asemenea a supraîncălzirilor intermediare a aburului parțial destins;

- posibilitatea preîncălzirilor regenerative ale apei de alimentare prin recuperarea căldurii latente de condensare a aburului de medie presiune prelevat de la prizele de contrapresiune ale unei turbine de vapori în trepte;

- posibilitatea recuperării căldurii sensibile a gazelor de ardere la ieșirea din generatorul de abur pentru preîncălzirea aerului necesar arderii.

Majorarea randamentului global al ciclurilor mixte este realizabilă, conform indicațiilor oferite de bibliografia de specialitate, prin arderea sub presiune a gazului de generator într-un cazan de abur sau în camera de ardere a turbinei de gaze. Majorarea randamentului este determinată practic de mărirea ponderii lucrului mecanic tehnic dezvoltat prin destinderea gazelor rezultate ale arderii în turbina de gaze în detrimentul celei de vapori.

10.3.3. CICLU MIXT CU DETENTĂ PARȚIALĂ A GAZULUI DE GAZOGEN ȘI ARDEREA SUB PRESIUNE ÎNTR-UN GENERATOR DE ABUR URMATĂ DE DESTINDEREA GAZELOR ÎN TURBINA DE GAZE

Gazul de gazogen produs în stația de gazificare după o prealabilă desprăfuire și purificare, parcurge ciclul mixt prezentat schematic în figura 10.7.

În vederea furnizării suportului termic necesar gazificării cu umiditate proprie o fracțiune din gazul de generator produs se destinde de la presiunea de gazificare la cea normală într-o primă turbină de gaze (8) după care accede în focarul stației de gazificare. Restul gazului de gazogen având presiunea rezultată în urma gazificării se destinde în cea de-a doua turbină de gaze (9) până la o presiune de circa 10 bar, după care are loc arderea sub presiune în focarul generatorului de abur energetic de

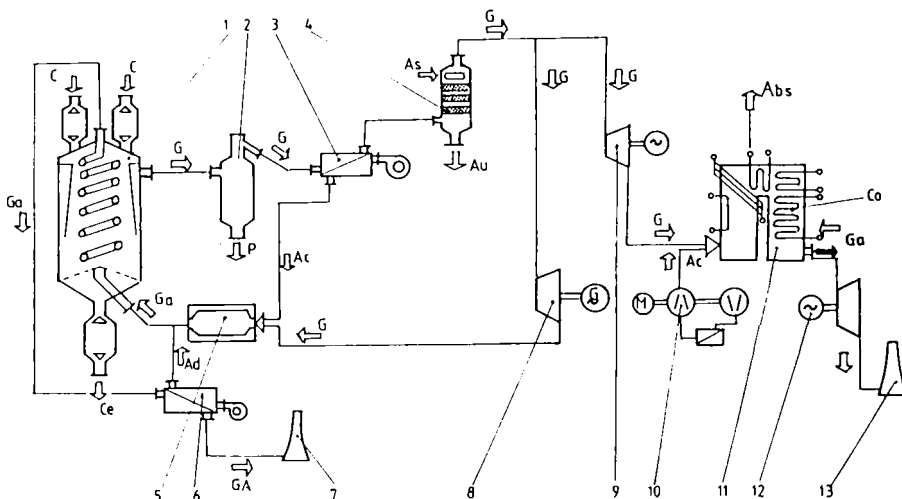


Figura 10.7. Ciclu mixt cu turbină cu detentă parțială a gazului de gazogen și ardere sub presiune într-un cazan tip Velox urmată de destinderea gazelor de ardere

1 - gazogen cu umiditate proprie; 2 - ciclon; 3 - preîncălzitor aer combustie; 4 - scruber
 5 - focar ciclon; 6 - preîncălzitor aer diluție; 7,13 - coș fum; 8,9 - turbină destindere gaz de gazogen;
 10 - compresor aer combustie; 11 - generator de abur; 12 - turbină destindere gaze de ardere
 Ac - aer combustie, Abs - abur supraîncălzit; Ad - aer diluție; As - apă de spălare; Au - apă uzată;
 C - cărbune; Ce - cenută; Co - condens; G - gaz de gazogen; Ga - gaze de ardere; P - praf;

tipul Velox (11). Aerul necesar combustiei având o presiune de circa 10 bar este furnizat de o stație de compresoare cu două etaje și răcire intermediară (10). Gazele rezultate ale arderii sub presiune parcurg generatorul de abur (11), cedând o fracțiune din căldura lor sensibilă în vederea obținerii aburului supraîncălzit care parcurge ciclul Rankine-Hirn. Gazele de ardere având presiuni de circa 10 bar și temperaturi relativ ridicate se destind până la presiunea ambiantă în cea de-a treia turbină de gaze (12), urmând a fi evacuate la coșul de fum (13).

Bilanțul energetic global al ciclului mixt anterior prezentat s-a întocmit pe baza lucrului mecanic dezvoltat în urma destinderii gazului de generator - în turbinele de gaze (8) și (9), a destinderii gazelor rezultate ale arderii sub presiune în turbina de gaze (12) și de asemenea prin destinderea aburului supraîncălzit în turbina de vapori aferenta ciclului Rankine-Hirn. De asemenea, s-a ținut cont de energia consumată cu comprimarea aerului necesar arderii sub presiune. În consecință, analiza bilanțului termic permite evaluarea randamentelor termice globale la circa 32 - 33 %, sensibil majorate față de centralele termoelectrice bazate pe arderea cărbunilor.

Schema ciclului mixt, anterior prezentată, permite realizarea unei întrepătrunderi strânse a celor două tipuri de instalații, instalațiile de turbine de gaze cu turbina de vapori, dar suprapunerea termodinamică a ciclurilor se referă numai la o fracțiune din căldura gazelor de ardere evacuate din turbina de gaze care poate fi utilizată la preîncălzirea apei de alimentare a generatorului de abur.

Ciclul aburului utilizat în această shemă se caracterizează prin următoarele particularități:

- posibilitatea asigurării parametrilor înalți de presiune și temperatură ai aburului supraîncălzit;

- posibilitatea supraîncălzirii intermediare a aburului parțial destins într-o turbina de vapori cu mai multe trepte;
 - imposibilitatea recuperării căldurii sensibile a gazelor de ardere la ieșirea din turbina de gaze pentru preîncălzirea aerului necesar arderii, fapt ce obligă la preîncălzirea apei de alimentare cu gaze de ardere, prin aceasta reducându-se numărul treptelor și parametrii preîncălzirii regenerative cu abur de la prizele turbinei. În consecință, cele două trepte de preîncălzire a apei - preîncălzirea regenerativă cu abur și preîncălzirea cu gaze de ardere destinse - se pot lega în serie sau în paralel;
 - preîncălzirea cu abur într-un preîncălzitor de joasă presiune și înlocuirea preîncălzitorului de înaltă presiune cu un preîncălzitor având ca agent primar gazele de ardere în urma ieșirii din turbina de gaze;
 - dezvoltarea a două linii de preîncălzire în paralel: una pentru o parte din debitul condensului cu abur prelevat din turbina de vapori și cealaltă cu gaze de ardere;
 - combinarea celor două scheme.
- Datorită preîncălzirilor regenerative limitate, ciclul aburului va putea atinge în acest caz randamente de numai 40-41 %.

10.3.4 CICLU MIXT CU DETENTĂ PARȚIALĂ A GAZULUI DE GAZOGEN, ARDERE SUB PRESIUNE ÎN CAMERA DE ARDERE A TURBINEI DE GAZE ȘI CU UN RECUPERATOR DE ABUR URMAT DE TURBINA DE VAPORI

Ciclul mixt, prezentat schematic în figura 10.8, se deosebește de varianta anterior prezentată prin faptul ca arderea gazului de gazogen are loc în camera de

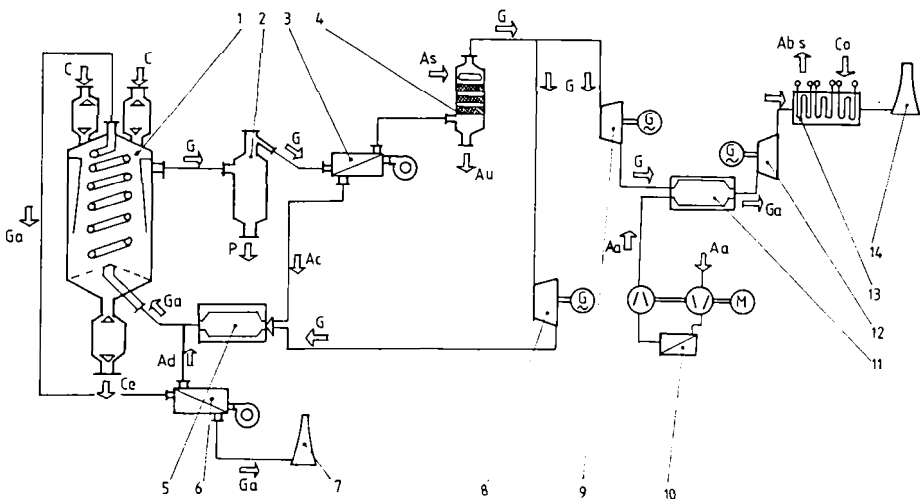


Figura 10.8. Ciclul mixt cu turbină cu detentă parțială a gazului de gazogen și ardere sub presiune în camera de ardere a turbinei de gaze și cu recuperator cu vaporizare
 1 - gazogen cu umiditate proprie; 2 - ciclon; 3 - preîncălzitor aer combustie; 4 - scrubber
 5 - focar ciclon; 6 - preîncălzitor aer diluție; 7, 14 - coș fum; 8, 9 - turbină destindere gaz de gazogen; 10 - compresor aer combustie; 11 - cameră ardere turbină de gaze;
 12 - turbină destindere gaze de ardere; 13 - recuperator cu vaporizare;
 Aa - aer ardere; Ac - aer ardere preîncălzit; Abs - abur supraîncălzit; Ad - aer diluție;
 As - apă de spălare; Au - apă uzată; C - cărbune; Ce - cenușă; Co - condens;
 G - gaz de gazogen; Ga - gaze de ardere; P - praf

ardere a unei instalații de turbine de gaze, prin aceasta ponderea lucrului mecanic tehnic dezvoltat în turbina de gaze depășește pe cel dezvoltat în turbina de vapor.

O fracțiune a gazului de gazogen produs se destinde de la presiunea de gazificare la cea normală într-o primă turbina de gaze (8) după care accede în focarul stației de gazificare în vederea furnizării suportului termic necesar gazificării cu umiditate proprie.

Restul gazului de gazogen având presiunea rezultată în urma gazificării se destinde în cea de-a doua turbină de gaze (9) până la o presiune de circa 10 bar, după care are loc arderea sub presiune în camera de ardere (11) a unei instalații de turbine de gaze. Aerul necesar combustiei având o presiune de circa 10 bar este furnizat de o stație de compresoare cu două etaje și răcire intermediară (10). Gazele rezultate ale arderii sub presiune generate în camera de ardere, după o diluție prealabilă cu aer comprimat furnizat de compresorul etajat (10), se destind până la presiunea ambiantă în turbina de gaze (12). La ieșirea din turbina de gaze, gazele rezultate ale arderii având o temperatură relativ ridicată, vor ceda o fracțiune din căldura lor sensibilă în vederea obținerii aburului supraîncălzit în recuperatorul cu vaporizare (13). Aburul supraîncălzit având parametrii termodinamici sensibili diminuați față de cazul ciclurilor clasice ale aburului parcurge ciclul Rankine-Hirn.

Analiza ciclului mixt cu arderea sub presiune a gazului de gazogen în camera de ardere a unei instalații de turbine de gaze permite obținerea de randamente globale de 38 - 41 %, sensibil majorate față de cazul unei centrale termoelectrice clasice. Această variantă reprezintă ciclul cu cea mai mare suprapunere termodinamică, fapt ce determină eficiența globală superioară, comparativ cu cazurile anterior prezentate.

Referitor la ciclul aburului trebuie remarcate următoarele particularități:

- limitarea parametrilor aburului supraîncălzit și imposibilitatea supraîncălzirilor intermediare ale aburului ca urmare a temperaturilor relativ scăzute ale gazelor de ardere la ieșirea din turbina de gaze;

- limitarea posibilităților dezvoltării preîncălzirilor regenerative a apei de alimentare a generatorului de abur, determinată practic de aceleași considerente. În consecință, ca urmare a parametrilor relativ scăzuți ai aburului supraîncălzit cât și datorită imposibilității eficientizării ciclului Rankine-Hirn, ciclul termic al aburului va avea în acest caz un randament termic limitat la 34-36 %. Totuși, datorită ponderii net majorate a lucrului mecanic tehnic dezvoltat de turbina de gaze, randamentul termic global al ciclului este superior celorlalte variante.

10.4. VALORIFICAREA CHIMICĂ A PRODUSELOR GAZIFICĂRII

Pina în anii '50, carbochimia a constituit sursa principală de materii prime pentru sinteza chimică organică, fiind utilizate următoarele procese de bază:

- gazificarea cărbunilor - permițând obținerea gazului de generator;
- hidrogenarea cărbunilor - în vederea obținerii de hidrocarburi lichide sau gazoase;

- cocsificarea - permițând obținerea gazului de cocsificare și a cocsului utilizat în metalurgie;

- sinteza carburidului.

Datorită ofensivei continue a petrochimiei, doar cocsificarea și-a menținut ponderea pe scară largă, produsele rezultate din valorificarea cărbunilor reprezentând circa 10 % din totalul materiilor prime organice. În pofida perspectivelor determinate de descoperirea de rezerve importante de hidrocarburi lichide și gazoase, zăcămintele incomparabil mai de cărbuni au determinat o nouă intensificare a cercetărilor pentru valorificarea directă a produsilor obținuți din cărbune, în special prin gazificare lor, ca

materie primă pentru industria chimică. Noile cerințe cantitative și calitative impuse de dezvoltarea industriei chimice organice de sinteză, cerințele determinate de majorarea eficienței energetice precum și reglementările tot mai stricte pentru evitarea poluării mediului ambiant au impus o reconsiderare a procedeelelor clasice și necesitatea elaborării unor tehnologii noi, adaptate cerințelor actuale.

10.4.1. UTILIZAREA GAZIFICĂRII LA SINTEZA AMONIACULUI

În principiu, sinteza amoniacului se bazează pe reacția chimică globală scrisă corespunzător stoichiometriei:



Materia primă de baza o constituie hidrogenul, a cărui producție bazată pe gazificarea cărbunilor se ridică la circa $3 \cdot 10^9 \text{ m}^3 \text{N}/\text{an}$, din care cea mai mare parte este utilizată la sinteza amoniacului. În anii '80 funcționau pe plan mondial 13 instalații pentru producerea amoniacului pe baza gazificării cărbunilor, având o producție totală de circa 4.400 t amoniac/zi.

Tehnologia de obținere a amoniacului cuprinde pe lângă gazificarea cărbunilor următoarele operații: desprăfuirea grosieră și fină a gazului brut, conversia oxidului de carbon, purificarea gazului de gazogen, în vederea eliminării bioxidului de carbon, separarea gazelor și în final sinteza amoniacului.

Purificarea gazului brut de gazogen implică eliminarea compușilor sulfului - hidrogen sulfurat și oxisulfura de carbon - și a bioxidului de carbon. Unele procedee de gazificare permit reținerea parțială a sulfului în gazogen prin aport de calcar și dolomită care fixează sulful sub forma de sulfura de calciu. Purificarea chimică a gazului brut de gazogen se bazează pe reacția componentelor sulfului cu soluția de spălare - amină, carbonat de potasiu, hidroxid de sodiu, etc. Demn de semnalat este procedeul pus la punct de Shell denumit SULFINOL care permite absorbția conținutului de hidrogen sulfurat, oxisulfura de carbon și bioxid de carbon, reziduurile rămase fiind sub 150 părți pe milion. Purificarea fizică se bazează pe legături Van der Waals, cele mai utilizate procedee fiind: PURISOL, RECTISOL și SELEXOL. De remarcat că, fracțiunea de gaz separată având un conținut ridicat ai componentelor sulfului - $\text{H}_2\text{S} + \text{COS} = 45 \%$ - poate fi prelucrată într-o instalație Claus care permite recuperarea sulfului.

Procedeul de separare a gazelor cel mai frecvent utilizat îl constituie separarea criogenică, constând în lichefierea gazului de gazogen purificat, urmată de rectificarea condensului și de spălarea cu azot sau metan lichid. Scopul separării criogenice constă în îndepărtarea metanului și obținerea fracțiunilor de oxid de carbon și hidrogen la puritatea impusă de procesele ulterioare. Lichefierea se face la temperaturi de circa 90 K, corespunzător căreia fracțiunea gazoasă rămasă constă în hidrogen cu o puritate ce depășește 98 %, având urme de oxid de carbon și metan. Obținerea hidrogenului cu puritatea dorită de sub 1 parte pe milion se poate face prin spălare cu azot sau metan lichid. Pe de altă parte, metanul și oxidul de carbon separate pot fi convertite în substituit de gaze naturale prin metanarea oxidului de carbon cu hidrogen. Urmele de diverse impurități pot fi îndepărtate în continuare prin adsorbție pe site moleculare, pe cărbune activ sau alumină.

Actualmente sinteza amoniacului bazată pe gazificarea cărbunilor nu este atractivă atât din considerente legate de consumul energetic global - în cazul cărbunelui consumul energetic global este de 52,5 GJ/t amoniac, comparativ cu cazul fracțiunilor petroliere grele 42 GJ/t amoniac, respectiv cu cazul gazelor naturale 37 GJ/t amoniac - cât și datorită investițiilor necesare sensibil mai mari în cazul utilizării ca materie primă a cărbunelui. Aceasta situație defavorabilă pentru cărbune poate fi

influențată de evoluția prețurilor pentru cărbune și de dezvoltarea unor capacități mari de producție și gazificare care să micșoreze costurile de producție.

10.4.2. UTILIZAREA GAZIFICĂRII LA SINTEZA METANOLULUI

În principiu, sinteza industrială a metanolului se bazează pe reacția exotermă a oxidului de carbon și hidrogenului:



alături de care, poate avea loc reacția:



Importanță metanolului crește enorm atât datorită utilizării sale ca materie primă în chimie cât și datorită faptului că poate fi considerat un excelent vector energetic, ceea ce a condus la creșterea continuă a producției mondiale, aceasta ajungând în anii '90 la circa $16 \cdot 10^6$ tone anual. Referitor la utilizarea ca materie primă în chimie, schema din figura 10.9, indica domeniile de utilizare cât și ponderea procentuala a acestora pentru Comunitatea Europeană.

Corespunzător utilizării ca vector energetic, alături de lichefierea metanului, fabricarea metanolului este cea mai avantajoasă cale de a transporta gazele naturale la mare distanță. Eficiența globală a ciclului transformărilor: metan (fază gazoasă) - metan (lichid) - transport la distanță în recipiente criogenici - metan (gaz) este relativ similară cu cazul utilizării metanolului: metan (faza gazoasă) - metanol (lichid) - transport în recipiente - metan (faza gazoasă).

	FORMALDEHIDĂ 51-55 %	RĂȘINI SINTETICE DEZINFECTANȚI PRODUȘI ORGANICI INTERMEDIARI
	SOLVENT 8-10 %	
METANOL	METILĂRI 29-35 %	DIMETILTEREFTALAT METACRIL DE METIL METILAMINĂ HALOGENURI DE METIL METILANILINĂ
	ALTE UTILIZARI 6-10 %	ACID ACETIC ETILENGLICOL ETENĂ ALCHENE INFERIOARE BENZINE PROCEDEUL MOBIL

Figura 10.9 Utilizarea metanolului ca materie primă în chimie, în Comunitatea Europeană

Una dintre utilizările cele mai noi ale metanolului o constituie tratarea apelor reziduale în vederea epurării lor și obținerea de proteine de către organisme monocelulare, conform tehnologiei PRUTEEN realizată de Imperial Chemical Industries - Anglia.

Procedeul clasic de sinteză a metanolului, bazat pe reacția oxidului de carbon cu hidrogenul se desfășoară în prezența catalizatorului din oxid de zinc la presiuni de 200-300 bar și temperaturi de 300-350 °C. Procedeurile moderne utilizează catalizatori

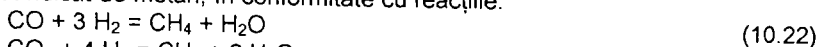
pe bază de cupru tratat cu oxid de zinc și crom la presiuni de 50-100 bar și temperaturi de 270 °C. Întrucât sinteza metanolului se bazează pe reacții exoterme, apare ca rațională utilizarea procedeeleor alloterme de gazificare a cărbunilor - ca de exemplu gazificarea cu umiditatea proprie - care ar permite recircularea în proces ca suport termic al gazificării a fluxului rezultat în urma reacțiilor de sinteză a metanolului.

Tehnologiile actuale permit obținerea metanolului din cărbune cu o eficiență termică de circa 50 %, sensibil mai mică decât în cazul obținerii din metan 60 %, respectiv pe baza fracțiunilor petroliere 55 %.

10.4.3. UTILIZAREA GAZIFICĂRII CĂRBUNILOR LA OBȚINEREA HIDROCARBURILOR

10.4.3.1. SINTEZA METANULUI

Gazul brut de gazogen permite sinteza substitutului de gaze naturale cu un conținut ridicat de metan, în conformitate cu reacțiile:

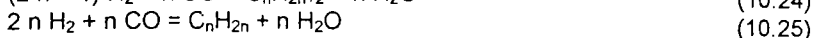
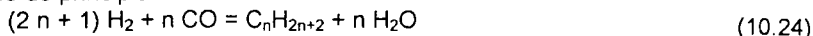


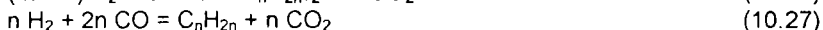
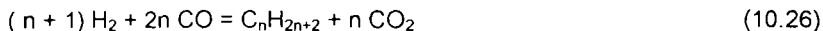
Întrucât reacțiile omogene de metanare sunt exoterme, rezultă o pierdere semnificativă de căldură și de asemenea o fracțiune importantă a hidrogenului - 25-33 % -se transformă în apă. În consecință, se tinde spre perfecționarea procedeeleor de gazificare în vederea majorării ponderii metanolului rezultat direct în gazogen, realizabilă prin favorizarea echilibrului reacției heterogene de metanare constând în presiuni ridicate de operare peste 70 bar în domeniul de temperaturi de 800-900 °C. Astfel tehnologia Lurgi și în general procedeele operând la presiuni ridicate permit obținerea directă a unei fracțiuni majorate de metan, care poate fi separat de restul componentelor gazoase și utilizat ca substitut de gaze naturale. Demn de menționat este tehnologia de gazificare catalitică EXXON (v. cap. 3.3.3) care permite obținerea unui gaz brut cu un conținut de metan de circa 41 %, care după separare criogenică permite obținerea substitutului de gaze naturale cu un conținut de metan de 99,9 %. De asemenea, mențione aparte merită tehnologiile de hidrogazificare a cărbunilor care permit producerea unui gaz brut cu un conținut de 40-55 % metan, care poate fi purificat la substitut de gaze naturale.

Tehnologiile de obținere a substitutului de gaze naturale pe baza gazificării cărbunilor indică eficiențe termice de circa 63-67 %. Corespunzător S.U.A. se consideră că, la nivelul actual de dezvoltare a tehnologiilor de gazificare și purificare a gazului de gazogen, este posibilă obținerea substitutului de gaze naturale la un preț comparabil cu cel al gazelor naturale în cazul unui preț al cărbunelui de până la 10 \$/tona. În general, substitutul de gaze naturale apare ca produs secundar în diferite procedee, care au ca scop obținerea metanolului, a benzinei sintetice, etc. și utilizarea lui ca produs finit reprezintă o soluție mai economică comparativ cu conversia sa pentru creșterea ponderii produsului principal.

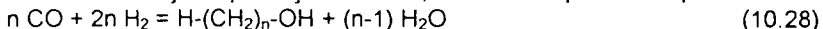
10.4.3.2. UTILIZAREA GAZIFICĂRII LA SINTEZA BENZINEI

Gazul de gazogen permite, pe baza sintezei Fischer-Tropsch obținerea unui amestec de hidrocarburi alifaticе cu catene neramificate, începând de la metan și până la parafine grele în prezența catalizatorilor pe bază de cobalt, în conformitate cu reacțiile de principiu:





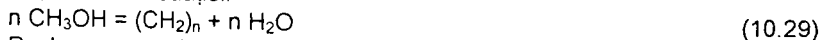
De asemenea rezultă și subproduse secundare, ca de exemplu alcoolii pe baza reacției:



Înainte și în timpul celui de-al doilea război mondial procedeul a fost aplicat pe scară largă în Germania, Franța și Japonia. Semnificativă era instalația de sinteză din Schwarzheide - Germania, construită în perioada 1935-1937 unde s-a fabricat benzină sintetică pe baza gazului de gazogen produs prin procedeul Koppers, având o capacitate de prelucrarea orară de 21 t cărbune în vederea obținerii a circa 1.400 m³N gaz de gazogen/tona cărbune. Practic prin gazificarea unui kg. de cărbune se obțineau circa 1,4 m³N gaz, care permiteau obținerea a 0,039 kg hidrocarburi gazoase, din care se separau prin distilare sub presiune benzine ușoare, uleiuri mijlocii și parafine.

Actualemente cele mai mari instalații industriale în funcțiune sunt în Africa de Sud în cadrul complexelor Sasol I - construit în ani '60 - și Sasol II - construit după 1980. Complexul Sasol I utilizează generatoare Lurgi în vederea gazificării a 4.000.000 t cărbune anual pentru producerea a circa 1.000.000 tone hidrocarburi lichide. Complexul Sasol II prelucrează 14.000.000 tone cărbune anual din care prin sinteză Fischer-Tropsch se obțin: 1.500.000 tone benzină sintetică, 240.000 tone uleiuri aromatice grele, 100.000 tone amoniac și 90.000 tone sulf. Instalațiile actuale aplică sinteza Fischer-Tropsch în pat fix cu catalizator de cobalt sau în pat fluidizat în prezența catalizatorului pe baza de fier.

Un procedeu modern de fabricare a benzinei sintetice - MOBIL-OIL - se bazează pe transformarea metanolului în contact cu aluminosilicați (zeoliți) într-un amestec de hidrocarburi grele. Reacția globală simplificată, se desfășoară la presiuni de 10-20 bar și temperaturi de 350-400 °C, constând practic în deshidratarea metanolului, conform ecuației:



Pe baza procedurii MOBIL-OIL din 2,44 litri metanol se obține 1 litru de benzină sintetică cu cifra octanică 90-100, ea putând fi utilizată direct fără o prelucrare suplimentară ulterioară. Experiența acumulată indică superioritatea procedurii MOBIL-OIL comparativ cu sinteza Fischer-Tropsch, în principal datorită posibilității obținerii de produși secundari valoroși (în special S.N.G.), precum și datorită selectivității, calității superioare a benzinei și nu în ultimul rând a prețului de cost diminuat cu circa 25 %.

10.4.3.3. UTILIZAREA GAZIFICĂRII LA OBȚINEREA ALCHENELOR

Un deosebit interes îl prezintă posibilitatea obținerii din cărbune a alchenelor, în primul rând a etenei - materie primă petrochimică prețioasă în special pentru producerea detergenților. Alchenele - hidrocarburi în domeniul C₁₀ - C₁₈ - pot fi obținute pornind de la sinteza Fischer-Tropsch în urma cracării cu abur a unor fracțiuni de hidrocarburi lichide. În prezent sunt cercetări în vederea găsirii unor noi catalizatori pe bază de fier, managan cu adaosuri de titan, molibden, wolfram, metale alcaline, etc.

Producerea pe baza gazificării a alchenelor este posibilă pornind de la metanol, fie prin cracarea eterului dimetilic fie prin omologarea metanolului. Corespunzător primului caz, în primă etapă are loc deshidratarea metanolului în vederea obținerii eterului dimetilic, urmată de cracarea eterului în prezența catalizatorilor de tipul zeoliților, conducând la sinteza alchenelor. Omologarea metanolului constă în carbonilarea alcoolului metilic pentru sinteza de alcool etilic și alcoolii superiori, urmată de deshidratarea etanolului pentru obținerea etenei. Studiile

au prefigurată instalații cvasiindustriale care permit producerea a 450.000 t/an etenă, 140.000 t/an acid acetic, 70.000 t/an propenă și 30.000 t/an n-butanol, la un preț majorat cu circa 15 % comparativ cu cracarea hidrocarburilor lichide.

10.4.3.4. UTILIZAREA GAZIFICĂRII LA OBȚINEREA HIDROGENULUI ȘI HIDROGENARI

Gazul de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor poate fi utilizat în vederea obținerii hidrogenului, materie primă valoroasă pentru diferite hidrogenări care permit obținerea unei game largi de hidrocarburi.

În vederea obținerii hidrogenului, gazul brut de gazogen parcurge următoarele transformări principale: absorbția compușilor sulfului, conversia oxidului de carbon la bioxid de carbon, absorbția bioxidului de carbon, urmată de îndepărtarea catalitică a urmelor de oxid și bioxid de carbon.

Hidrogenul rezultat pe baza gazificării cărbunilor este o materie primă prețioasă în chimie în cadrul diferitelor procedee de hidrogenări:

a - procedeul Bergius, perfecționat de Pier, permite hidrogenarea cărbunelui amestecat cu uleiuri grele în fază lichidă (presiuni de 200 bar, temperaturi de 430 °C), urmată de hidrogenarea în fază gazoasă a uleiurilor mijlocii și grele rezultate, pentru obținerea benzinei sintetice. Procedeul a fost aplicat la scara industrială în Germania până în 1945 cu o eficiență termică de 56 %, obținându-se o tonă de benzina pe baza a 2.500 m³N hidrogen;

b - hidrogenarea substanțelor nesaturate - de exemplu gudroane (presiuni 220-300 bar, temperaturi 270-450 °C, catalizatori sulfuri de wolfram, nichel sau molibden), permițând prin distilare fracționată obținerea unei benzine ușoare, a motorinei și a parafinelor;

c - hidrogenarea uleiurilor ușoare cu conținut ridicat de componente aromatice rezultate din cocsificare sau gazificare sub presiune (presiune 70-80 bar, temperatură 350-550 °C, catalizator de molibden-nichel-aluminiu), prin distilare extractivă separându-se diferite fracțiuni aromatice;

d - hidrogenarea completă a hidrocarburilor aromatice policondensate permite obținerea de produși care prin piroliză la 700 - 950 °C formează hidrocarburi aromatice ușoare: benzen și etenă.

Unul dintre cele mai moderne procese de lichefiere a cărbunilor îl reprezintă hidrocarburearea acestora ceea ce oferă posibilitatea obținerii din cărbuni a cărburanților lichizi și a altor hidrocarburi utilizate ca materie primă în industrie. Hidrocarburearea constă dintr-o piroliză a cărbunelui în prezența hidrogenului la presiuni de până la 70 bar și temperaturi în gama 500-600 °C. Instalații demonstrative, având posibilități de prelucrare de până la 300 t/zi, indică eficiențe de până la 61 %, care pot fi majorate la 73 % în cazul utilizării cocsului rezidual în vederea producerii hidrogenului. În urma lichefierii cărbunelui rezultă substanțe gazoase naturale, benzină sintetică, motorină, precum și o fracțiune de benzen-toluen-xileni. Rezultatele încurajatoare ale cercetărilor preconizează construirea unui pilot de dimensiuni cvasiindustriale cu capacitatea de lichefiere zilnică de până la 50.000 t. cărbune.

De menționat, cercetările de hidrolichefiere a cărbunilor care reprezintă practic o dezvoltare a procedeeului Bergius, perfecționat de Catalytic Incorporated - S.U.A., desfășurându-se la presiuni de 120 bar și temperaturi de 400 °C în prezența unui

solvent în vederea obținerii unor produși bogați în hidrocarburi aromatice. Prin asocierea hidrolichiefierii cu sinteza Fischer-Tropsch se pot obține într-o proporție ridicată hidrocarburi saturate utilizate ca materii prime în chimie și combustibili lichizi.

10.4.3.5. CONCLUZII

Stadiul actual al cercetărilor și exploatarea instalațiilor pilot sau demonstrative indică că utilizarea cărbunilor în cadrul chimiei gazului de sinteză se face în prezent doar în țările dezvoltate care dispun de resurse de cărbune ușor de exploatat la un preț de cost scăzut sau care dispun de rezerve petroliere neglijabile. Economicitatea producerii de materii prime pentru chimie este determinată direct de posibilitatea obținerii la prețuri convenabile a gazului de gazogen, eficiența gazificării determinând practic caracterul economic al procesului global.

Transformarea combustibilului inițial - cărbune, hidrocarburi lichide sau gazoase - în gaz de sinteză este cu atât mai costisitoare cu cât raportul atomic C/H al materiei prime este mai mare, costurile fiind determinate de numărul majorat al etapelor de operare. Corespunzător gazelor naturale acest raport atomic în masă este C/H = 2,96, crescând la 24 în cazul cărbunilor, între aceste extreme situându-se hidrocarburi lichide. Demn de remarcat că, tocmai cărbunii inferiori - ligniții sunt caracterizați printr-o reactivitate ridicată, utilizarea acestora prin gazificare și chimizare ulterioară fiind în principiu convenabilă față de utilizarea convențională drept combustibil. Pe de altă parte, corespunzător hidrogenării cărbunilor trebuie realizat un compromis între reactivitatea ridicată a ligniților dar și consumul mare de hidrogen necesar eliminării sub formă de apă a oxigenului din cărbune, comparativ cu cazul huilelor caracterizate printr-o reactivitate scăzută dar și prin conținutul scăzut al oxigenului cu efecte favorabile asupra consumului hidrogenului.

Instalațiile de prelucrare ulterioară, prin sinteza chimică a gazului de gazogen au un grad ridicat de perfecționare, fiind caracterizate prin obligativitatea unei compoziții bine definite și constante a gazului de gazogen. Corespunzător prelucrării chimice ulterioare, gazul de gazogen trebuie să aibă un conținut majorat de oxid de carbon și hidrogen, realizabil prin conducerea operării gazogenului spre producții finali dorite. În consecință, pe plan mondial se observă o intensă activitate de cercetare teoretică și experimentală în vederea perfecționării procedeele actuale precum și a unei specializări a gazogenelor pentru diferite compoziții ale gazului brut, favorabile chimizării ulterioare ale acestuia.

Analiza economică a tehnologiilor de gazificare indică, că nici procedeele cele mai perfecționate nu permit obținerea combustibililor gazoși sau lichizi sintetici în condiții concurențiale cu hidrocarburi naturale. Practic, hotărâtor este raportul dintre prețul cărbunelui și cel al țițeiului, respectiv gazelor naturale, precum și gradul de disponibilitate locală sau regională a acestora. Corespunzător utilizării gazului de gazogen ca materie primă pentru chimie, costurile sunt majorate față de utilizarea hidrocarburilor naturale, dar diferența este mai mică decât în cazul producției de combustibili sintetici, cu condiția unui preț convenabil al cărbunelui. Prognozele pe termen mediu indică introducerea pas cu pas a carbochimiei bazate pe gazificarea cărbunilor în vederea obținerii materiilor prime utilizate de industria chimică. Se estimează că, în primele etape investițiile se vor orienta spre producerea gazului în vederea unei chimizări ulterioare a acestuia, respectiv producerea substitutului de gaze naturale sau a benzinei sintetice se vor dezvolta într-o etapă ulterioară, determinată de creșterea prețului hidrocarburilor naturale.

CAPITOLUL 11

CONCLUZII FINALE

Stadiul actual al gazificării cărbunilor indică preocupările intense depuse în acest domeniu în vederea valorificării superioare a cărbunilor cu scopul de a transfera combustibililor solizi o parte din proprietățile combustibililor lichizi sau gazoși. Analiza stadiului actual scoate în evidență eforturile materiale, investiția de materie primă cenușie și ingeniozitatea inginerescă depuse în vederea optimizării tehnologiilor clasice sau a creerii de procedee noi.

Evidențierea aplicabilității unor procedee de gazificare precum și identificarea eventualelor direcții de optimizare s-a realizat prin analiza teoretică detaliată a gazificării cărbunilor în strat, datorită posibilității evidențierii etapelor proceselor termochimice complexe, care în cazul gazogenului în strat se desfășoară succesiv.

11.1. CONCLUZII DESPRINSE DIN ANALIZA GAZIFICĂRII ÎN STRAT

Studiul gazificării cărbunilor în strat s-a efectuat prin determinarea influenței caracteristicilor complexe a cărbunilor și a agentului de gazificare coroborate cu parametrii de operare - temperatură, presiune. Pe baza datelor furnizate de bibliografia de specialitate s-a întocmit bilanțul material și energetic, în vederea identificării eventualelor deficiențe și a posibilelor soluții de optimizare aplicabile ligniților autohtoni.

În vederea analizei comparative cu gazificarea ligniților autohtoni cu umiditatea proprie din zăcământ, corespunzător gazificării în strat s-a elaborat un model matematic în condiții de echilibru termodinamic bazat pe analiza elementară a cărbunelui, finalizat prin două programe de calcul, funcție de utilizarea ca agent de gazificare a amestecului de aer sau oxigen cu abur. Concluziile modelului matematic evidențiază pe de-o parte influența parametrilor de operare - temperatură și presiune, asupra caracteristicilor de compoziție și energetici ai gazului brut și implicit ai procesului global (v. cap. 4.6). Pe de altă parte modelul matematic, combinat cu analiza datelor furnizate de bilanțul material și energetic, oferă elementele teoretice necesare abordării utilizării umidității proprii ca agent de gazificare.

Analiza gazificării în strat a cărbunilor indică faptul că circulația în contracurent a reactanților, în pofida avantajelor determinate de recuperarea unei fracțiuni a căldurii sensibile a cenușii la admisia agentului de gazificare, respectiv a unei părți a căldurii sensibile a gazului brut în vederea pregătirii termice a cărbunelui, are ca principal dezavantaj umiditatea ridicată a gazului brut, reflectată defavorabil de bilanțul masic și energetic al apei. Circulația în contracurent implică introducerea prin partea inferioară a generatorului, printre barele grătarului a aburului, respectiv colectarea prin partea superioară în gazul brut a umidității cărbunelui, rezultată în urma uscării sale și care în consecință nu participă la procesele complexe de gazificare. Bazat pe efectele termice ale principalelor reacții corespunzătoare stoichiometriei, rezultă că în cazul ligniților autohtoni umiditatea proprie este suficientă în vederea gazificării (lignit Rovinari $W/C^1 = 1,77$, lignit Voivozi $W/C^1 = 1,33$, comparativ cu un necesar 1,152 kg abur/kg carbon).

În consecință, apare ca rațională utilizarea schemei de circulație în echicurent a reactanților, întrucât aburul rezultat în zona de uscare prin vaporizarea umidității inițiale a cărbunelui constituie agentul de gazificare.

Combustia în interiorul generatorului a fracțiunii de semicocs sau cocs ramașă nereacționată prezintă ca principal avantaj autonomia termică a procesului, determinând însă probleme funcționale în cazul cărbunilor având temperaturi scăzute de topire a cenușii, ceea ce conduce la necesitatea răcirii stratului de cenușă sub limita de înmuiere. În consecință, aburul introdus ca agent de gazificare devine și un moderator termic determinând majorarea semnificativă a consumului cu circa 200-350 % față de condițiile stoichiometrice. În consecință, consumul ridicat de abur, într-o pondere semnificativă nedescompus, reprezintă circa 7,44-17,15 % din fluxul termic total intrat, respectiv umiditatea gazului brut circa 10,43-17,25 % din energiile ieșite, afectând defavorabil bilanțul masic și energetic al apei.

Dificultățile funcționale și consumul energetic suplimentar conduc la ideea utilizării proceselor alloterme, care datorită furnizării din exterior al fluxului termic necesar gazificării, permit conducerea facilă a operării la nivelul termic dorit. Pe de altă parte, procesele alloterme - datorită eliminării zonei de ardere din gazogen - permit obținerea unui gaz combustibil de calitate, practic lipsit de azot, care în cazul gazificării autoterme necesită utilizarea oxigenului în agentul de gazificare, conducând la cheltuieli suplimentare sensibil majorate.

În concluzie, apare ca rațională utilizarea în echicurent a umidității proprii a cărbunelui, ca agent de gazificare în cadrul unui proces alloterm bazat pe fluxul termic furnizat din exterior, obținut fie prin arderea unei fracțiuni a gazului brut produs sau a fracțiunii de semicocs ramașă negazificată, fie pe baza energiei termice furnizate de reactoarele nucleare, conform previziunilor legate de generația a III-a de generatoare.

11.2. CONCLUZII DESPRINSE DIN STUDIUL TEORETIC ȘI EXPERIMENTAL AL GAZIFICĂRII LIGNIȚILOR CU UMIDITATEA PROPRIE

Pe plan mondial primele cercetări de principiu referitoare la posibilitatea gazificării cu umiditatea proprie a cărbunilor au fost întreprinse în cadrul politehnicii din Aachen (R.W.T.H.), realizându-se mai multe tipuri de cuptoare tubulare cu transport mecanic sau în pat fluidizat a cărbunelui, urmate de varianta unui tub revoluțiv. Prepararea în cadrul procesului a agentului de gazificare din umiditatea proprie a cărbunelui este, de asemenea, caracteristică "generatorului subteran" în cazul gazificării în situ a cărbunilor.

În consecință, ținând cont de caracteristicile energetice reduse ale ligniților autohtoni apare ca rațională analiza posibilităților gazificării acestora cu umiditatea proprie. În prima etapă s-a efectuat studiul termodinamic al procesului care are menirea de a indica gradul maxim de conversie realizabil, conducând la alegerea condițiilor optime de operare. În consecință, analiza procesului termochimic complex s-a realizat prin calculul compoziției de echilibru a sistemului, pe baza bilanțului masic și energetic și pe determinarea setului de echilibre necesar și suficient pentru descrierea termodinamică a sistemului reactant, funcție de dependența lor față de temperatură și presiune.

Datele furnizate de studiul termodinamic al gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie au condus la proiectarea și realizarea a trei standuri de laborator:

Cuptorul tubular caracterizat prin transportul mecanic al cărbunelui prin intermediul unui șnec acționat manual, fluxul termic necesar gazificării fiind furnizat de mai multe rezistențe electrice. Încălzirea electrică a cărbunelui, pe lângă caracterul ei

neeconomic a creat mari dificultăți în timpul experimentărilor datorită fiabilității reduse a rezistențelor electrice. În consecință, a fost proiectat și realizat un cuptor tubular relativ similar, a cărui sistem de încălzire constă din mai multe arzătoare Bunsen dispuse diferențiat pe lungimea generatoarei, în vederea obținerii profilului termic dorit.

Cu toate avantajele transportului mecanic al cărbunelui prin intermediul unui șnecl elicoidal în cazul unor instalații de laborator, soluția nu este viabilă în cazul instalațiilor de dimensiuni industriale datorită complicațiilor deosebite legate de execuția și exploatarea instalației cât și datorită caracterului neeconomic al investiției și al consumului energetic. În consecință a fost proiectat și realizat un generator de gazificare tip cuptor înalt caracterizat prin circulația gravitațională, pe verticală a cărbunelui, fluxul termic fiind furnizat de gazele de ardere care circulă în contracurent scăldând suprafața interioară a țevii de fum.

Analiza rezultatelor determinarilor experimentale efectuate permit prefigurarea următoarelor concluzii:

a. Determinările experimentale efectuate prin intermediul cuptorului tubular și a generatorului tip cuptor înalt au dovedit posibilitatea practică a gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, evidențiindu-se stadiile proceselor fizico - chimice complexe specifice gazificării.

Determinările experimentale au confirmat posibilitatea producerii unui gaz combustibil de calitate având în general următoarea compoziție: CO^{anh} 13 - 15 %, H_2^{anh} 38 - 43 %, CH_4^{anh} 10 - 12 %, CO_2^{anh} 15 - 17 %, O_2^{anh} 4 - 6 % și N_2^{anh} 11 - 13 % și puteri calorifice inferioare de 9.500 - 10.500 kJ/m³N (2.340 - 2.508 kcal/m³N). Întrucât oxigenul și azotul provin din eventualele neetanșeități la prelevarea probelor de gaz la generator și/sau cromatograf, în condițiile neglijării conținutului acestora, rezultă compoziția corijată a gazului brut anhidru: CO^{anh} 15 - 18 %, H_2^{anh} 45 - 52 %, CH_4^{anh} 12 - 14 %, CO_2^{anh} 18 - 20 %, respectiv puterea calorifică inferioară a acestuia devine 10.700 - 11.800 kJ/m³N (2.560 - 2.820 kcal/m³N).

De menționat, conținutul relativ ridicat de metan al gazului brut, determinat de temperaturile scăzute de operare care poate fi majorat în cazul exploatării sub presiune, favorizând utilizarea gazului, după o prealabilă tratare, ca substitut de gaze naturale. Favorizarea reacției de metanare prezintă o importanță deosebită în balanța energetică a generatorului, întrucât reacția de metanare este slab exotermă, prin aceasta diminuându-se necesarul de flux termic furnizat din exterior.

O importanță deosebită o are conținutul ridicat de hidrogen al gazului brut anhidru care conduce la o comportare favorabilă din punctul de vedere al arderii, prin majorarea vitezei normale de propagare a frontului flăcării și a condițiilor de stabilitate ale arderii.

b. Bilanțul material al determinarilor experimentale indică o producție specifică de gaz anhidru de 0,82 - 0,90 m³N/kg cărbune însoțit de o cantitate de abur nereacționat de 0,10 - 0,15 kg/kg cărbune și de o cantitate de gudroane de circa 0,01kg/kg, care reprezintă un combustibil lichid cu puteri calorifice de circa 32.000 - 33.500 kJ/kg. În vederea atingerii condițiilor solicitate de echilibru, lignitul de Voivozi a fost umezit cu un exces de umiditate față de proba inițială de 0,25 - 0,4 kg/kg cărbune, rezultând o umiditate totală de 40 - 46 %.

c. Cenușa rezultată în urma gazificării cu umiditate proprie nu este inflamabilă, încercările de determinare a puterii calorifice indică un conținut de 2 - 4 % carbon.

În consecință, gazificarea cu umiditate proprie este caracterizată printr-un grad de conversie al carbonului de 88 - 93 %. De precizat că, la evacuarea din cuptor cenușa era complet sfărâmată datorită frecărilor specifice transportului mecanic prin șnecul elicoidal și în consecință nu s-a putut analiza influența granulației asupra gazificării.

d. Pe baza bilanțului energetic s-a determinat experimental necesarul fluxului termic furnizat din exterior, ca suport termic al proceselor complexe de gazificare, având valori de 3.200 - 3.450 kJ/kg cărbune, căruia îi corespunde un consum de gaz anhidru de 0,323 - 0,348 m³N/kg cărbune, respectiv ținând cont și de aportul gudroanelor consumul de gaz anhidru devine 0,291 - 0,313 m³N/kg cărbune.

e. Bilanțul energetic permite determinarea randamentului termic al gazificării corespunzător gazului anhidru rece este de 67,85 - 69,72 %, majorându-se datorită aportului caloric al gudroanelor la 70,34 - 72,51 %, respectiv în cazul gazului umed cald, ținând cont și de aportul gudroanelor, randamentul devine 81,81 - 83,43 %. De remarcat că, ponderea pierderii specifice datorită umidității gazului brut este de 4,1 - 4,3 %, net diminuată față de cazul gazificării în strat, care în plus necesită consumuri energetice suplimentare pentru prepararea aburului ca agent de gazificare.

f. Comparativ cu procedeele de gazificare clasice - utilizând ca agent de gazificare amestec de aer sau aer îmbogățit cu abur - calitatea gazului brut anhidru obținut este net superioară datorită lipsei azotului, fiind relativ similară cu cazul gazificării cu oxigen și abur, cu o pondere net diminuată a conținutului de bioxid de carbon. Față de combustibilul gazos rezultat în urma gazificării în strat a ligniților autohtoni, conform testelor efectuate cu gazogenul cu gratar rotativ la presiune normală în cadrul I.C.S.I.T.E.E Bucuresti, respectiv cu generatorul Lurgi sub presiune în cadrul SIETA - fostul I.C.S.I.T.E.E. filiala Cluj-Napoca, puterea calorifică a gazului brut anhidru rezultat în urma gazificării cu umiditate proprie este aproximativ dublă, datorită lipsei azotului din gazul brut. Calitatea gazului brut anhidru rezultat în urma experimentărilor proprii este relativ similară celui produs în urma cercetărilor întreprinse în cadrul politehnicii din Aachen (R.W.T.H.A.), având o putere calorifică cu circa 7,8 % mai mare ca în cazul cuptorului tubular cu transport pneumatic, respectiv diminuată cu circa 7,7 % față de generatorul tubular rotativ.

g. Confirmarea experimentală a posibilității gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie indică avantaje funcționale importante față de exploatarea gazogenelor în strat. Gazificarea în strat, în vederea măririi eficienței economice și a asigurării stabilității proceselor termochimice necesită preuscarea ligniților pînă la un conținut de umiditate de maxim 30 %, operație eliminată în cazul utilizării umidității proprii ca agent de gazificare. Temperaturile relativ scăzute de operare, conform determinărilor experimentale de 730 - 780 °C, nu determină aglomerarea semicocsului sau a cenușii, a cărei evitare, în cazul gazificării în strat necesită majorarea consumului de abur - ca moderator termic, în vederea menținerii temperaturii cenușii sub limita de înmuiere. Pe de altă parte, gazificarea cu umiditate proprie fiind un procedeu alloterm, permite prin modificarea facilă a fluxului furnizat din exterior obținerea parametrilor adecvați de operare.

h. Experimentele efectuate permit prefigurarea avantajelor economice reflectate de eficiența generatorului și de randamentul global al instalației complexe. Astfel, gazificarea cu umiditatea proprie este caracterizată printr-un randament majorat determinat de diminuarea netă a fluxului termic pierdut datorită umidității

gazului brut de circa 3-5 %, comparativ cu cazul gazificării în strat având valori de 10-17 %. De menționat că, prin utilizarea umidității proprii ca agent de gazificare, se elimină consumul energetic suplimentar solicitat de prepararea aburului, necesar atât ca agent de gazificare cât și ca moderator termic al stratului de cenușă. Caracterul economic al procedurii este reflectat și de gradul ridicat de conversie al carbonului de circa 88-93 %, determinat de reziduurile reduse de carbon nereacționat din cenușă.

Avantajele prefigurate de actuala fază a cercetării permite evidențierea principalelor direcții de continuare a analizei experimentale referitoare la gazificarea ligniților cu umiditatea proprie, care constau în determinarea parametrilor funcționali optimi - temperatură, presiune, densitate flux termic furnizat din exterior în diferitele stadii ale procesului, granulația și umiditatea cărbunelui - corelați cu transferul termic și modalitatea de transport a cărbunelui în interiorul generatorului.

Rezultatele încurajatoare ale cercetării experimentale au condus la necesitatea modelării matematice în condiții de echilibru termodinamic, în vederea analizei teoretice a gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie. În consecință, s-a elaborat modelul matematic în condiții de echilibru termodinamic bazat pe analiza elementară, urmat de modelul matematic bazat pe formula chimică a masei cărbunoase. Concluziile celor două modele matematice evidențiază influența parametrilor de operare - temperatură și presiune, asupra caracteristicilor de compoziție și energetici ai gazului brut și implicit ai procesului global (v. cap. 7.1.3.), oferind setul datelor necesare proiectării generatorului industrial și stației de gazificare a ligniților autohtoni cu umiditatea proprie. De remarcat, direcția de continuare a cercetării prin elaborarea unui model matematic care să cuprindă cinetica proceselor fizico - chimice complexe specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, întrucât în cazul real al generatorului nu este atins echilibrul chimic.

11.3. CONCLUZII DESPRINSE DIN STUDIUL TEORETIC ȘI EXPERIMENTAL AL ARDERII GAZULUI DE GAZOGEN

În consecință, apare ca necesară analiza posibilităților utilizării energetice a gazului brut rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditate proprie, comparativ cu gazele naturale și cu gazul de gazogen, conform testelor autohtone de gazificare în strat. Studiul comportării energetice a combustibilului gazos s-a realizat atât prin analiza bilanțului material și termic al arderii cât și prin analiza cineticii și a condițiilor de stabilitate ale arderii.

Analiza elementelor bilanțului termic indică valori ale temperaturii teoretice de ardere în condițiile arderii perfecte, sensibil mai mari în cazul gazului rezultat prin gazificarea cărbunilor cu umiditate proprie - 2166 °C - comparativ cu metanul pur - 2058 °C - sau gazele naturale de Ardeal - 2061 °C, datorită unei cantități sensibil diminuate de aer de combustie și implicit a azotului din gazele rezultate ale arderii. De menționat, că pe lângă temperatura teoretică de ardere superioară, gazele de ardere au un conținut majorat de componente triatomice - $r_{CO_2} + r_{H_2O} = 33\%$, ceea ce conduce la mărirea factorului de emisie al acestora în focare cu circa 8-9 %.

În concluzie, pe baza considerentelor furnizate de transferul termic prin radiație în focarul agregatelor de cazane, rezultă comportarea avantajoasă a combustibilului gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, determinate de valori sporite ale temperaturii teoretice de ardere și a factorului de emisie. În consecință, conceptul de gaze "combustibile sarace" bazat pe valoarea puterii calorifice inferioare a acestora, caracterizează efectele economice ale transportului și

stocării, neglijând comportarea din punctul de vedere al transferului termic prin radiație în focar. Întrucât comportare termică în focare a combustibililor este caracterizată prin entalpia teoretică de ardere, se propune "puterea calorifică efectivă" constând practic din raportul puterii calorifice inferioare la volumul normal al gazelor rezultate ale arderii teoretice. Pe considerentul, puterii calorifice efective a combustibililor gazoși, ierarhia clasică se modifică în favoarea acetilenei - 4962 kJ/m³N - urmată de oxidul de carbon - 4360 kJ/m³N - hidrogen - 3733 kJ/m³N și de metan 3395 kJ/m³N.

O importanță deosebită în adoptarea soluției constructive și proiectarea instalațiilor de ardere o are viteza normală de propagare a frontului flăcării și a condițiilor de stabilitate ale arderii s-a realizat un stand experimental care permite determinarea caracteristicilor arderii combustibilului gazos rezultat în urma gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie.

Analiza determinărilor experimentale și a datelor furnizate de calcule analitice, referitoare la arderea gazului de gazogen permit evidențierea următoarelor concluzii:

a. Viteza normală de propagare a frontului flăcării având valori ridicate de 96-110 cm/s, sensibil majorată comparativ cu cazul gazelor naturale - 37 cm/s, ceea ce determină posibilități facile de utilizare energetică a combustibilului gazos. Valoarea ridicată a vitezei normale de propagare a frontului flăcării corespunzătoare gazului de gazogen este determinată de conținutul ridicat de hidrogen al acestuia.

b. Ca o consecință a vitezei normale de propagare al frontului flăcării rezultă valorile ridicate ale limitei de rupere a flăcării, ceea ce conduce la diminuarea sensibilă a riscurilor, permițând adoptarea de sarcini ridicate ale arzătorului.

c. Riscurile ridicate de retur ale flăcării, determinate de valorile ridicate ale vitezei limită de retur conduc la necesitatea adoptării soluției constructive a arzătoarelor cu amestecare exterioară a componentelor amestecului carburant.

d. Zona redusă a flăcării luminoase determină valori reduse ale pierderilor prin ardere incompletă din punct de vedere chimic și totodată randamente sporite ale arderii.

Caracteristicile favorabile ale arderii combustibilului gazos rezultat în urma gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie, coroborate cu valorile ridicate ale temperaturii teoretice de ardere și ale factorului de emisie ale gazelor arse, sensibil majorate față de cazul metanului și al gazelor naturale determină comportări favorabile în focarul agregatului de cazan sau al cuptoarelor industriale, ceea ce pledează pentru utilizarea energetică a acestora.

O problemă deosebită o reprezintă analiza posibilităților interschimbabilității gazelor naturale cu combustibilul gazos rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, întrucât majoritatea covârșitoare ale instalațiilor de ardere autohtone utilizează gaze naturale. Studiul interschimbabilității s-a efectuat atât pe criterii energetice cât și pe combinarea acestora cu condițiile de stabilitate ale arderii. În consecință, se propune analiza interschimbabilității pe baza comparării diagramelor de stabilitate ale arderii celor doi combustibili, transpuse cazului real de funcționare al arzătorului, caracterizat prin gradul de aerare și densitatea fluxului termic generat pe unitatea de secțiune a capului arzătorului. De asemenea s-au dedus relațiile care permit determinarea parametrilor instalației de ardere în cazul substituirii combustibililor.

În concluzie, este practic imposibilă interschimbabilitatea gazelor naturale cu gazul combustibil rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie în cazul

instalațiilor de ardere utilizând arzătoare cu preamestecarea parțială sau totală a aerului necesar arderii, chiar în ipoteza unei modificări constructive sau dimensionale semnificative.

Corespunzător arzătoarelor cu amestecare exterioară a combustibilului gazos și a aerului necesar arderii, practic majoritatea arzătoarelor utilizate în scopuri energetice sau industriale, substituirea gazelor naturale cu combustibilul gazos analizat este posibilă prin modificări constructive și funcționale. În consecință instalația de ardere trebuie să asigure triplarea debitului combustibilului gazos, fie prin modificări ale secțiunii ajutorajelor, fie prin majorarea suprapresiunii gazului, eventual prin combinarea ambelor variante. Referitor la asigurarea debitului aerului necesar arderii, instalația aferentă nu necesită modificări constructive întrucât, în condițiile echivalenței sarcinii termice gazul de gazogen necesită circa 80 % din aerul necesar arderii gazelor naturale, modificare realizabilă pe baza reglajelor. Stabilitatea arderii în condițiile substituției gazelor naturale cu gazul de gazogen analizat este asigurată datorită evitării tendințelor de rupere a flăcării - determinată de viteza de ardere sensibil majorată a gazului de gazogen, respectiv urmare a anulării riscurilor de retur ale flăcării - implicate de amestecarea exterioară.

11.4. CONCLUZII PRIVIND VARIANTE DE GAZOGENE POSIBILITĂȚILE DE UTILIZARE ALE COMBUSTIBILULUI GAZOS

Confirmarea experimentală a posibilității gazificării ligniților autohtoni cu umiditatea proprie coroborată cu analiza datelor furnizate de modelul matematic, precum și avantajele procedurii permit prefigurarea generatorului cât și a instalației globale de gazificare.

Stadiul actual al cercetării conduce la următoarele cerințe fundamentale ale variantei constructive a generatorului de gazificare a cărbunilor cu umiditatea proprie:

a. Succesiunea fazelor specifice gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie implică cvasiobligatoriu adoptarea variantei gazificării în strat, determinată de următoarele considerente:

- patul fluidizat, respectiv patul antrenat necesită în mod obligatoriu agenți de fluidizare, respectiv de transport pneumatic, tehnologiile actuale utilizând în acest scop agentul de gazificare. În cazul gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, în prima etapă a procesului are loc preîncălzirea urmată de uscarea cărbunelui, obținându-se aburul care devine, în stadiile următoare, agentul de gazificare. În consecință, agentul de gazificare, umiditatea proprie nu poate fi utilizată ca agent de transport pneumatic.

- patul fluidizat, respectiv patul antrenat necesită măcinarea cărbunelui la granulații de maxim 6 - 8 mm, respectiv sub 1 mm. Măcinarea cărbunelui la aceste granulații implică obligativitatea uscării sale, reducându-se în consecință conținutul său de umiditate și implicit de agent de gazificare anulând posibilitatea utilizării umidității proprii.

- gazificarea în strat prezintă avantaje deosebite determinate de simplitatea generatorului și a instalațiilor auxiliare de preparare a cărbunelui și de tratare a gazului brut, respectiv a subprodusilor secundari.

b. Cvasiobligatoriu, transportul cărbunelui în interiorul gazogenului trebuie realizat mecanic, datorită adoptării variantei gazificării în strat. În principiu, transportul mecanic al cărbunelui se poate realiza fie datorită mișcării de rotație în cuptoare tubulare dispuse înclinat, fie gravitațional în generatoare verticale. Instalațiile de dimensiuni industriale nu se pretează la transportul mecanic prin intermediul șnecurilor elicoidale datorită consumului energetic exagerat și a investițiilor ridicate.

c. Caracterul alloterm al gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie implică asigurarea fluxului termic din exterior ceea ce implică dispunerea, preferabil în interiorul generatorului a unui fascicol de țevi scăldate în interior de gaze de ardere. Realizarea unei densități a fluxului termic, raportată la unitatea de volum a generatorului, cât mai mari mare implică adoptarea pentru suprafața de transfer termic a unui fascicol de serpentine elicoidale din țeava. De asemenea, varianta serpentinelor elicoidale aflate în mișcare de rotație față de cărbune asigură atât deplasarea cărbunelui cât și răscolirea stratului evitându-se aglomerarea acestuia.

În conformitate cu aceste cerințe, au fost concepute două variante constructive de generatoare de gazificare a cărbunelui cu umiditatea proprie: generatorul rotativ tip tambur (brevetat) și generatorul în strat cu grătar rotativ.

Generatorul rotativ tip tambur este în principiu similar constructiv cuptoarelor sau uscătoarelor rotative utilizate în industria materialelor de construcții, permițând gazificarea cu umiditate proprie la presiune normală. Generatorul în strat cu grătar rotativ este în principiu similar gazogenelor în strat Lurgi cu modificările impuse de suprafața interioară de transfer termic, permițând operarea sub presiune.

Ca o consecință, a avantajelor funcționale ale gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, instalația globală de gazificare a cărbunilor este net simplificată prin renunțarea la: instalația de uscare a cărbunilor nezezi, generatorul de preparare al aburului și instalația de producere a oxigenului, necesară în vederea obținerii unui gaz de calitate lipsit de azot. De asemenea, instalația de tratare a apelor uzate este net diminuată întrucât, după colectarea gudroanelor - utilizabile drept combustibil lichid - restul condensabilelor pot fi recirculate în generator în vederea asigurării excesului de umiditate solicitat de echilibrele chimice. Pe de altă parte, diminuarea sensibilă a complexității instalației globale necesare gazificării cărbunilor determină reducerea semnificativă a consumului energetic solicitat de pregătirea cărbunelui și de prepararea agentului de gazificare. De remarcat că, în cazul gazificării cu umiditate proprie, datorită caracterului alloterm al procesului, instalația globală cuprinde un focar industrial care furnizează gazele de ardere necesare furnizării din exterior a fluxului termic.

Circulația în echicurent a reactanților determină temperaturi ridicate de recoltare a gazului brut - practic temperatura de gazificare, ceea ce implică necesitatea recirculării căldurii sensibile a acestora în proces. De asemenea, datorită furnizării din exterior a fluxului termic necesar gazificării, agentul termogen primar - gaze de ardere - părăsesc gazogenul la o temperatură relativ ridicată. În consecință, instalația globală trebuie să cuprindă recuperatoare care să permită preîncălzirea aerului de combustie, respectiv a aerului de diluție, pe baza unei fracțiuni din căldura sensibilă a gazului brut, respectiv a gazelor de ardere la ieșirea din gazogen.

Dificultățile implicate de utilizarea convențională a ligniților autohtoni precum și aspectele nocive legate de poluarea mediului ambiant conduc la concluzia că, forma solidă prezintă dezavantaje în cazul marilor consumatori energetici, la micii consumatori, fiind total inutilizabilă în unele domenii energetice sau ca materie primă în chimie.

În concluzie, apare ca rațională analiza posibilităților oferite de gazificarea ligniților autohtoni cu umiditatea proprie în vederea utilizării gazului de gazogen în instalațiile de termoficare, în instalațiile energetice de producere a energiei electrice sau ca materie primă în chimie.

a. Gazificarea cărbunilor, în speță gazificarea cu umiditatea proprie permite utilizarea convenabilă a acestora în cadrul instalațiilor de termoficare prin producerea combustibilului gazos în vecinătatea exploatarei miniere. Gazul de gazogen, după o prealabilă purificare și tratare, este transportat spre centrale termice amplasate în

centrul de greutate al consumului. Analiza termoficării bazate pe gazificarea cărbunilor indică avantaje în cazul unor distanțe de transport mai mari de 4,3 - 8,8 km comparativ cu cazul termoficării clasice cu arderea în strat, respectiv 8,5 - 13,2 km în cazul arderii în suspensie a cărbunilor.

b. Gazificarea reprezintă cea mai tentantă posibilitate de implementare a cărbunilor în vederea producerii energiei electrice pe baza ciclului mixt al aburului și gazelor de ardere. În consecință, energia electrică poate fi produsă pe baza gazului de gazogen rezultat în urma gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, fie prin arderea la presiune normală după o prealabilă desprăfuire, purificare și destindere într-o turbina de gaze, fie prin arderea sub presiune urmată de destinderea ulterioară a gazelor de ardere, fie prin combinarea celor două variante. Arderea directă în focarul cazanelor de tipul Velox este realizabilă în cazul unor presiuni reduse de gazificare, respectiv presiunile ridicate de gazificare necesită destinderea prealabilă a gazului de generator la limitele impuse de solicitările mecanice ale generatoarelor de abur, fiind un caz particular al combinării primelor două variante. În cazul arderii sub presiune, aceasta se realizează în camera de ardere a unei instalații de turbine de gaze urmată de destinderea gazelor arse în turbina de gaze și recuperarea căldurii sensibile a acestora pentru producerea aburului supraîncălzit.

Analiza comparativa a celor trei variante de cicluri mixte propuse conduce la concluzia că ciclul mixt bazat pe arderea sub presiune a gazului de gazogen în camera de ardere a unei instalații de turbine de gaze permite obținerea de randamente sensibil majorate față de cazul unei centrale termoelectrice clasice. Majorarea eficienței globale a ciclului mixt este determinată de mărirea ponderii energetice a turbinei de gaze în detrimentul celei de vapori.

Corespunzător utilizării gazului de gazogen ca materie primă pentru chimie, costurile sunt majorate față de utilizarea hidrocarburilor naturale, dar diferența este mai mică decât în cazul producției de combustibili sintetici, cu condiția unui preț convenabil al cărbunelui. Prognozele pe termen mediu indică introducerea pas cu pas a carbochimiei bazate pe gazificarea cărbunilor în vederea obținerii materiilor prime utilizate de industria chimică. Se estimează că, în primele etape investițiile se vor orienta spre producerea gazului în vederea unei chimizări ulterioare a acestuia, respectiv producerea substitutului de gaze naturale sau a benzinei sintetice se vor dezvolta într-o etapă ulterioară, determinată de creșterea prețului hidrocarburilor naturale. Economicitatea producerii de materii prime pentru chimie este determinată direct de posibilitatea obținerii la prețuri convenabile a gazului de gazogen, eficiența gazificării determinând practic caracterul economic al procesului global, comparativ cu prețul gazelor naturale sau a țițeiului.

BIBLIOGRAFIE

- 1.1. Trofimuk A.A., ș. a. - Neue Erdgas-ressourcen, Gashydrate, vol. 38, nr. 1, 1988;
- 1.2. Hafele W., Terhort W. - Versorgung mit und Nutzung von Mineralöl, Gas, Kohle und Kernenergie unter mittel- und langfristigen Gesichtspunkten, Kernforschungsanlage Julich GmbH, 1984;
- 1.3. Petrescu I., Petrescu C.F. - Cărbuni fosili, Editura Tehnică, București, 1982;
- 1.4. Ungureanu C. - Generatoare de abur pentru instalații energetice clasice și nucleare, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977;
- 1.5. Popescu L., ș. a. - Gama cazanelor de apă fierbinte echipate cu grătare cu împingere răstrunată - încheierea acțiunii de omologare, Energetica, vol 33, nr. 2, 1985;
- 1.6. Antonescu N. - Arderea cu recirculare de gaze pentru evitarea zgurificării la combustia în strat a cărbunilor, Energetica, vol. 30, nr. 4, 1982;
- 1.7. Maftei M., Bălan V. - Aplicarea de tehnologii pentru îmbunătățirea lignitului și a șisturilor bituminoase, Energetica, vol. 32, nr. 7, 1984;
- 1.8. Neaga C.C. - Mărirea stabilității arderii prafului de lignit din bazinul Olteniei pregătit în instalații cu insuflare directă cu ajutorul concentratorilor de praf, Energetica, vol. 31, nr. 1, 1983;
- 1.9. Popa T., ș. a. - Arderea cărbunelui cu conținut ridicat de cenușă fără suport de hidrocarburi, Energetica, vol. 30, nr. 7, 1982;
- 1.10. Neaga C.C. - Creșterea stabilității arderii prafului de lignit folosind schema semideschisă cu concentrator de praf, Energetica, vol. 32, nr. 10, 1984;
- 1.11. Băcleșteanu C. - Rezultate preliminare obținute la arderea prafului de lignit cu arzătoare cu impact de jeturi la un cazan energetic de 100 t/h, Energetica, vol. 30, nr. 5, 1982;
- 1.12. Goleșteanu I., Ungureanu C. - Unele aspecte privind utilizarea ultrasunetelor în procesul de ardere a prafului de cărbune, Energetica, vol. 32, nr. 11, 1982;
- 1.13. Chercea G. - Reducerea pierderilor de căldură prin ardere mecanică incompletă la cazanele de abur funcționând cu lignit, Energetica, vol. 31, nr. 5, 1983;
- 3.1. Niac G., Czibula R. - Instalații de gazificare și lichefiere a cărbunilor, Știința Modernă și Energia, vol. III, Dezvoltarea producției de energie, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1984;
- 3.2. Delannoy G. - Les principes generaux de la gazeification du carbon, Industrie Minerale, nr. 3, 1978;
- 3.3. Teegers H., Juntgen H. - Stand der Kohlevergasung zur Erzeugung von Brenngas und Synthesegas, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 4, 1992;
- 3.4. Romey J. - Stand der Kohlehydrierung in Europa, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 7, 1980;
- 3.5. Wolkowski E., Funk O. - Stand der Kohlehydrierung ausserhalb von Europa, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 7, 1980;
- 3.6. Schrider L.A., ș. a. - The outlook for underground coal gasification, Erdöl und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 9, 1976;

- 3.7 Seelemann D. - La gazeification souterraine du charbon, Industrie Minerale, nr. 3, 1978;
- 3.8. Focşa I., Niac G. - Gazificarea lignitului in subteran, Mine, Petrol si Gaze, vol. 32, nr. 1-2, 1981;
- 3.9. O'Hara B. - Coal beneficiation and conversion development, Intersciencia nr. 2, 1979;
- 3.10. Flush W. - 50 Jahre Sauerstoffvergasung, Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 10, 1980;
- 3.11. von der Decken C.B., Hohlein B. - Energieversorgung durch nukleare Ferneheergie, Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 7, 1980;
- 3.12. Broecker R. - Coal gasification, one answer to uncertain fuel suppliance: make your own gas, Heating - Piping - Air Conditioning, nr. 4, 1980;
- 3.13. Stearns - Rogers - Incorporation - Coal gasification, the Lurgi process;
- 3.14. Lohmann C., Peyer H.P. - Ruhr 100, the fuerter development of the Lurgi gasifier at Dorsten, Symposium on coal refining proceedings, Edmonton, 1988;
- 3.15. Mottitschka W. - Ergebnisse des Forschungsprogramms zur Kohlenfestbettvergasung, Energietechnik, vol. 32, nr. 6, 1982;
- 3.16. Robke G. - Weiterentwicklung des Lurgi-Druckvergasungsverfahrens, Haus der Technik, vol. 405, Essen, 1986;
- 3.17. Franken G., ş. a. - Herstellung von Synthesegas aus Braunkohle, Chemie - Ingenieur - Technik, vol. 52, nr. 4, 1980;
- 3.18. Teegers H., Theis K.A. - The Rheinbraun High - Temperature - Winkler and hidrogasification process, Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 8, 1989;
- 3.19. Franke F.H., ş. a. - Rheinbraun's High Temperature Winkler (H.T.W.) process, Sixth Annual International Conference on Coal Gasification, Liquefaction & Conversion to Electricity, Pittsburg, 1979;
- 3.20. Loeding J.W., Patel J.G. - The U - Gas process, Chemical Engineering Process, vol. 81, nr. 4, 1985;
- 3.21. Patel J.G. - The U - Gas process, Sixth Annual International Conference on Coal Gasification, Liquefaction & Conversion to Electricity, Pittsburg, 1979;
- 3.22. Gallager J.E. Jr., Euker C.A. Jr. - Catalytic coal gasification for S.N.G. manufacture; Sixth Annual International Conference on Coal Gasification, Liquefaction & Conversion to Electricity, Pittsburg, 1979;
- 3.23. Colaluca M.A., ş. a. - Developmemnt of TRI-GAS gasification process, A.I.Ch.E. 71-st Annual Meeting, Maiami Beach, 1978;
- 3.24. Weis A.J. - Synthane - a process for the gasification of caking and noncaking coals, The Thirteenth Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, San Diego, 1978;
- 3.25. Schmidt-Traub H., Goeke E. - Stand und Entwicklungstendenzen der Flugstromvergasung, Chemie - Indenieur - Technik, vol. 52, nr. 4, 1980;
- 3.26. Linke A., Vogt E.V. - Die Druckvergasung von Kohle im Flugstrom nach Shell - Koppers, Chemie - Indenieur - Technik, vol. 52, nr. 9, 1980;
- 3.27. Vogt E.V., van der Burgt M.J. - Current status of the Shell - Koppers coal gasification process, Status Report of Major Synthetic Fuel Project, San Francisco, 1979;
- 3.28. Pohl H.C., Schmidt-Traub H. - Entwicklungen zur Flugstrom-Vergasung nach dem Koppers-Totzek und dem Prenflo-Verfahren, Chemie - Ingenieur - Technik, vol. 55, nr. 11, 1983;
- 3.29 Pohl H.C., Rohm H. J. - Flugstrom-Vergasung unter Druck - Stand der Technik und Weiterentwicklungen, Chemie Industrie, vol. 37, nr. 6, 1985;

- 3.30. Fussmann G., Rossbach M. - High-pressure coal gasification with the Saarberg/Otto gasification, Coal Refining Symposium, Edmonton, 1978;
- 3.31. Rossbach M., Meyer A. - Das Saarberg/Otto - Kohlevergasungsverfahren, Stahl und Eisen, vol. 100, nr. 7, 1980;
- 3.32. Torneman B. - New coal gasification process can provide a substitute for oil in large quantities, Energy Technology, nr. 1, 1984;
- 3.33. Seipenbusch J., Ruprecht P. - Das R.A.G./R.C.H. - Projekt Kohlestaub-Druckvergasung, Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 12, 1989;
- 3.34. Schlinger W.G. - Coal gasification developemnt and commercialization of the Texaco gasification process, Sixth Annual International Conference on Coal Gasification, Liquefaction & Conversion to Electricity, Pittsburg, 1979;
- 3.35. Cornils B., ș. a. - Stand der Texaco-Kohlevergasung in der Ruhrchemie-Ruhrkohle-Variante, Erdol und Kohle-Erdgas-Petrochemie, nr. 7, 1980;
- 3.36. Arndt E., ș. a. - Synthetisches Erdgas aus Kohle und Hochtemperaturreaktorewarme, Erdol und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 32, nr. 1, 1979;
- 3.37. Bialuschewski H., ș. a. - Vergasung von Kohle mit Hochtemperaturreaktorewarme, Erdol und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 32, nr. 1, 1979;
- 3.38. von der Decken C.B., Hohlein B. - Energieversorgung durch nukleare Fernenergie, Erdol und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 33, nr. 7, 1980;
- 3.39. Teegers H., Falkenhein G. - Hydrogasification of brown coal using process heat from high temperature gas-cooled nuclear reactors, Lignite Symposium, Grand Forks, 1984;
- 3.40. I.C.S.I.T.E.E. București - Gazogen cu grătar de presiune normală, diametru 1.200 mm, capacitatea 0,4 - 0,5 Gcal/h, pentru gazificarea cărbunilor cu puteri calorifice inferioare de 1.200 - 1.800 kcal/kg și granulații peste 20 mm, nr. 4694, 1981;
- 3.41. I.C.S.I.T.E.E. București - Raport tehnic, probe de casă gazogen 1.200 mm, 1984;
- 3.42. I.C.S.I.T.E.E. București - Cercetări privind îmbunătățirea funcționării gazogenelor cu grătar rotativ la presiune normală, 1985;
- 3.43. I.C.S.I.T.E.E. Cluj-Napoca - Cercetări de gazificare sub presiune în pat fix a lignitului, E - 182, 1985;
- 3.44. I.C.S.I.T.E.E. București - Gazificarea mărunților de lignit în gazogene cu strat fluidizat, nr. 12.116, 1981;
- 3.45. I.C.S.I.T.E.E. București - Cercetări privind gazificarea mărunților de cărbune în instalații de mare productivitate din care: Gazificarea mărunților de cărbune în gazogene cu strat fluidizat la presiune normală, nr. 13.121, 1984;
- 3.46. I.C.S.I.T.E.E. București - Cercetări privind realizarea de reactoare de mare capacitate cu insuflare de oxigen și abur sub presiune până la 10 bar, pentru gazificarea cărbunilor inferiori, nr. 12.118, 1982;
- 3.47. Pop I. - Arderea combustibililor gazoși inferiori - referat doctorat, Institutul Politehnic Traian Vuia Timișoara, 1987;
- 3.48. x x - Developments de la societate Bertin dans la combustion des gas a faible pouvoir calorifique, L'Industrie Ceramique, nr. 5, 1983;
- 3.49. Krill W., Kesselring J. - Field evaluation of the fiber burner in firtube boilers, Gas - Warme - International, vol. 34, nr. 4, 1985;
- 3.50. Galant S., ș. a. - Etude d'un bruleur cyclone destine a la combustion stable de gaz residuels industriels a tres faible pouvoir calorifique, L'Industrie Ceramique, nr. 1 1984;
- 3.51. Najim S.E., ș. a. - A study of modulatable cyclone combustors using gaseous fuels, Journal of the Institute of Energy, nr. 3, 1982;

- 3.52. Ermlich K. - Konstruktionmerkmale von Gasbrenner für die Verbrennung von heizwertarmen Gase, Gas - Wärme - International, vol. 37, nr. 4, 1988;
- 3.53. Cerny A.A. - Deutsche Offenlegungsschrift 3117708, K1 F 23 D - 15/100, brevet;
- 3.54. Ermlich K. - Verbrennung heizwertarmen Gase in Brenner-Spezialkonstruktionen für Industriefeuerungen, Gas - Wärme - International, vol. 31, nr. 2/3, 1982;
- 3.55. Wascher W.W. - Feuerungen für brennbare flüssige und gasförmige Rückstände, Gas - Wärme - International, vol. 27, nr. 12, 1978;
- 3.56. Krompaszky C., ș. a. - Nagy inerttartalmu földgázok eltuzelése alkamas berendezések fejlesztése a TUKI-ben, Energia-Gazdalkodás, vol. 26, nr. 7, 1985;
- 3.57. Csirmaz I., ș. a. - Energia - nagy inerttartalmu földgázok, Energia es Atomtehnika, vol. 38, nr. 7-8-9, 1985;
- 3.58. Bodnar G., ș. a. - Koolajipari tuzeloberendezes es fejlesztese a TUKI-ben, Energia-Gazdalkodás, vol. 28, nr. 1, 1987;
- 3.59. Maghon H., Becker B. - Schadstoffarme Verbrennung von Kohlegas in GuD-Anlagen, VGB Kraftwerkstechnik, vol. 64, nr. 11, 1984;
- 3.60. Enamito S. The development of combustor for burning low calor gas in industrial gas turbines, Mitsui Zosen Technical Review, vol. 121, nr. 2, 1984;
- 3.61. I.C.S.I.T.E.E. București - Arzător de gaze sărace - monojet G 301-50, 1985;
- 3.62. I.C.S.I.T.E.E. București - Arzător de gaze sărace - monojet G 301-50, 1985;
- 3.63. C.C.P.G.M. Mediaș - Studiu și cercetări pentru realizarea de arzătoare care să funcționeze cu gaz metan cu conținut de CO₂, 114-c, 1985;
- 4.1. Stearns - Rogers - Incorporation - Coal gaisification, the Lurgi process;
- 4.2. Pop I. - Tehnologia de gazificare Lurgi, tendințe de dezvoltare și optimizare, A XXX-a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1985;
- 4.3. Pop I. - Stadiul actual pe plan național și mondial al tehnologiilor de gazificare, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1985;
- 4.4. Lohmann C., Peyrer H. P. - Ruhr 100, the further development of the Lurgi gasifier at Dorsten, Symposium on Coal Refining Prosedings, Edmonton, 1978;
- 4.5. Robke G. - Weiterenentwicklung des Lurgi_Druckvergasungsverfahrens, Haus der Technik, vol. 405, Essen, 1978;
- 4.6. Pop I. - Realizări, tendințe și posibilități de optimizare ale gazificării în strat, Buletinul științific al Institutului Politehnic Cluj-Napoca, seria: Arhitectura-Constructii; Cluj-Napoca, 1986;
- 4.7. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986;
- 4.8. Niac G., Pop I. - Instalații de gazificare în strat a cărbunilor, Energetica, vol. XXXVI, nr. 10, 1988;
- 4.9. I.C.S.I.T.E.E. București - Gazogen cu grătar de presiune normală, diametru 1200 mm, capacitatea 0,4-0,5 Gcal/h, pentru gazificarea cărbunilor cu puteri calorifice inferioare de 1200-1800 kcal/kg și granulații peste 20 mm, nr. 4694, 1981;
- 4.10. I.C.S.I.T.E.E. București - Raport tehnic, probe de casă gazogen cu grătar 1200 mm, 1984;
- 4.11. I.C.S.I.T.E.E. filiala Cluj-Napoca - Cercetări de gazificare sub presiune în pat fix a lignitului, F-182, 1985;
- 4.12. Niac G., Pop I. - Modelarea gazificării cărbunilor în condiții de echilibru termodinamic, Revista de Chimie, vol. 39, nr. 1, 1988;

- 5.1. Franke F.H., ș. a. - Vergasung von Rheinischer Braunkohle mit dem Eigenwasser im Rohrenofen (RO - Vergasung), Braunkohle, nr. 6, 1974;
 - 5.2. Franke F.H., ș. a. - Neue Verfahren zur konventionelle Vergasung von Braunkohle, Braunkohle, nr. 11, 1975;
 - 5.3. Franke F.H., ș. a. - Vergasung von Rohbraunkohle im Rohrenofen - Vergaser, Brennstoff - Wärme - Kraft, vol. 31, nr. 3, 1979;
 - 5.4. Beckervordersandforth C.P. - Reduktionsgas und kunstliches Erdgas aus rheinischer Rohbraunkohle durch Einsatz des Rohrenofen - Gasgenerators, Teza de Doctorat, R.W.T.H. Aachen, 1975;
 - 5.5. Block F.R. - Vergasung von feuchter Kohle in umlaufenden Rohr, Chemie - Ingenieur - Technik, vol. 51, nr. 10, 1979;
 - 5.6. Booz Allen Applied Research Division - Underground coal gasification program, E.R.D.A., 1977;
 - 5.7. Wenzel W., ș. a. - Neue Aktivitäten auf dem Gebiet der Unter-Tage-Vergasung, Gas und Erdgas, vol. 119, nr. 11, 1978;
 - 5.8. Mohtadi M., Terschuren W. - Untertage Vergasung tiefliegender Steinkohle, Braunkohle, nr. 11, 1985;
 - 5.9. Mohtadi M., ș. a. - Druckvergasungsanlage zur Simulation des Untertageprozesses, Erdol und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 34, nr. 12, 1981;
 - 5.10. Gregg D.W., ș. a. - An everview of the soviet effort in underground gasification of coal, E.R.D.A., 1976;
 - 5.11. Dossey J.L. - Underground coal gasification technology in the U.S.S.R., Sandis Laboratories, 1976;
- 6.1. Niac G., ș. a. - Formule, tabele, probleme de chimie fizică, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1984;
 - 6.2. Schmidt I. - Tehnologie der Gaserzeugung, V.E.B. Deutscher Verlag fur Grundstoffindustrie, Leipzig, 1964;
 - 6.3. Chiriac F., ș. a. - Procese de transfer de căldură și de masă în instalațiile industriale, Editura Tehnică, București, 1982;
 - 6.4. Mihail R., Muntean O. - Reactoare chimice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983;
 - 6.5. Carabogdan I., Pănoiu N. - Bazele teoretice ale arderii și aprinderii combustibililor solizi, Editura Academiei R.S.R., București, 1969;
 - 6.6. Pop I., ș. a. - Aprecieri tehnico-economice și perspective privind utilizarea procedeeleor de gazificare a deșeurilor organice din nămoluri, contract nr. 113/1985, beneficiar: I.C.P.G.A., București;
 - 6.7. Pop I., ș. a. - Cercetări pentru valorificarea reziduurilor acumulate in treapta mecanică a stației de epurare CAROM, contract nr. 91/1986, beneficiar: I.C.P.G.A., București;
 - 6.8. Pop I., ș. a. - Cercetări privind gazificarea in sistem alloterm a ligniților românești cu umiditate excesivă prin utilizarea ca agent de gazificare a apei proprii, Faza I - Studiu și calcul de evaluare a gazificării ligniților cu umiditatea proprie, contract nr. 132/1988, beneficiar: I.C.P.M.S.N. Cluj-Napoca;
 - 6.9. Pop I., ș. a. - Cercetări privind gazificarea in sistem alloterm a ligniților românești cu umiditate excesivă prin utilizarea ca agent de gazificare a apei proprii, Faza II - Proiect de execuție stand experimental pentru gazificarea ligniților cu umiditatea proprie, contract nr. 132/1988 - 76/1989, beneficiar: I.C.P.M.S.N. Cluj-Napoca;
 - 6.10. Pop I., ș. a. - Cercetări privind gazificarea in sistem alloterm a ligniților românești cu umiditate excesivă prin utilizarea ca agent de gazificare a apei

- proprii, Faza III - Experimentări și evaluarea rezultatelor gazificării ligniților cu umiditatea proprie, contract nr. 132/1988 - 28/1990, beneficiar: I.C.P.M.S.N. Cluj-Napoca;
- 6.11. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986;
- 6.12 Pop I., Niac G., Ungureanu C. - Instalație allotermă de gazificare a cărbuniilor cu umiditatea proprie, Construcții, nr. 1-2, 1993;
- 6.13. Pop I. - Gazificarea ligniților autohtoni cu umiditatea proprie din zăcământ, A XXVII-a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1993;
- 6.14. Pop I. - Instalație allotermă de gazificare a ligniților cu umiditatea proprie, Știința Modernă și Energia, Cluj-Napoca, 1994;
- 6.15. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, Știința Modernă și Energia, Cluj-Napoca, 1995;
- 7.1. x x - Manualul inginerului chimist, vol. 1, Editura Tehnică, București, 1972;
- 7.2. x x - Manualul inginerului chimist, vol. 2, Editura Tehnică, București, 1973;
- 7.3. Niac G. - Chimie fizică, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1966;
- 7.4. Niac G., ș. a. - Formule, tabele, probleme de chimie fizică, Editura Dacia, Cluj-Napoca, 1984;
- 7.5. Niac G., ș. a. - Reactivitatea termodinamică a cărbunilor, Mine, Petrol și Gaze, vol. 28, nr. 9, 1981;
- 7.6. Juntgen H. - Theoretische Grundlagen von Vergasungsprozessen, VGB Kraftwerkstechnik, vol. 59, nr. 7, 1979;
- 7.7. Mengis W., Schulz S. - Mathematische Modellierung des stationären und dynamischen Verhaltens des Lurgi-Druckvergasers unter Berücksichtigung der Kohleschwelung, Chemie - Ingenieur - Technik, vol. 56, nr. 3, 1984;
- 7.8. Horsgen B., Kohne H. - Zur Berechnung von Entgasung und Vergasung von Kohle im Festbettreaktor, Erdöl und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 33, nr. 11, 1988;
- 7.9. Arri L. E., Amundson N. R. - An analytical study of single particle char gasification, AIChE Journal, vol. 24, nr. 1, 1978;
- 7.10. Zygourakis, ș. a. - Studies on the gasification of a single char particle, American Chemical Society, vol. 21, nr. 1, 1982;
- 7.11. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986;
- 7.12. Niac G., Pop I. - Modelarea gazificării cărbunilor în condiții de echilibru termodinamic, Revista de Chimie, vol. 39, nr. 1, București, 1988;
- 7.13. Pop I. - Modelarea statică a gazificării cărbunilor, A XXXVIII-a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1987;
- 7.14. Pop I. - Model matematic al gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie, Știința Modernă și Energia, Cluj-Napoca, 1995;
- 8.1. Block F.R. - Vergasung von feuchter Kohle in umlaufenden Rohr, Chemie - Ingenieur - Technik, vol. 51, nr. 10, 1979;
- 8.2. Strumillo C. - Bazele teoriei și tehnicii uscării, Editura Tehnică, București, 1984;
- 8.3. x x - Elemente de teoria și practica procedeeului uscat de fabricație a cimentului, I.C.P.D.I.L.A. București, 1987;
- 8.4. Brunklaus H.J. - Cuptoare industriale, Editura Tehnică, București, 1978;
- 8.5. Niac G., Pop I. - Gazogen în strat cu umiditate proprie, brevet de invenție nr. 96983/20.10.1988;

- 8.6. Mihai I R., Muntean O. - Reactoare chimice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983;
- 8.7. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986;
- 8.8. Pop I., ș. a. - Stație de gazificare a cărbunilor, A XXXI - a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1987;
- 8.9. Arndt E., ș. a. - Synthetisches Erdgas aus Kohle und Hochtemperaturreaktorwärme, Erdol und Kohle - Erdgas - Petrochemie, vol. 32, nr. 1, 1979;
- 9.1. Ungureanu C. - Generatoare de abur pentru instalații energetice clasice și nucleare, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1977;
- 9.2. Pănoiu N., ș. a. - Instalații de ardere, Editura Tehnică, București, 1968;
- 9.3. Niac G. - Puterea calorifică efectivă, o mărime utilă pentru caracterizarea calorică a combustibililor gazoși, lichizi și solizi, Revista de Chimie, vol. 29, nr. 1, 1978;
- 9.4. Scholte H., Vaags E. - Burning velocities of mixtures of hydrogen, carbonmonoxid and metan with air, Combustion and Flame, vol. 3, nr. 4, 1959;
- 9.5. Csirmaz I., Riba D. - Nagy inerttartalmu földgázok felhasználása terén elert eredmények, Energiagazdalkodás, vol. 25, nr. 11-12, 1984;
- 9.6. Selmei J. - Nagy inerttartalmu szenhidrogének tüzelestechnikai vizsgálatai, Energiagazdalkodás, vol. 26, nr. 11, 1985;
- 9.7. Zieleniewski R. - Techniczne możliwości wykorzystania gazów zawierających ponad 50 % azotu, Prace Insitututu Gornictwa Naftowego i Gazowictwa, Krakovia, 1980;
- 9.8. Horn J. - Energieträgersubstitution bei Hochtemperaturprozessen unter besonderer Berücksichtigung des Wirtschaftlichen Erdgaseinsatzes, Energieanwendung, vol. 18, nr. 11, 1969;
- 9.9. Horn J. - Energieträgersubstitution bei Hochtemperaturprozessen unter besonderer Berücksichtigung des Wirtschaftlichen Erdgaseinsatzes, Teil II Berechnung der theoretischen und tatsächlichen Verbrennungstemperaturen von Erdgassystemen sowie Grundlagen der Wärmeübertragung, Energieanwendung, vol. 18, nr. 12, 1969;
- 9.10. Pop I. - Gazificarea cărbunilor cu umiditatea proprie, referat doctorat, Institutul Politehnic "Traian Vuia" Timișoara, 1986;
- 9.11. Pop I., ș. a. - Determinarea caracteristicilor cineticii arderii combustibililor gazoși, Știința Modernă și Energia, Cluj-Napoca, 1988;
- 9.12. Wierzbka I., Karim G.A. - Prediction of the lean flammability limit of fuel mixtures: a grafical approach, Journal of the Institute of Energy, nr. 6, 1983;
- 9.13. Jacob S., Thiele H. - Einsatzbewertung von Eigenerdgas mit niedrigem Heizwert in den Hochtemperaturprozessen der feinkeramischen industrie, Silikattechnik, vol. 33, nr. 12, 1982;
- 9.14. Weber E. J. - Interchangeability of fuel gases, șn Combustion Engineering Handbook, Chicago, 1977;
- 9.15. Dutton B.C., Gimcewski F. - Gas interchangeability: predicyion of flame lift, Journal of the Institute of Energy, nr. 6, 1983;
- 9.16. Gillard J. - Der Wobbe-Index von Gasgemischen und Schlussfolgerung für die Auslesung von Mischstationene, Gas - Wärme - International, nr. 8, 1984;
- 9.17. Pop I., Ungureanu C. - Criterii de interschimbabilitate a combustibililor gazoși, Energetica, nr. 12, 1989;

- 9.18. Pop I. - Arderea combustibililor gazoși inferiori, A XXVI - Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1992;
- 10.1. Pop I., ș. a. - Analiza comparativă a termoficării și gazificării cărbunilor, A XXXI - a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1987;
- 10.2. Juntgen H. - GuD - Kraftwerk mit integrierter Pfenflo Vergasung, Gas - Warme - International, nr. 12, 1992;
- 10.3. Pop I., ș. a. - Variantă optimizată de producere a energiei electrice utilizând ciclul mixt cu preîncălziri regenerative, A XIX - a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1985;
- 10.4. Niac G., Pop I. - Analiza unei variante de C.T.E. bazată pe gazificarea cărbunilor și ciclul mixt, A XIX - a Conferință Națională de Instalații, Sinaia, 1985;
- 10.5. Pop I., ș. a. - Ciclu mixt de producere a energiei electrice utilizând gazificarea subterană a cărbunilor, Energetica, vol. 35, nr. 4, București, 1987;

CUPRINS

1. Generalități	3
2. Bazele termochimice ale gazificării cărbunilor	7
3. Stadiul actual al tehnologiilor de gazificare a cărbunilor și a instalațiilor de ardere utilizând gaz de gazogen	11
3.1. Clasificarea tehnologiilor de gazificare a cărbunilor	11
3.2. Gazificarea cărbunilor în strat	12
3.2.1. Gazificarea cărbunilor în strat la presiune ambiantă	12
3.2.2. Tehnologii de gazificare în strat cu recircularea gudroanelor în zona de combustie	13
3.2.3. Gazificarea cărbunilor în strat sub presiune	14
3.3. Gazificarea cărbunilor în pat fluidizat	19
3.3.1. Tehnologia de gazificare Winkler și Hochtemperatur-Winkler	19
3.3.2. Tehnologia de gazificare U - GAS	22
3.3.3. Tehnologia de gazificare catalitică EXXON (C.C.G.)	23
3.3.4. Procedeele de gazificare TRI - GAS	24
3.3.5. Tehnologia de gazificare Synthane	25
3.4. Tehnologii de gazificare în pat antrenat	26
3.4.1. Tehnologia de gazificare Koppers - Totzek și variantele derivate	26
3.4.2. Tehnologia de gazificare Saarberg - Otto	28
3.4.3. Tehnologia de gazificare Texaco și varianta RAG - RCH	30
3.5. Generația a III - a de generatoare	31
3.6. Cercetări autohtone privind gazificarea cărbunilor	32
3.6.1. Cercetări privind gazificarea cărbunilor în strat	32
3.6.2. Cercetări autohtone privind gazificarea cărbunilor în pat fluidizat	33
3.7. Concluzii	35
3.8. Variante constructive de arzătoare utilizând combustibili gazoși inferiori	36
3.8.1. Arzătoare pentru combustibili gazoși inferiori cu stabilizare pe suport ceramic	36
3.8.2. Arzătoare utilizând gaze combustibile sărace	37
3.8.3. Arzătoare utilizând gaz de gazogen în instalațiile de turbine de gaze	40
3.8.4. Cercetări autohtone privind arderea gazelor combustibile sărace	42
3.8.5. Concluzii	44
4. Analiza gazificării cărbunilor în strat	45
4.1. Descrierea gazificării în strat	45
4.2. Influența caracteristicilor cărbunelui asupra gazificării în strat	47
4.3. Influența agentului de gazificare	49

4.4. Bilanțul energetic al gazificării în strat	51
4.5. Modelarea matematică în condiții de echilibru a gazificării cărbunilor în strat	52
4.6. Influența parametrilor de operare asupra gazificării cărbunilor în strat	60
4.6.1. Influența temperaturii de gazificare	60
4.6.2. Influența presiunii de gazificare	73
4.6.3. Concluzii	74
5. Gazificarea cărbunilor cu umiditate proprie	75
5.1. Gazificarea cu umiditate proprie în cuptoare tubulare	76
5.2. Gazificarea cu umiditate proprie în tuburi revoluțive	83
5.3. Gazificarea subterană a cărbunilor	84
6. Experimentări proprii privind gazificarea cu umiditate proprie a ligniților autohtoni	87
6.1. Elemente de calcul ale gazificării cu umiditate proprie	88
6.2. Generatorul de gazificare tip cuptor tubular	89
6.3. Generatorul de gazificare tip cuptor înalt	93
6.4. Aparatura de măsură a standului de laborator	95
6.5. Determinări experimentale	96
6.6. Concluzii	112
7. Modelarea matematică a gazificării cărbunilor cu umiditate proprie	115
7.1. Generalități	115
7.2. Modelul matematic al gazificării cărbunilor cu umiditate proprie în condiții de echilibru termodinamic	115
7.1.1. Model matematic în condiții de echilibru bazat pe analiza elementară a cărbunelui	117
7.1.2. Model matematic în condiții de echilibru bazat pe formula masei cărbunoase	122
7.1.3. Influența parametrilor de operare asupra gazificării cărbunilor cu umiditate proprie	129
7.1.3.1. Influența temperaturii de gazificare	129
7.1.3.2. Influența presiunii de gazificare	135
8. Variante constructive ale instalației de gazificare a cărbunilor cu umiditate proprie	137
8.1. Variante constructive de generatoare de gazificare cu umiditate proprie	137
8.1.2. Generatorul rotativ tip tambur	139
8.1.3. Generatorul cu grătar rotativ	141
8.2. Stația complexă de gazificare a cărbunilor cu umiditate proprie	143
9. Analiza teoretică și experimentală a arderii combustibililor gazoși inferiori	147
9.1. Bilanțul material și termic al arderii combustibililor gazoși inferiori	147
9.2. Viteza normală de propagare a frontului flăcării	150
9.3. Condiții de stabilitate ale arderii	154
9.4. Instalație experimentală de determinare ale caracteristicilor arderii	155
9.5. Rezultatele determinărilor experimentale	158
9.5.1. Concluziile determinărilor experimentale	161
9.6. Interschimbabilitatea combustibililor gazoși	161
9.6.1. Indici de interschimbabilitate bazați pe criteriile energetice	162

9.6.2. Indici de interschimbabilitate bazați pe criteriile energetice și de stabilitate a arderii	163
9.6.3. Determinarea interschimbabilității pe baza diagramei de stabilitate a arderii	166
9.6.4. Concluzii	170
10. Utilizarea gazificării cărbunilor cu umiditatea proprie	171
10.1. Generalități	171
10.2. Analiza comparativă a instalațiilor de termoficare clasice și a celor bazate pe gazificarea cărbunilor	171
10.2.1. Bilanțul termic al stației de gazificare a cărbunilor	171
10.2.1.1. Bilanțul termic al gazogenului	172
10.2.1.2. Bilanțul termic al focarului ciclon	174
10.2.1.3. Bilanțul termic al preîncălzitoarelor de aer	175
10.2.1.4. Program de calcul automat al bilanțului termic	175
10.2.2. Analiza comparativă a termoficării cu gazificarea cărbunilor	176
10.3. Ciclu mixt de producere a energiei electrice utilizând gazificarea sub presiune a cărbunilor cu umiditatea proprie	179
10.3.1. Generalități	179
10.3.2. Ciclu mixt cu turbină de detentă a gazului de gazogen și ardere la presiune atmosferică	180
10.3.3. Ciclu mixt cu detentă parțială a gazului de gazogen și arderea sub presiune într-un generator de abur urmată de destinderea gazelor în turbina de gaze	181
10.3.4. Ciclu mixt cu detentă parțială a gazului de gazogen, ardere sub presiune în camera de ardere a turbinei de gaze și cu un recuperator de abur urmat de turbina de vapori	183
10.4. Valorificarea chimică a produselor gazificării	184
10.4.1. Utilizarea gazificării la sinteza amoniacului	185
10.4.2. Utilizarea gazificării la sinteza metanolului	186
10.4.3. Utilizarea gazificării cărbunilor la obținerea hidrocarburilor	187
10.4.3.1. Sinteza metanului	187
10.4.3.2. Utilizarea gazificării la sinteza benzinei	187
10.4.3.3. Utilizarea gazificării la obținerea alchenelor	188
10.4.3.4. Utilizarea gazificării la obținerea hidrogenului și hidrogenării	189
10.4.3.5. Concluzii	190
11. Concluzii finale	
11.1. Concluzii desprinse din analiza gazificării în strat	191
11.2. Concluzii desprinse din studiul teoretic și experimental al gazificării ligniților cu umiditatea proprie	192
11.3. Concluzii desprinse din studiul teoretic și experimental al arderii gazului de gazogen	195
11.4. Concluzii privind variantele de gazogene și posibilitățile de utilizare a combustibilului gazos	197
12. Bibliografie	201