

O metoda robusta pentru determinarea pe baze inferentiale a calitatii produselor petroliere

Gabriel Radulescu, Vasile Marinoiu

Introducere

În ultimii ani, în condițiile integrării pe scară largă a sistemelor de conducere automată evoluată la nivelul instalațiilor din industria de prelucrare a petrolului, problema determinării „on-line” a calitatii produselor a capatat un necesar caracter de imediată actualitate [1, 3, 6, 7, 8]. Principial, aceasta se poate realiza prin două metode. Prima modalitate este reprezentată de utilizarea analizoarelor în flux, ceea ce impune costuri investitoriale foarte ridicate. O alternativă este aceea a determinării pe baze inferentiale a indicatorilor de calitate, în condițiile disponibilității unor modele matematice care să descrie comportarea în regim dinamic a instalațiilor avute în vedere. Astfel de simulatoare, corect acordate (pentru a funcționa în sincronism cu procesul real), la nivelul cărora sunt modelate inclusiv dispozitive de tip analizor, oferă în esență aceeași informație validă asupra calitatii produselor, la un cost mult redus față de cazul utilizării analizoarelor în flux.

Lucrarea de față propune o metodă pentru determinarea pe baze inferentiale a calitatii produselor obținute în urma fracționării titeiului la nivelul unei instalații de distilare atmosferică. Sunt prezentate principiile teoretice care stau la baza metodei, precum și modelul matematic asociat. În finalul articolului este prezentată comportarea „analizoarelor software” propuse, în condițiile simulării unei instalații de distilare atmosferică echipată cu astfel de module de determinare a calitatii produselor.

Indicatori de calitate asociați produselor instalației de distilare atmosferică

Deoarece petrolul și produsele care se obțin în urma fracționării sunt amestecuri complexe în care numărul de componente pure și identitatea acestora nu se pot determina, analiza lor pe componente fiind imposibil de realizat, pentru caracterizarea lor se folosesc așa-numitele *curbe de distilare* care exprimă dependența dintre temperatura de distilare și procentele de distilat:

- *curba de distilare PRF* (Puncte Reale de Fierbere) – sau curba TBP (True Boiling Points), conform terminologiei anglo-saxone – se utilizează pentru aproximarea compoziției titeiului și a fracțiunilor obținute din acesta;
- *curba de distilare STAS* (ASTM) caracterizează rapid fracțiunea petrolieră din punctul de vedere al limitelor de fierbere;
- *curba VE* (Vaporizare în Echilibru) este necesară cunoașterii și înțelegerii intimității procesului de separare la nivelul coloanei.

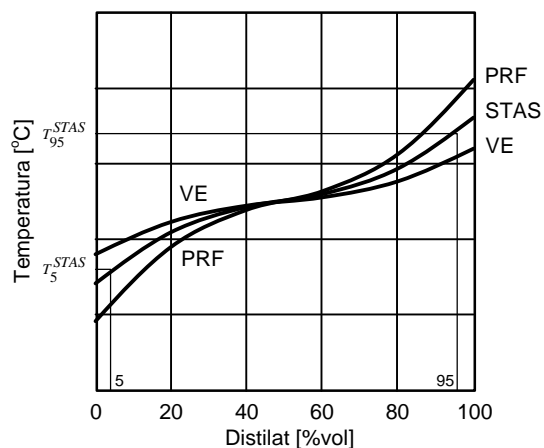


Fig. 1. Curbele de distilare PRF, STAS și VE.

Întrucât între cele trei curbe există o serie de corelații, s-au dezvoltat și metode de transformare reciprocă a acestora [4, 9, 10]. În figura 1 sunt prezentate calitativ-comparativ cele trei curbe pentru un titei sau o fracțiune oarecare. Aceste curbe permit caracterizarea produsului respectiv prin domeniul temperaturilor de fierbere. Pentru mai multă siguranță, în locul temperaturilor asociate extremităților 0% și 100%, se utilizează temperaturile pentru 5% și 95% distilat, notate T_5^{STAS} și T_{95}^{STAS} . În timp ce aceste temperaturi dau indicații asupra prezentei componentelor mai volatili și mai puțin volatili în amestec,

temperatura asociata lui 50% distilat reprezinta o temperatura medie de fierbere a amestecului de componente care alcatuiesc fractia respectiva.

În industrie, în concordanta cu cerintele pietei, principala specificatie a produselor obtinute din instalatia de distilare atmosferica se refera la curbele de distilare STAS sau, corespunzator, la curbele PRF. Astfel, principalele specificatii pentru fractiile separate sunt:

- initialul produsului (temperatura initiala de distilare), T_5^{STAS} ;
- finalul produsului (temperatura finala de distilare), T_{95}^{STAS} ;
- decalajul dintre fractiile adiacente, $T_{5 \text{ fractie grea}}^{STAS} - T_{95 \text{ fractie usoara}}^{STAS}$;
- suprapunerea între fractiile adiacente, $T_{100 \text{ fractie usoara}}^{PRF} - T_{0 \text{ fractie grea}}^{PRF}$.

Notiunile de decalaj, respectiv suprapunere, reflecta în mod deosebit calitatea procesului de separare, cele trei posibile situatii ce se întâlnesc fiind: separare buna (decalaj pozitiv, suprapunere nula), separare modesta (decalaj pozitiv, suprapunere pozitiva) si separare nesatisfacatoare (decalaj negativ, suprapunere pozitiva) [4, 8].

Lucrarea de fata propune o *rezolvare inferentiala* a problemei determinarii calitatii produselor petroliere. Datorita pretului extrem de ridicat al analizatoarelor în flux, estimarea în conditii de acuratete pertinenta a initialurilor si finalurilor pe baze inferentiale permite substituirea iesirilor analizatoarelor cu semnalele furnizate de un calculator de proces pe care se realizeaza simularea „on-line” a instalatiei de distilare atmosferica echipate cu analizoare software de initial si final, în acest fel realizându-se o extindere a aplicabilitatii pachetului de programe de simulare dincolo de cercetarile teoretice catre aspecte practice, concrete [2, 8, 11].

Determinarea inferentiala a temperaturilor initiala si finala de distilare asociate unui produs petrolier – un „experiment” problematizat

Se considera o fractie petroliera caracterizata de existenta a NC pseudo-componenti (inclusiv apa, considerata a avea numarul de ordine NC), concentratiile acestora fiind x_1, x_2, \dots, x_{NC} fractii molare.

Cei NC-1 pseudo-componenti hidrocarburi (separati pe curba PRF) având temperaturile reale de fierbere $T_1 < T_2 < \dots < T_{NC-1}$, se doreste determinarea temperaturilor initiala, respectiv finala de distilare, asociate fractiei petroliere pe curba PRF.

Deoarece la estimarea initialului si a finalului se au în vedere numai componentii hidrocarburi, primul pas este acela de a „elimina” componentul apa, respectiv de a recalcula concentratiile molare ale pseudo-componentilor 1, 2, ..., NC-1 din fractia petroliera uscata. În acest caz sunt valabile relatii

$$x'_1 + x'_2 + \dots + x'_{NC} = 1, \quad x'_{NC} = 0. \quad (1)$$

Tinând cont de faptul ca hidrocarburile au ramas în aceeasi cantitate în fractia uscata, noile concentratii molare ale pseudo-componentilor 1, 2, ... NC-1 se calculeaza astfel:

$$x'_i = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^{NC-1} x_j}, \quad i = \overline{1, NC-1}. \quad (2)$$

Într-o prima aproximare, temperatura initiala de distilare ar corespunde lui T_1 , iar cea finala lui T_{NC-1} , acestea fiind cea mai mica, respectiv cea mai mare temperatura de fierbere a pseudo-componentilor din fractia petroliera. Acest *rationament este însa eronat, deoarece nu tine seama si de proportiile în care se gasesc pseudo-componentii respectivi în amestec.*

Pentru a determina o relatie de calcul al celor doua temperaturi, autorii lucrarii de fata propun un rationament ce se bazeaza pe interpretarea datelor obtinute la determinarea experimentală a curbei PRF asociate unui amestec de hidrocarburi. Experimentul sugereaza ideea acumulării unei *minime cantitati semnificative de distilat* (o picatura) pentru determinarea initialului, iar rationamentul poate fi extrapolat si pentru determinarea finalului. Revenind la problema anterior formulata, în ipoteza în care din fractia petroliera de analizat se supune distilării o cantitate molara egala cu unitatea, se poate deduce faptul ca acea cantitate minima de distilat este suma $\sum_{j=1}^k x'_j$ astfel încât $\sum_{j=1}^k x'_j \leq \epsilon_1 < \sum_{j=1}^{k+1} x'_j$, ϵ_1 fiind o constanta ce reprezinta acumularea minima de distilat considerata semnificativa. În acest caz, initialul fractiei este

temperatura de fierbere T_j corespunzatoare pseudo-componentului j . Un rationament similar se poate face si pentru final (Θ_2 fiind de aceasta data o constanta ce reprezinta cantitatea prin a carei vaporizare se poate considera ca practic s-a încheiat distilarea), astfel încât se pot scrie relatiile de calcul:

$$T_{INITIAL} = T_k \left| \sum_{j=1}^k x'_j \leq \varepsilon_1 < \sum_{j=1}^{k+1} x'_j \right., \quad (3)$$

$$T_{FINAL} = T_k \left| \sum_{j=1}^k x'_j \leq \varepsilon_2 < \sum_{j=1}^{k+1} x'_j \right. \cdot \quad (4)$$

Tinând însă cont de faptul ca temperaturile de fierbere ale pseudo-componentilor au valori discrete, iar indicatia analizorului modelat trebuie sa fie continua, autorii propun modificarea relatiilor (3) si (4) astfel încât $T_{INITIAL}$ si T_{FINAL} sa fie corectati prin interpolare liniara între temperaturile T_k si T_{k+1} , noile relatii (care de altfel au fost cele utilizate de autori) fiind urmatoarele:

$$T_{INITIAL} = T_k \left| \sum_{j=1}^k x'_j \leq \varepsilon_1 < \sum_{j=1}^{k+1} x'_j + \left(\varepsilon_1 - \sum_{j=1}^k x'_j \right) \frac{T_{k+1} - T_k}{\sum_{j=1}^{k+1} x'_j - \sum_{j=1}^k x'_j} \right.; \quad (5)$$

$$T_{FINAL} = T_k \left| \sum_{j=1}^k x'_j \leq \varepsilon_2 < \sum_{j=1}^{k+1} x'_j + \left(\varepsilon_2 - \sum_{j=1}^k x'_j \right) \frac{T_{k+1} - T_k}{\sum_{j=1}^{k+1} x'_j - \sum_{j=1}^k x'_j} \right. \cdot \quad (6)$$

Modelul matematic al analizorului de initial si final este astfel constituit de ecuatiile (2), (5) si (6). În mod evident, varianta propusa nu reflecta caracteristica dinamica de element cu timp mort a analizorului, însă aceasta „deficienta” nu poate fi considerata semnificativa, avându-se în vedere diferenta de câteva ordine de marime între timpul mort al analizoarelor uzuale (câteva minute) si timpul tranzitoriu al procesului de transfer de masa la nivelul instalatiei de distilare atmosferica (câteva ore). În plus, modelul matematic fiind obtinut pe baza interpretarii unor fenomene fizice (si nu prin modelarea comportarii unui analizor real, particular), confera un caracter de generalitate, pragmatism si robustete reprezentarii matematice propuse prin ecuatiile (2), (5) si (6). Acest fapt este dovedit fara echivoc de rezultatele obtinute prin integrarea modulelor de tip „analizor” la nivelul unui simulator pentru studiul comportarii în regim dinamic a procesului de distilare atmosferica.

Un aspect de remarcat este prezenta constantelor Θ_1 si Θ_2 care trebuie determinate „experimental”, aceasta reprezentând „calibrarea” analizorului. Autorii sugereaza compararea repetata a rezultatelor din relatiile (5) si (6) cu rezultatele analizelor de laborator si ajustarea iterativa a constantelor Θ_1 si Θ_2 pâna când se constata o concordanta pertinenta a initialurilor si finalurilor calculate conform metodologiei propuse. În mod cert problema comporta multa atentie, iar directiile complementare de cercetare ulterioara a autorilor includ ameliorarea calitatii ecuatiilor (5) si (6), modelarea caracteristicii de element cu timp mort, precum si determinarea directa a initialului si finalului pe curba STAS.

Un exemplu ilustrativ de utilizare a modulelor de tip „analizor software”

Modelul matematic reprezentat de ecuatiile (2), (5) si (6) a fost elaborat de autori cu scopul declarat de integrare a acestuia în cadrul unui simulator pentru dinamica procesului de distilare atmosferica în vederea caracterizarii din punct de vedere calitativ a produselor obtinute (benzina, petrol 1, petrol 2, motorina 1 si motorina 2) [5, 6, 7, 8]. Astfel, au fost prevazute 5 module de tip „analizor” (câte unul pentru fiecare produs), fiind apoi initiate un numar semnificativ de simulari în vederea validarii modelului matematic propus.

Din motive de spatiu, în cele ce urmeaza sunt prezentate doar rezultatele simularii instalatiei de distilare atmosferica (fara sisteme de reglare a calitatii, în serviciu fiind doar bucelele de reglare a presiunilor si nivelurilor în coloana principala, stripere si vasul de reflux), în ipoteza modificarii cu 10% a debitului de petrol 1.

Scaderea refluxului intern are drept consecinta cresterea ponderii componentilor mai grei în portiunea de coloana afectata de aceasta schimbare. Din aceasta cauza fractiile lichide conduse la stripere vor fi mai bogate în componentii grei, ceea ce conduce la cresterea finalurilor produselor, fapt exemplificat în figura 2.

Toate produsele (petrol 1, petrol 2, motorina 1 si motorina 2) obtinute prin striparea de fractii lichide extrase de pe talere inferioare talerului de extragere a petrolului 1 nestripat (inclusiv) sunt afectate, în sensul cresterii finalurilor cu 3⁰C, 4⁰C, 5⁰C, respectiv 10⁰C. Efectul este însa unidirectional, produsul de vârf (benzina) pastrându-si practic neschimbata temperatura finala de distilare.

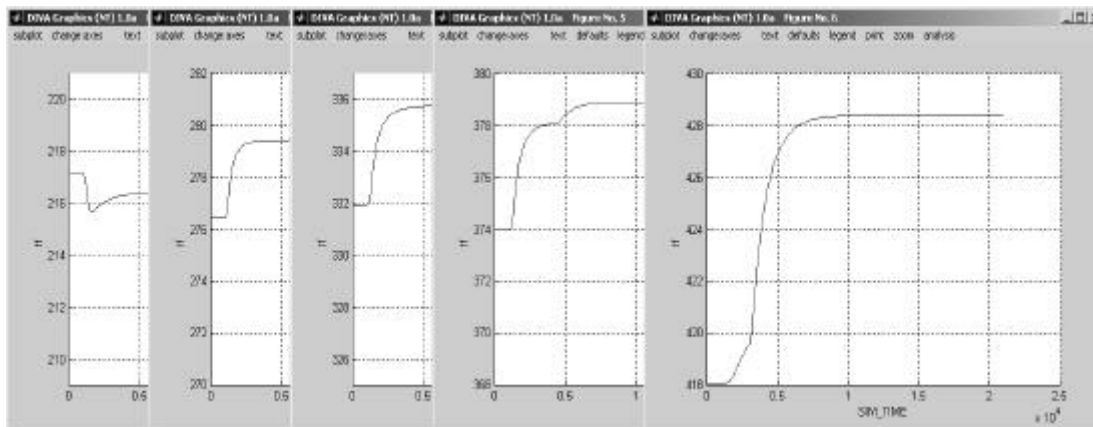


Fig. 2. Variatia finalurilor produselor (benzina, petrol 1, petrol 2, motorina 1 si motorina 2) în conditiile cresterii debitului de petrol 1 cu 10%. Valorile sunt exprimate în ⁰C, iar timpul de simulare în secunde.

În acelasi timp, modificarea refluxului intern are o influenta mai redusa asupra initialurilor comparativ cu influenta manifestata asupra temperaturilor finale de distilare, asa cum se poate observa în figura 3. Produsele petrol 2, motorina 1 si motorina 2 sunt afectate în sensul cresterii initialurilor cu aproximativ 1,5⁰C, 2⁰C si 5⁰C, deci amplitudinea modificarii initialurilor este practic la jumatate fata de cea a modificarii finalurilor. În acelasi timp, temperatura initiala de distilare a petrolului 1 scade cu 1⁰C, iar cea a benzinei ramâne constanta, fiind dictata de temperatura de fierbere a celui mai usor component prezent în alimentarea coloanei.

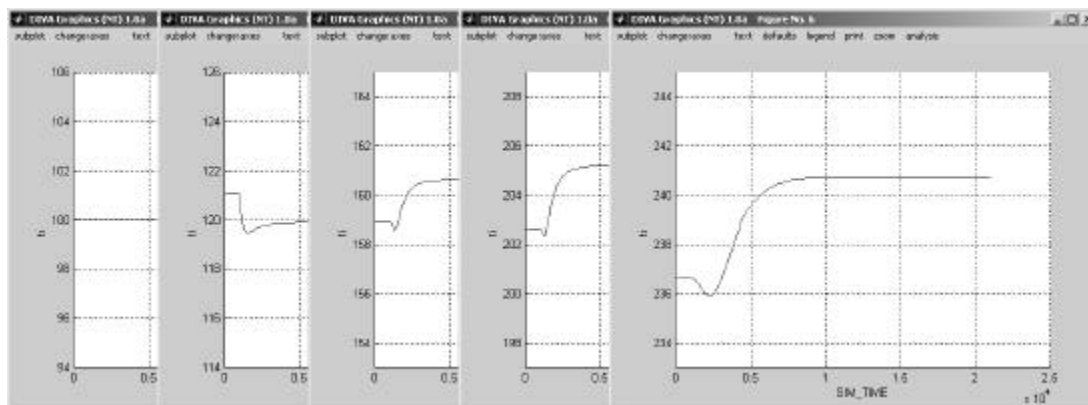


Fig. 3. Variatia initialurilor produselor (benzina, petrol 1, petrol 2, motorina 1 si motorina 2) în conditiile cresterii debitului de petrol 1 cu 10%. Valorile sunt exprimate în ⁰C, iar timpul de simulare în secunde.

Ca remarcă, se observa comportamentul interesant al instalatiei de distilare atmosferica simulate, extrem de apropiat de realitate, prin prezenta raspunsului invers ce caracterizeaza evolutia initialurilor produselor petrol 2, motorina 1 si motorina 2.

Toate aceste rezultate, a caror interpretare se bazeaza atât pe experienta exploatarii industriale cât si pe „bunul simț” ingineresc, dovedesc justetea ipotezelor precum si validitatea implementarii propuse pentru modulele de determinare pe baze inferentiale a calitatii produselor instalatiei de distilare atmosferica [7, 8]. În consecinta, autorii considera ca sunt create importante premise pentru initierea unui experiment la scara industrială, atât în vederea validării riguros calitative a modelului propus, dar mai ales pentru o posibila substituire a analizelor în flux din cadrul sistemului de conducere automata a instalatiei.

Concluzii

Lucrarea de fata a propus o metoda de determinare pe baze inferentiale a calitatii produselor petroliere, cu referire concreta la instalatia de distilare atmosferica. Modelul matematic propus a fost obtinut pe baza interpretarii metodologiei de determinare experimentală a curbei PRF asociate unui amestec de hidrocarburi. Acest fapt aduce un evident caracter de generalitate, pragmatism și robustețe reprezentării matematice, în opoziție cu rezultatele ce s-ar fi obtinut prin modelarea comportării unui analizor real, particular. În finalul lucrării a fost prezentat un exemplu ilustrativ de utilizare a metodologiei propuse, în cadrul unui simulator al dinamicii procesului de distilare atmosferica.

Bibliografie

1. **Chu, J.** et al.: *Process Control: Art or Practice*, Annual Rev. In Control, 22, 1998
2. **Chung, C.-B., Riggs, J.:** *Dynamic simulation and Nonlinear Model-Based Product Quality Control of a Crude Tower*, AIChE Journal, vol. 45, No. 1, 1995
3. **Gilles, E. D.** et al.: *Ein Trainingssimulator zur Ausbildung von Betriebspersonal in der chemischen Industrie*, Automatisierungstechnische Praxis, 32, 1990
4. **Marinoiu, V., Paraschiv, N.:** *Automatizarea proceselor chimice*, vol. II, Editura Tehnica, Bucuresti, 1992
5. **Radulescu, G., Marinoiu, V., Marinescu, C.:** *Un simulator performant pentru investigarea reglării automate a coloanelor de fractionare*, Revista Româna de Informatica și Automatica, vol. 8, nr. 4, 1998
6. **Radulescu, G., Paraschiv, N., Marinoiu, V.:** *Dynamic Simulation of a Crude Oil Unit*, Buletinul UPG, vol. LII, Seria Tehnica, nr.1/2000
7. **Radulescu, G., Paraschiv, N., Marinoiu, V.:** *A Model for the Dynamic Simulation of a Crude Oil Unit*, Control Engineering and Applied Informatics, vol. 2, nr. 1, 2000
8. **Radulescu, G.:** *Contributii la reglarea dupa model a procesului de distilare atmosferica*, Teza de doctorat, UPG Ploiesti, 2002
9. **Robu, V.:** *Distilare-fractionare*, Editura Tehnica, Bucuresti, 1963
10. **Watkins, R. N.:** *Petroleum Refinery Distillation*, Gulf Publishing Company, Houston, 1979
11. **Shinsky, G. F.:** *Distillation Control for Productivity and Energy Conservation*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1984