

**UNIVERSITATEA „PETROL-GAZE” DIN PLOIEȘTI
FACULTATEA DE INGINERIA PETROLULUI ȘI GAZELOR
Departamentul Geologie petrolieră și inginerie de zăcământ**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

**CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂTĂȚIREA RECUPERĂRII ȚIȚEIURILOR
GRELE PRIN PROCESE DE RECUPERARE SECUNDARĂ**

**Doctorand:
Ing. Vasile Tudor**

**Conducător de doctorat:
Prof.univ.dr.ing. Iulian Nistor**

**Ploiești
2017**

CUPRINSUL TEZEI	
REZUMAT	i
DEDICAȚIE	ii
MULȚUMIRI	iii
CUPRINS	iv
NOTAȚII	vi
LISTĂ FIGURI	xi
LISTĂ TABELE	xiv
CAPITOLUL I INTRODUCERE	1
1.1. Model integrat de prognoză.....	1
1.2. Procese termice.....	2
1.3. Obiectivele și sumarul tezei	4
CAPITOLUL II ASPECTE GENERALE A RECUPERĂRII ȚIȚEIURILOR GRELE	6
2.1. Zăcăminte cu țiței greu.....	6
2.2. Metode de recuperare a țițeiurilor grele.....	10
2.2.1. IOR și EOR.....	10
2.2.2. Procese termice EOR.....	14
2.2.3. Tendințele aplicării metodelor termice.....	22
2.3. Injecția cu abur.....	25
2.3.1. Alegerea zăcămintelor pentru injecția cu abur.....	26
2.3.2. Mecanismele procesului de injecție cu abur.....	29
2.3.3. Proiectarea și strategia dezvoltării procesului de injecție cu abur.....	32
2.4. Predicția performanțelor injecției cu abur.....	35
2.4.1. Modele pentru evaluarea performanțelor procesului de injecție cu abur.....	35
2.4.2. Modele statistice.....	35
2.4.3. Modele analitice.....	54
2.4.4. Modele numerice-simulare.....	66
CAPITOLUL III OPTIMIZAREA PROCESELOR TERMICE	90
3.1. Optimizarea proceselor termice de exploatare a zăcămintelor de țiței.....	90
3.1.1. Optimizarea proceselor de injecție cu abur.....	91
3.1.2. Algoritmi de optimizare și aplicarea lor.....	94
3.1.3. Optimizarea producției pentru procesele termice.....	101
3.1.4. Influența unor parametri asupra optimizării procesului injecției de abur.....	106
3.2. Experimentul factor de optimizare.....	107
3.2.1. Conceptul de desing experimental.....	107
3.2.2. Efectele aburului în zăcăminte și aplicațiile lor.....	112
3.2.3. Abordarea experimentală a unui proces de injecție cu abur.....	119
3.2.4. Investigații experimentale a unui proces de injecție cu abur.....	127
CAPITOLUL IV CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂTĂȚIREA MODELELOR ȘI OPTIMIZAREA PROCESELOR TERMICE	140
4.1. Parametri de decizie.....	140
4.2. Model nou analitico-statistic.....	142
4.3. Aplicarea modelului propus pe un zăcământ real.....	150
4.4. Introducerea utilizării conceptului Kalman în rezervor mangement.....	153
4.5. Conceptul filtrului Kalman în rezervor mangement.....	156
4.6. Metodă nouă de aplicare a filtrului Kalman în modelele analitice.....	160
4.7. Metodă analitico-statistică pentru calculul transferului de căldură în sonde.....	164
4.8. Metodă de optimizare matematică a unui proces de injecție cu abur.....	171
4.9. Metodă de optimizare pentru continuarea unui proces de injecție cu abur	174
CAPITOLUL V CONCLUZII	180
BIBLIOGRAFIE	188
ANEXE	200

CONTRIBUTIONS TO IMPROVE RECOVERY HEAVY OILS SECONDARY RECOVERY PROCESSES

To assess the effectiveness of a recovery process heat in feasibility studies or optimization simulators commercial relatively expensive, such as ECLIPSE, SelectEOR, including high prices of studies and often can not be adapted to the specific knowledge of the deposit.

Compared to this, a research objective of this thesis is to develop forecast models simplified, specific and adaptable for steam injection processes in scope sufficient to weather conditions required assessing their feasibility in applying a deposit.

Also considering the many parameters involved in the recovery of heavy oil affecting production and recovery factor, but especially those parameters the operator can intervene such as those of steam injection, another objective the thesis developing a method for process optimization by determining the values which provides optimum efficiency.

To achieve these objectives the work has been structured into 5 chapters, including introduction, bibliography with 100 references and conclusions personal contributions, which comprise referential methods applied thermal steam injection and coinjected steam with other fluids, methods predictive of their effectiveness and results of achieve the objectives of this thesis. The work has 208 pages and contains 79 figures and 9 tables and 10 annexes

Chapter I presents practical ways of forecasting the oil companies need integrated models and content of this thesis.

Chapter II presents methods for applying heat with current trends and development principles deposits candidate election forecasting models steam injection process.

Chapter III contains the current knowledge on optimizing steam injection process and also presents the experiment as an important factor in stages optimization and deployment models coinjected experiments on steam and other fluids.

Chapter IV presents the author's contributions on improving prediction models and optimizing steam injection processes taking into account the results of theoretical research carried out in conjunction with the historical behavior analysis 12 boards operated by steam injection process in DB deposit.

Chapter V contains the conclusions drawn from the data presented in the paper and personal contributions made by the author on methods of oil recovery by thermal recovery methods.

The main contributions of the author of this paper are the following summary:

1. The author has developed a new analytical and statistical model to assess performance steam injection process integrating analytical models with statistical considerations Monte Carlo, resulting in a model with wider coverage situations forecast.

The calculation algorithm has been implemented properly in a program Excel was chosen for the application and performance evaluation of the proposed model steam injection process 12 panels operating by injecting steam from the reservoir DB. Consistency of production made with the forecasted this model is satisfactory;

2. Define principles for applying Kalman Filter in heat management concept for thermal recovery processes;

3. The author has devised a new method for applying Kalman filter in analytical models for predicting the process of steam injection method allows the update of the Kalman filter made after its output and proposed analytical model. Then by running Excel model program for a number of iterations enough, the program will automatically choose alternative values of parameters that satisfies group-criteria chosen, for example minimizing errors to a measured parameter such as production;

4. It is proposed a model that describes the process of heat transfer fluids flowing through the probe to its adjacent environment, and the calculation of the temperature along the probe can be used in various embodiments of the aspects of heat transfer, particularly when bottom sampling probe equipment to measure, such as:

- Determination of fluid flow flowing from different layers in the probe;
- Determination bottom temperatures of the probe;
- Considerations Regarding thermal field of thermal process development ore and oil recovery.

5. The author proposes a mathematical optimization method of a steam injection process geared towards maximizing profit conventionally considered objective function. Parameters that maximize this function are determined by an optimization of application software MATLAB as an algorithm presented in the paper;

6. If several constraints practice site where steam injection process development, optimization is a method for continuing a process of steam injection using prediction model Gomma modified with a local optimization method, where parameters makers have a local area variation, presented in Chapter IV;

Keywords: oil reservoir, heat recovery, steam injection, forecasting, optimization.

CAPITOLUL I INTRODUCERE

1.1 Model integrat de prognoză

În deciziile de explorare și producție, trebuie să fie evaluate strategiile de dezvoltare, de plasament sonde, strategii de drenaj, lift artificial, și investiții de capital. Ca urmare, proiectele rezervor poate necesita mai multe simulări pentru a evalua efectele măsurilor asupra variabilelor de performanță a rezervorului. Industria de petrol și gaze s-a bazat întotdeauna pe previziunile de producție pentru a prezice rentabilitatea zăcămintelor de petrol. Previziunile de producție sunt de asemenea folosite pentru a determina durata de viață a unui zăcămint de petrol. Acest lucru este determinat de estimarea momentul în care prognoza de producție atinge o limită economică predefinită.

În cele mai multe companii petroliere, întrebarea de bază este aceeași, "Care este producția viitoare prognozată?. Care este incertitudinea acestei previziunii?". Acestor întrebări se răspunde în mai multe moduri diferite, folosind mai multe sisteme diferite. De obicei există, un sistem (sau mai multe) pentru planificarea dezvoltării, un alt sistem de planificare operațională pe termen scurt, de multe ori un al treilea sistem de prognoză a rezervelor de petrol. Dar obiectul de analiză singular este zăcămintul cu sondele sale care dă elemente în toate cele trei seturi de prognoze.

Utilizarea actuală, într-o singură companie petrolieră, de o multitudine de sisteme de prognoză arată că, în acest domeniu economico-industrial, nu s-a găsit încă cele mai bune soluții. A utiliza mai multe modele matematice/fizice, dar nu pentru a continua utilizarea sistemelor software multiple ci pentru simulare rezervor în scopul estimării recuperării finale cu un model activ integrat (folosind debitul sondei vs relații cumulative din simulare rezervor sau analiză declin) pentru a calcula efectele diverselor modificări, cum ar fi cele ale secvenței de foraj, de deschidere etc.

Este puțin probabil ca un simplu model fizic/matematic să furnizeze toate răspunsurile iar simularea numerică, unde încercăm să descriem toate fizica relevantă a procesului, este cea mai sigură metodă de estimare a recuperării finale, dar nu este cea mai sigură metoda de estimare a producției pe termen scurt. Debitul de producție pe termen scurt sunt determinate în primul rând de potențialele actuale (pentru că nu se potrivesc perfect istoriei din simulare, va diferi de ceea ce prezice modelul simulator) și de sisteme diferite de prognoză a producției.

Este corect să spunem că simulatoare sunt nepotrivite pentru utilizarea directă pentru prognozarea producției pe termen scurt, din cauza neconcordanțelor inevitabile dintre debitele date de simulator și debitele reale ale sondelor?

Există abordări diferite, care permit un sistem unic IAM (Integrated Asset Modelling) să fie utilizat atât pentru termen scurt cât și pe termen lung de prognoză. Astfel, un model de IAM integrând ambele termene ar putea fi un răspuns în măsură să se ocupe de o gamă largă de situații.

Deocamdată nu există nici o soluție standard cu privire la prognoză. Sânt multe abordări diferite în multe companii. Soluția preferată de obicei, depinde de răspunsurile la întrebările:

- Care este scopul prognozei (deciziile operaționale, planificare, raportare)?
- Care este intervalul de timp de prognoză?
- Cum prevedem producția zăcămintului?
- Cât de sigure sunt datele disponibile?

Provocarea constă de obicei în faptul că aceste abordări diferite de multe ori nu sunt coerente și de foarte multe ori este greu pentru a afla constrângerile sau presupunerile inițiale care au dus la un anumit rezultat de prognoză.

În proiecte, previziunile sunt o combinație a următorilor factori:

- Datele istorice ale unei anumite sonde și ale unui rezervor *pentru a înțelege performanța sondei;*
- Amplasarea geografică și litologică a unui anumit complex, *pentru a obține o înțelegere a potențialului;*
- Prognoză model, de exemplu, cum ar fi curbele declin, *pentru a obține o înțelegere pentru predictibilitate;*

Coroborarea celor 3 dependențe de mai sus, pentru a include un mod de integrare a experienței cu privire la interacțiunea în întregul sistem de prognoză.

1.2. Procese termice

Se prezintă importanța proceselor termice în recuperarea țițeiurilor grele și începuturile aplicației.

1.3 Obiectivele și sumarul tezei.

Se prezintă obiectivele cercetării din această teză privind elaborarea unor modele de prognoză simplificate și cuprinsul lucrării pe capitole.

Pentru aprecierea eficienței unui proces de recuperare termică în cadrul unor studii de fezabilitate sau optimizare se folosesc simulatoare comerciale relativ scumpe, de exemplu ECLIPSE, SelectEOR, care includ prețuri ridicate a studiilor și de multe ori nu pot fi adaptate condițiilor concrete de cunoaștere a zăcămintului.

Fără de aceasta, un obiectiv al cercetării din această teză este elaborarea unor modele de prognoză simplificate, specifice și adaptabile, pentru procesele de injecție de abur cu arie de aplicabilitate suficientă pentru prognoza necesară aprecierii fezabilității acestora în condițiile aplicării pe un zăcămint.

De asemenea considerând multitudinea de parametri ce intervin în procesul de recuperare a țițeiului greu care influențează producția și factorul de recuperare, dar în

mod special acei parametri la care operatorul poate interveni, cum ar fi cei ai aburului de injecție, un alt obiectiv al tezei este elaborarea unei metode de optimizare a procesului prin determinarea valorilor ce asigură o eficiență optimă.

Pentru prognoze pe termen scurt și mediu în această lucrare se propune o metodă statistică recursivă de tip filtru Kalman care împreună cu un model analitic poate crește gradul de certitudine a prognozei.

Pentru realizarea acestor obiective lucrarea a fost structurată în 5 capitole care cuprind referențialul aplicării metodelor termice, injecția de abur și coinjecția aburului cu alte fluide, metodele predictive a eficienței acestora și rezultatele privind realizarea obiectivelor propuse în această teză.

Capitolul I prezintă modalitățile practice de prognozare în companiile petroliere, necesitatea modelelor integrate cât și conținutul acestei teze.

Capitolul II prezintă aspecte generale a metodelor termice cu tendințele actuale de aplicare și dezvoltare, principiile alegerii zăcămintelor candidat și modelele de prognoză a procesului de injecție cu abur.

Capitolul III cuprinde cunoștințele actuale privind optimizarea proceselor de injecție cu abur și deasemenea prezintă experimentul ca factor important în etapele de optimizarea și modele de desfășurare a experimentelor privind coinjecția de abur cu alte fluide.

Capitolul IV prezintă contribuțiile autorului privind îmbunătățirea modelelor de predicție și de optimizare a proceselor de injecție cu abur luând în considerare rezultatele cercetării teoretice efectuate, coroborate cu analiza comportării istorice a 12 panouri exploatare prin proces de injecție cu abur din zăcămintul DB.

Capitolul V cuprinde concluziile ce se desprind din datele prezentate în lucrare și contribuțiile personale aduse de autor în domeniul metodelor de recuperare a țițeiului prin metode de recuperare termică.

Autorul mulțumește conducătorului științific, Prof.dr.ing.I.Nistor pentru sprijinul eficient acordat pe parcursul elaborării lucrării.

CAPITOLUL II

ASPECTE GENERALE A RECUPERĂRII ȚIȚEIURILOR GRELE

2.1 Zăcăminte cu țiței greu

Se exprimă definiții pentru țițeiul greu și zăcăminte de țiței greu și corelații pentru aprecierea vâscozității acestuia.

2.2 Metode de recuperare a țițeiurilor grele.

Se descriu metodele IOR și EOR cât și metodele termice în procesele de recuperare a țițeiurilor grele arătând tendințele actuale a aplicării acestor metode în lume.

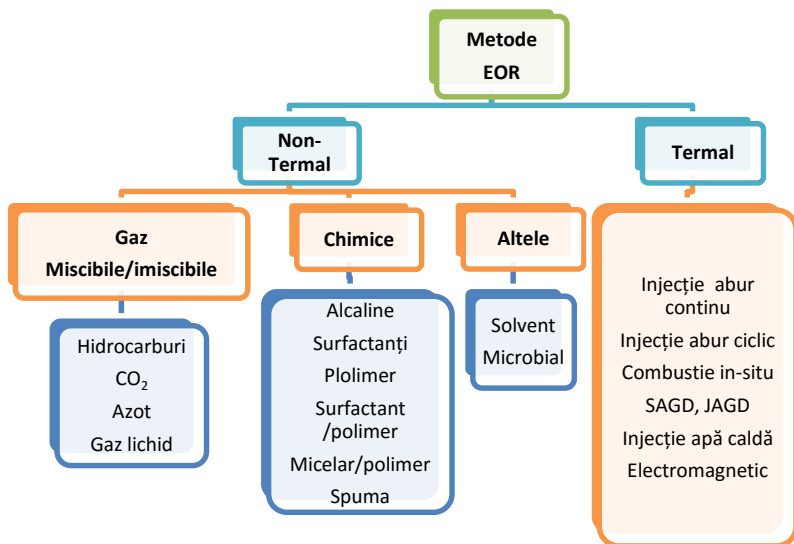


Fig.2.2.1 Metode îmbunătățite de recuperare a petrolului (Ali,SMF&Thomas, S.,1989)

2.3 Injecția cu abur

Se descriu modul și criteriile de alegere a zăcămintelor candidat pentru injecția de abur, mecanismele de recuperare a procesului și posibilități de apreciere a eficienței acestuia, proiectarea și strategia de dezvoltare a procesului de injecție cu abur.

2.4. Predicția performanțelor injecției cu abur

Se prezintă metodele de predicție a performanțelor procesului de injecție cu abur, dezvoltând din grupa modelelor statistice metoda Monte Carlo și Kalman, din grupa modelelor analitice, metoda Chandra iar din grupa modelelor numerice, metoda liniei de curent.

CAPITOLUL III

OPTIMIZAREA PROCESELOR TERMICE

3.1. Optimizarea proceselor termice de exploatare a zăcămintelor de țitei

Optimizarea proceselor este, în esență, o opțiune științifică, care constă în elaborarea și trierea sistematică a soluțiilor posibile ale unei probleme ingineresti, având ca scop final selectarea acelei soluții care, în limitele unui cadru de referință definit prin condițiile admise sau impuse inițial, conduce la folosirea cea mai avantajoasă a resurselor de care se dispune pentru materializarea ei.

Bazele matematice ale proceselor de optimizare le constituie cercetarea operațională, programarea liniară, programarea dinamică, programarea geometrică, algoritmi genetici etc.

Criterii “absolute” de optimizare nu există și nici nu par a fi de dorit. Cea mai simplă procedură de optimizare este “optimizarea intuitivă”, care constă în realizarea de

modele ale unor soluții alternative - prin încercări repetate - se obține o variantă optimă a acesteia. Procesul este empiric și nu duce cu certitudine la cea mai bună soluție posibilă. Procesul de optimizare trebuie să determine valoarea minimă a unei funcții dependentă de variabilele de proiectare, numită funcție obiectiv. În schema generală – conceptuală - a procesului de optimizare se evidențiază bucla iterativă a acestuia. De fapt, din punct de vedere matematic, nu este vorba de rezolvarea unui sistem de ecuații algebrice, care are o soluție unică, ci algoritmul matematic al procesului de optimizare este, de regulă, o “strategie euristică” de găsire a celei mai bune soluții din mulțimea celor posibile. Progresele tehnologice și tehnici inteligente avansate de recuperare a petrolului permite recuperarea tot mai mare. Pentru a realiza acest potențial, sunt necesare tehnologiile de control optime bazate pe feedback-ul modelului pentru a manipula injectia și producția de țiței, astfel încât curgerea să fie uniformă într-un anumită structură geologică. Și în cazul injectiei de abur feedback-ul pe bază de control optimal al tehnologiilor pot permite recuperarea de mai mare de țiței decât cu strategiile operaționale convenționale.

3.1.1. Optimizarea proceselor de injectie cu abur.

Din totdeauna obiectivul în procesul injectiei cu abur este managementul căldurii.

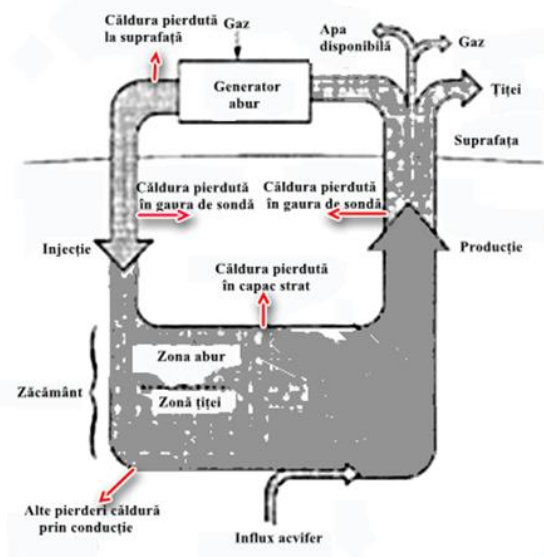


Fig.3.1.1 Reprezentare grafică a componentelor majore ale unui echilibru termic pentru un proces SF^[129]

Fig. 3.1.1^[129] este o reprezentare grafică a componentelor majore ale unui echilibru termic care trebuie să fie efectuate pentru a gestiona corect un proces SF. Ziegler și colab.^[130] a publicat un foarte bun rezumat al unei metode de punere în aplicare

a principiului de gestionare a procesului. În esență, operatorul trebuie să stabilească un proces iterativ continuu pe toată durata proiectului care colectează și analizează date pertinente. Pe baza acestei analize, apoi operatorul face ajustările necesare pentru a optimiza desfășurarea proiectului. Procesul este, de fapt o metodă completă de optimizarea procesului, dar a adoptat numele "management de căldură", deoarece costurile de producere a vaporilor trec peste orice alt cost și sunt chiar de mai multe ori mai mari decât investiția inițială de capital, substanțiale de altfel în SF. Cele trei părți de bază ale metodei, colectarea date, monitorizarea datelor, și ajustări ale procesului sunt descrise mai jos în reprezentarea din Fig. 3.1.2:

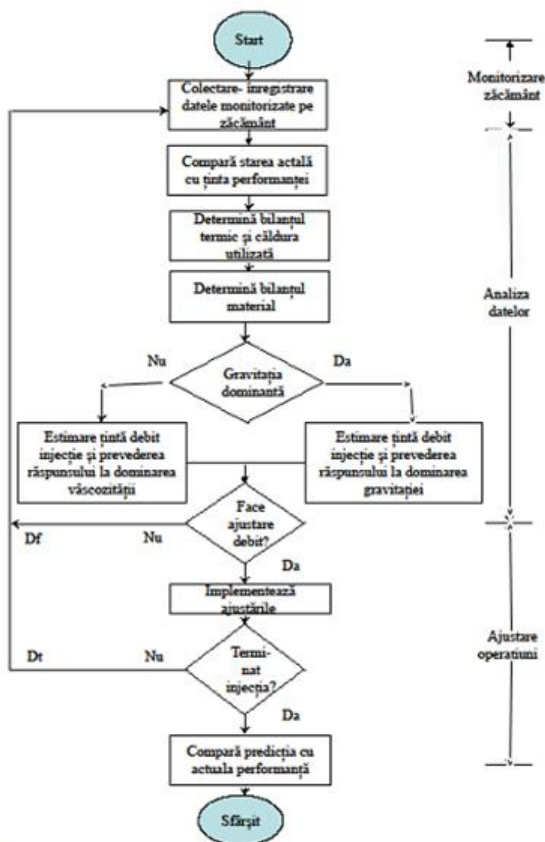


Fig. 3.1.2 Fluxul de lucru pentru optimizarea căldurii

Culegere a datelor. Cum sugerează și numele, colectarea datelor o constituie elaborarea de sume regulate și de obicei mari de informații și date cu privire la funcționarea

sondelor care produc, sondelor de injecție, sondelor de observație, și facilităților de suprafață ce sunt compilate și stocate în baze de date informatice.

Tabelul 3.1 Exemplu de program pentru analiza datelor la managementul căldurii SF^[130]

Pași	Date necesare	Evaluare modele	Evoluția rezultate	Ajustări posibile
1.Compararea performanței actuale cu predicția	Debite țigeti/apă/abur; temperatură abur; curent OPEX; preț țigeti	Compară performanța și profitul actuale și prezise	Identifică decalaje între actual și predicție	
2.Determină bilanțul termic și căldura utilizată	Căldura injectată: debit, temperatură, calitate, presiune, profil în sondă Căldura acumulată în zăcământ: profil temperatură Căldura produsă: raportul apă/țigeti, evacuare coloană, temperatura în conducta de curgere	Compară injecția actuală cu ținta Raportul forțelor de gravitate-viscozitate Bilanț termic Utilizarea căldurii	Estimarea geometriei frontului de abur Estimarea eficienței procesului Estimarea eficienței procesului	Schimbări în sistemul de livrare abur Ajustare intervale de injecție în sonde Schimbare frecvența ciclului de abur în panoul de producție
3.Determină bilanțul material	Date de producție:țigeti, apă, abur Date de injecție:abur, apă	Bilanțul de lichid în timp Bilanț material	Influxul estimat și diferențe	Creșterea productivității sondelor Completări foraje
4. Determină debitul țintă de căldură de injecție	Proprietățile rezervorului			
A.Domină gravitația	Proprietățile fluidelor	Simulare analogie Neuman și Vogel	Necesarul curent de abur de injecție	Debit abur
B.Domină vâscozitatea	Prognoză OPEX Prognoză preț țigeti	Simulare analogie Mandl-Volek și Jones	Program injecție de abur Prognoză producție	Debit abur și calitate.Revine la acesti pași după șase luni

Un exemplu de date și informații considerate în prezent necesare pentru injecția de abur au fost date de Ziegler^[130]. În plus față de tipurile de date colectate, operatorul trebuie să specifice, de asemenea, un program regulat de colectare.

Monitorizarea datelor. Tabelul 3.1 este un exemplu de program de revizuire. În timpul acestor comentarii, datele de performanță ale proiectului sînt comparate cu design original, și ajustările să fie făcute în mod corespunzător.

Ajustări ale procesului. Odată ce proiectul a fost revizuit în raport cu diverse criterii de referință, acesta poate fi înainte de termen, sau nu funcționează conform așteptărilor și este nevoie de o corecție. Tabelul 3.1 conține o listă de schimbări comune. Există doar câteva domenii operaționale care pot fi schimbate.

3.1.2. Algoritmi de optimizare și aplicarea lor.

Se arată algoritmi de optimizare și aplicarea lor în softurile de optimizare.

3.1.3. Optimizarea producției pentru procesele termice

Scopul problemei de optimizare a producției de țiței este de a găsi combinația potrivită setării parametrilor sondelor și zăcământului, adică debitele de injecție și producție, pentru a maximiza o funcție obiectiv economic, și anume, de exemplu, venitul net actualizat (VNP).

Problema de optimizare poate fi formulată după cum urmează ^[132]:

$$\begin{aligned} u^* &= \operatorname{argmax} J \\ f(x_{k+1}, x_k, u_k) &= 0 \quad k = 1, \dots, K_T \\ g(u_k) &\leq 0, \quad x_0 = \widehat{x}_0 \end{aligned} \quad (3.1.5)$$

unde J indică funcția obiectiv și f este modelul zăcământului. Condițiile inițiale sunt reprezentate de \widehat{x}_0 și g care sunt constrângerile corespunzătoare la limite inferioare și superioare cu privire la debitele de injecție și producție. Controlul optim al acțiunilor sunt notate cu u^* .

Forma discretă a VNP este utilizată pe scară largă și este definită prin:

$$J = \sum_{k=1}^{K_T} \frac{r_o q_{o,k} - r_w q_{w,k} - r_i q_{i,k}}{(1+b)^{t_k/r_t}} \Delta t_k \quad (3.1.6)$$

unde r_o indică prețul petrolului, și r_w, r_i costul producției de apă, respectiv al injecției, toate acestea sunt presupuse a fi constante. Pentru a ține cont de deprecierea, ratei de actualizare, b , se adaugă o anumită perioadă de timp de referință, τ_t . Pasul de timp final este K_T , și Δt_k reprezintă intervalul de timp de la pasul de timp al t^k . Debitele de producție țiței, producție de apă și de injecție sunt notate cu $q_{o,k}, q_{w,k}, q_{i,k}$, respectiv, la pasul de timp k .

O varietate de metode sunt disponibile în literatura de specialitate pentru rezolvarea problemei (1.6). În cazul în care gradientul poate fi calculat în mod eficient, optimizarea bazată pe gradient devine promițător de eficient să se ocupe cu sisteme de mari dimensiuni, de exemplu, optimizarea producției în rezervoare de petrol. Metoda a fost folosit în multe lucrări de profil, de exemplu, Jansen (2011).

Funcții obiectiv în injecția de abur. SF este o tehnică majoră de recuperare îmbunătățită a țițeiului (EOR), în industria petrolului implicând simultan căldură, masă, și transport fluide; astfel, aceasta vine cu un caracter intrinsec și complexitate, precum și, în cazul în care interacțiunea termică duce la variația permeabilității, reducerea vâscozității, dilatarea termică, și segregarea gravitațională, influența asupra eficienței dezlocuirii de conformitate verticală a aburului, și debitele de producție a petrolului îmbunătățite.

Mecanisme SF sunt strâns legate de efectele termice și a temperaturii asupra rocii rezervor și proprietăților fluidelor din cauza injecției de abur (Wu 1977). Ca urmare a injecției aburului, rezervorul încălzit se confruntă cu următoarele:

- Creșterea temperaturii rocii rezervor și lichidului, prin convecție și conducția căldurii;
- Reducerea vâscozității țițeiului și apei;
- Creșterea volumului de fluid și de rocă, deci o reducere a densității lor;
- Evaporarea fracțiunilor ușoare de țiței;
- Reducerea forțelor interfaciale;
- Modificarea permeabilității pentru țiței și apă.

Aceste procese termice nu sunt uniforme în întregul rezervor; astfel, un proces steamflood are de obicei mai multe regiuni de curgere funcție de temperaturile fluidelor, care sunt zone cu aburi, banc solvent, banc de apă caldă, banc țiței, și zona inițială.

Într-un proiect SF au loc în general patru faze de dezvoltare (Chandra și Mamora 2005):

- screening-ul zăcământ;
- teste pilot;
- punerea în aplicare la nivel de zăcământ;
- management zăcământ.

Injecția de abur în zona de abur ar putea include (1) distilare cu vapori, (2) dezlocuire cu aburi, și (3) segregare gravitațională. Distilarea cu vapori este procesul de separare a fracțiunilor petroliere ușoare din țițeiul prin acțiunea aburului, care implică patru faze: țiței, apa, abur, apă și hidrocarburi. Dacă țițeiul și apa sunt considerate nemiscibile, presiunea fierbere a amestecului lichid este suma presiunilor individuale de vapori lichizi la temperatura sistemului. Dacă presiune de fierbere este mai mare sau egală cu presiunea sistemului, care este suma presiunilor parțiale ale aburului și hidrocarburi vapori, apoi amestecul lichid va fierbe și emana vapori de componente.

Dacă zona de abur este considerată a fi la o presiune constantă, atunci temperatura de fierbere a amestecului lichid va fi întotdeauna mai mică sau egală cu temperatura de fierbere a fiecărei fază. Astfel, fracțiile ușoare ale țițeiului sunt distilate la o temperatură mai mică sau egală cu temperatura de fierbere a apei.

Randamentul termic. Majoritatea informațiilor disponibile cu privire la randamentul termic al proceselor de injecție cu fluid fierbinte, atât de apă cât și de abur, au fost obținute de la distribuțiile de temperatură calculate în zona încălzită și formațiunile adiacente. Obișnuita abordare a fost de a scrie ecuațiile de echilibru de căldură în ceea ce

privesc temperaturile, și apoi să se introducă orice simplificări sunt necesare pentru a ajuta la obținerea unei soluții analitice sau numerice (Prats 1969).

Expresia analitică cea mai generală pentru randamentul termic al unui proces de injecție a fluidului fierbinte este cel al lui Antimirov, care ia în considerare injecția unui fluid incompresibil încălzit într-un rezervor printr-un număr arbitrar de sonde. Debitul de căldură injectată în rezervor, precum și temperatura de injecție, este o funcție de timp arbitrară. Geometria fluxului orizontal este arbitrară, deși rezervorul este considerat a fi de grosimi și proprietăți uniforme dar și într-un areal infinit. Transferul de căldură în interiorul rezervorului este prin convecție și conducție orizontală și prin conducție verticală. În formațiuni adiacente intervalul spălat, transferul de căldură se face prin conducție în orice direcție.

Prats (1969) a arătat că, în timpul vieții timpurii a injecției de abur, în esență toate căldura din rezervor este în zona de abur. Uneori, conținutul în afara zonei de abur este neglijată.

Funcția eficienței termice. Eficiența termică a unui proces de injecție într-un rezervor este definită ca raportul dintre căldura rămasă în zona de abur și căldura totală injectată.

$$E_{hs} = \frac{V_1 M_1 \Delta T}{Q_t} \quad (3.1.7)$$

Expresia pentru randamentul termic al zonei de abur înainte de momentul critic, t_D , la care căldura începe să treacă prin frontul de condensare.

$$E_{hs} = \frac{1}{t_D} \left(e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + 2 \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) \quad (3.1.8)$$

$$\text{unde } t_D = \frac{42048 * k_h}{h_1^2 M_1} t \quad (3.1.9)$$

Pentru timp mai mare decât momentul critic (t_{cD}), o soluție aproximativă pentru randamentul termic mediu din zona abur a fost dat de Hong (1994) utilizându-se media aritmetică a două randamente reprezentând limitele superioare și inferioare ale creșterii zonei de abur. Marginea superioară se calculează prin asumarea lipsei fluxului de căldură pe frontul de condensare. Hotarul de jos se calculează prin asumarea fluxului de căldură pe fața de condensare, dar nu preîncălzirea a capul și bazei rocii. deoarece soluția Mandl și Volek a neglijat termeni de ordin superior, a fost introdus o ușoară inexactitate. Terez și Barnhardt (1999) au inclus acești termeni și a obținut soluția mai exactă pentru limita inferioară

$$E_{lower\ bound} = \frac{1}{\sqrt{\pi t_D}} 2\sqrt{t_D} - \left(\frac{2\sqrt{t_D - t_{cD}}}{1+h_D} - \int_0^{t_{cD}} \frac{e^u \operatorname{erfc} \sqrt{u}}{\sqrt{t_D - u}} du \right) \quad (3.1.10)$$

unde,

$$\frac{1}{1+h_D} = \frac{e^{t_{cD}} \operatorname{erfc} \sqrt{t_{cD}}}{1} \quad (3.1.11)$$

și

$$h_D = \frac{f_{sd} L_v}{C_w \Delta T} \quad (3.1.12)$$

De reținut că numitorul în ecuația. (3.1.12) reia o valoare constantă pentru capacitatea termică a apei, c_w , pentru tot intervalul de temperatură. Pentru un calcul mai precis, diferențele entalpiilor lichidelor și aburi la temperatura de referință ar trebui să fie folosite. Terez și Barnhardt (1999) a sugerat, de asemenea, un nou factor de ponderare pentru eficiența termică medie în zona cu abur:

$$\bar{E}_{hs} = E_{upper\ bound} - \left(\frac{1}{1+h_D}\right) \Delta E \quad (3.1.13)$$

Deși această formulare este arbitrară, este de așteptat pentru a oferi estimări rezonabile de eficiență termică zona abur pentru calități de abur mai mare de aproximativ 0,2. Calculul raportului țigetei / abur pentru procesele de abur de slabă calitate, cu toate acestea, nu este recomandată deoarece modelul descris în secțiunea următoare nu ține cont de unitatea de apă caldă care ar predomină într-o unitate de abur de calitate inferioară.

Funcția raport țigetei/abur. Maximul raportului țigetei/abur (F_{os}) este definit ca raportul dintre volumul de țigete îndepărtat din zona de abur cu volumul de apă având o masă egală cu cea a aburului injectat. Volumul de țigete deplasat este

$$N_d = A_s \cdot h_r \cdot \emptyset \cdot \Delta S \quad (3.1.14)$$

Volumul de abur necesar poate fi calculat din căldura în zona de abur, randamentul termic, precum și conținutul de căldură al aburului:

$$V_1 = \frac{M_1 A_s h_r (1/E_{hs})}{\rho_w (c_w \Delta T - f_{sd} L_v)} \quad (3.1.15)$$

$$F_{os} = \frac{N_d}{V_1} \quad (3.1.16)$$

$$\frac{F_{os}}{\emptyset \Delta S \left(\frac{z_n}{z_t}\right)} = \frac{\bar{\rho}_w c_w}{M_1} (1 + h_D) \bar{E}_{hs}(t_D, h_D) \quad (3.1.17)$$

Pentru că, în cazul în care raportul dintre capacitățile de căldură a apei și zona brută de abur este constant, raportul țigetei / abur împărțit la proprietățile petrofizice adimensionale este o funcție numai t_D și h_D .

Raportul țigetei/abur echivalent. Pentru a standardiza raportul țigetei/abur la echivalentul 1000Btu/lbm abur la ieșirea din cazan, este necesară următoarea corecție:

$$F_{ose} = \frac{1000}{c_w (T_1 - T_b) + f_{sb} L_v} F_{os} \quad (3.1.18)$$

Bilanț energetic global. Raportul țigetei / abur echivalent poate fi modificat pentru a defini raportul dintre energia recuperată din proces la energie necesar pentru a genera abur.

$$E_D = \frac{\gamma_o H_o F_{ose} E_b}{1000} \quad (3.1.19)$$

O relație simplă între greutatea specifică și valoarea termică a țigetei este:

$$H_o = 13100 + 5600 / \gamma_o \quad (3.1.20)$$

$$E_D = (13,1\gamma_o + 5,6) E_b F_{ose} \quad (3.1.21)$$

3.1.4. Influența unor parametri asupra optimizării procesului injecției de abur

Predicția performanțelor injecției de abur în funcție de valorile unor parametri ai zăcămintului și ai aburului a fost și este o preocupare importantă a specialiștilor din domeniu. Există trei opțiuni majore disponibile în literatura de specialitate pentru estimarea răspunsului rezervorului la SF (Chen și Sylvester 1990):

- corelații empirice: acestea sunt utile pentru corelarea datelor într-un câmp și pentru a prezice performanța noilor noi sonde în zăcăminte similare;
- modele analitice simple: primitivitate de corelații empirice și natura detaliată a simulării numerice, modele analitice efectuate o abordare rapidă în evaluarea SF de încredere;
- simulatoare numerice multifazice, multicomponent,: simulări numerice oferă soluții foarte riguroase pentru bilanțuri materiale și energetice. Timp de calcul mare și sensibilitate la proprietățile rocilor și fluidelor sunt dezavantaje ale acestei opțiuni.

3.2. Experimentul factor de optimizare a proceselor termice

3.2.1. Conceptul desing experimental

Experimentul este un test în condiții controlate, care se face pentru a demonstra un adevăr cunoscut sau să examineze validarea unei ipoteze.

Metoda științifică pentru cercetarea unui proces, în scopul optimizării lui, constă în patru etape:

1. Observația, se formează o ipoteză;
2. Experiment;
3. Analiza rezultatelor, care vor sprijini ipoteza sau o vor respinge;
4. Se formează o nouă ipoteză.

Cuplarea modelului experimental cu optimizarea. Descrierea rezervorului este o parte principală a modelului de optimizare. Pentru acest lucru, accentul este pus pe un rezervor care este un candidat pentru injecția cu abur. Incertitudinile studiate au fost clasificate în două tipuri-modele. Incertitudini subterane ar fi legate de rezervor, care sunt dincolo de controlul operatorului. În cazul de față, acestea includ:

- Porozitate;
- Permeabilitate;
- Pierderea de căldură în (capacitatea de căldură a rocii) rezervor;
- Prețul petrolului;
- saturație țiței, S_{orc} .

Incertitudini de proiectare ar fi parametrii care pot fi controlați. Pentru cazul de față, acestea ar include:

- Temperatura aburului;
- Calitatea de abur.

Diferențele părți ale modulului de optimizare sunt descrise după cum urmează^[3]:

$$\text{Funcție obiectiv } z = \sum \left[(p(t) * q(t) - opex(t) - capex(t)) * \frac{1}{(1+r)^t} \right] \quad (3.2.2)$$

unde, z este VAN în USD; $p(t)$ este prețul mediu al petrolului în USD/bbl, care este menținută constantă, de exemplu 60 USD/baril; $q(t)$ este producția cumulată de țiței în STB; $opex(t)$ este cheltuiala de operare la momentul t în USD; $capex(t)$ este cheltuiala de capital la momentul t în USD; și r este rata de actualizare, care este menținută constantă la 15%.

Funcții de cost. Costurile sunt formate din cheltuielile de exploatare și investiții de capital în instalații inițiale, extinderea infrastructurii și sonde.

Cheltuieli de capital. Cheltuieli de capital atunci când sistemul este inițializat este compus din două componente, după cum urmează:

$$Capex = C_{well} + C_{plat} \quad (3.2.3)$$

unde, C_{well} este costul de foraj a sondelor și C_{plat} este costul facilităților.

Cheltuieli de operare (opex). Opex reprezintă costul variabil de producție, și aceasta este o funcție a volumului producției precum și cantitatea de abur injectat. Acesta este definit ca:

$$opex = vc_{prod} \times Q_{cum} + fc_{opex} \times SteamInj \quad (3.2.4)$$

Unde, vc_{prod} este costul variabil asociat cu producția de petrol, iar acesta este menținut constantă la 10 USD / bbl; Q_{cum} este țițeiul cumulativ produsă în STB; $SteamInj$ este aburul total injectată în MSCF/D în toate sondele; și fc_{opex} este costul de operare în USD pentru fiecare MSCF de abur injectat. Aceasta include costul de compresie, costul energiei, costurile de transport, etc.

Optimizarea fluxului de lucru. Fluxul de lucru pentru integrarea întregului proces de definire a incertitudinilor și cuplarea simulării și optimizării rezervorului este prezentată în Fig. 3.2.1.

Acest model a fost folosit de Cenik Temizel ș.a.(2013)^[3] Primul pas al procesului implică crearea zonei de incertitudinilor printr-o simulare Monte Carlo. Incertitudinile sunt definite, astfel:

- Porozitatea: $0,3 \pm 0,1$;
- Permeabilitate: $0,5 \pm 0,2$ darcies;
- Pierderea de căldură din rezervor: 35 ± 3 BTU / ft-zî °F;
- Prețul petrolului: 80 ± 20 USD / bbl;
- saturație țiței, Sorc: $0,5 \pm 0,1$;

Aceste incertitudini sunt constituite ca o distribuție normală. Utilizând eşantionare Hypercube Latin, fiecare dintre aceste valori intră în instrumentul de simulare rezervor. Acest lucru se întâmplă în a doua etapă a procesului, iar această unealtă poate fi un simulator de rezervor, cum ar fi Nexus. Cu toate acestea, instrumentul ar putea fi înlocuit cu un simulator analitic sau un model de suprafață. Rezultatele de simulare rezervor sunt introduse într-un model de calcul

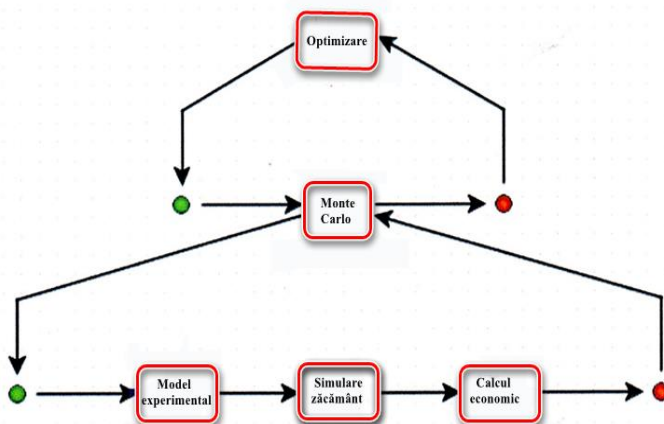


Fig. 3.2.1 Fluxul lucrului pentru optimizarea unui proces^[131]

economic în care factorii de bază, costurile de producție și veniturile intră în calculul NPV. Aceste trei etape sunt executate în serie într-o simulare Monte Carlo pentru a obține media de distribuție și abaterea.

Există o buclă de optimizare care rulează pe partea de sus a simulării Monte Carlo. Obiectivul acestui proces de optimizare este pentru a maximiza VAN. Parametrii de proiectare ai procesului de optimizare, de exemplu, sunt:

- Temperatura aburului
valoare minimă: 450° F
valoare maximă: 550° F
- Calitatea aburului
valoarea minimă: 50%
valoarea maximă: 80%

Șarjele de optimizare au fost realizate folosind cinci metode diferite. Rezultatele sunt rezumate în tabelul 3.4.

Tabelul 3.4-Rezultate din rularea optimizărilor^[131]

Tehnica de optimizare	Optimul temperaturii abur [°F]	Optimul calității abur	Media NPV [Milion USD]	Abaterea pentru NPV [%]
NLPQL	450	80	5,7	44
Simulare norm	450	80	5,8	40
MIGA	452	79	5,7	43
Hooke-Jeeves	451	79	5,8	45
MMFD	450	80	5,7	42

Concluziile ce se desprind din acest studiu ^[131], al cărui obiectiv a fost de a dezvolta un flux de lucru pentru un cuplaj dinamic de simulare rezervor cu analiza incertitudinii și optimizare economică, metodologie ce ar oferi un mecanism solid de manipulare a incertitudinii și ajutor pentru ingineri de a lua decizii informate, ar putea fi rezumate astfel:

- Nu există diferențe semnificative observate prin utilizarea diferitelor tehnici de optimizare. Calculele cu tehnici intensive de explorare oferă aceeași precizie în rezultatele ca gradientii de tehnici numerice directe.

- Incertitudinile din valorile de saturație de petrol au cel mai mare impact asupra VAN a unei injecții de aburi, chiar mai mare decât efectul de variație a prețului petrolului. Incertitudinile din pierderea de căldură și permeabilitate nu au un efect semnificativ.

În timp ce o abordare standard Monte Carlo care să se ocupe de incertitudini s-ar putea să nu surprindă cu exactitate valoarea asociată ca având opțiunea de a răspunde la rezultate viitoare, cum ar fi incertitudini de descoperire, aceasta nu oferă o platformă pentru a obține un rezultat inițial și a determina variabilele optime de operare pe zăcământ.

3.2.2. Efectele aburului în zăcământ și aplicațiile lor

Se prezintă efectele aburului asupra rocii rezervor și a fluidelor conținute cât și unele aplicații a acestor efecte care îmbunătățesc recuperarea.

3.2.3. Abordarea experimentală a unui proces de injecție cu abur^[133]

Se prezintă modul de abordare a unui proces experimental prin descrierea unui experiment de coinjecție abur-fluide multiple și a rezultatelor obținute.

3.2.4 Investigația experimentală a unui proces de injecție cu abur.^[141]

Se prezintă modul de investigare a posibilităților de dezvoltare a unui proces experimental prin descrierea unui experiment de coinjecție abur-surfactanți și a rezultatelor obținute.

CAPITOLUL IV CONTRIBUȚII LA ÎMBUNĂȚĂȚIREA MODELELOR ȘI OPTIMIZĂRII PROCESELOR TERMICE

4.1 Parametrii de decizie în injecția cu abur

Modelul analitic pentru predicția performanțelor procesului de injecție cu abur arată cel mai bine parametrii de influență a eficienței procesului^[155]. Aceștia sunt:

- Parametrii mediului solid din zăcământ;
- Parametrii mediului fluid din zăcământ;
- Parametrii agentului de injecție, abur.

Elementele principale din modelul analitic sunt^[155]:

Raportul cumulativ de țigeti dezlocuit pentru zona de abur la apa injectată ca abur:

$$F_{Os} = \frac{\rho_w c_w h_n}{M_1 h_t} \Delta S_o \phi (1 + F_{hD}) E_{hs} \quad (4.1)$$

Unde:

$$F_{hD} = \frac{f_s h_{fg}}{c_w \Delta T} \quad (4.2)$$

$$E_{hs} = \frac{1}{t_D} \left(e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) \quad (4.3)$$

$$t_D = \frac{42048 * k_h}{h_t^2 M_1} t \quad (4.4)$$

Volumul cumulativ de țigeti dezlocuit este:

$$N_d = F_{Os} * V_{sinj} \quad (4.5)$$

Deasemenea, avem:

$$\Delta S_o = f(h_t S_{oi}) \quad (4.6)$$

$$h_{fg} = 865 - 0,208 p_s \quad (4.7)$$

$$h_f = 91 p_s^{0,2574} \quad (4.8)$$

Cantitatea de țigeti dezlocuit, respectiv recuperarea, conform cu relațiile (4.1-4.8) este dependentă de următorii factori care nu pot fi influențați, modificați de operator în timpul procesului:

- Densitatea apei, ρ_w ;
- Căldura specifică a apei, c_w ;
- Grosimea netă și brută a stratului productiv, h_n, h_t ;
- Capacitatea termică a stratului productive, M_1 ;
- Saturația inițială cu țigeti, S_{oi} ;
- Porozitatea, ϕ ;
- Permeabilitatea orizontală a zăcământului, k_h .

De asemenea în relațiile (4.1-4.8) se observă prezența și a parametrilor:

- Calitatea, titlul, aburului, f_s ;
- Căldura latentă a aburului, h_{fg} ;
- Temperatura de saturație a aburului injectat, T_s ;
- Debitul, respectiv volumul de abur injectat, V_{sinj} ;
- Timpul de injecție, t .

Luând în considerare un proces determinat de o sondă de injecție cu o adâncime, un diametru, un zăcământ cu caracteristici determinate, de exemplu, temperatura inițială de zăcământ, aburul este saturat, durată proces determinată, ș.a., atunci variabilele care pot fi modificate de operator în timpul procesului sunt:

- ✓ Titlul aburului la ieșirea din generatorul de abur, f_s ;
- ✓ Presiunea de injecție a aburului saturat, p_s ;
- ✓ Debitul de injecție, q_s .

Deci volumul țigetiului dezlocuit este o funcție de forma:

$$N_d = f(C_s, f_s, p_s, q_s) \quad (4.9)$$

care, în condițiile unei maximizări, poate fi definită ca *funcție obiectiv* iar parametrii variabili și independenți ai funcției pot fi considerați *parametri (variabile) de decizie*, unde C_s este un parametru complex constant ce cuprinde influența parametrilor mediului solid și fluid ai zăcământului.

Incertitudinea parametrilor de calcul. Modelele analitice pentru evaluarea performanțelor proceselor termice folosesc legi fizice care guvernează procesele fizice ce se desfășoară în cadrul proceselor de recuperare termică. Determinarea parametrilor procesului care interesează în evaluarea fezabilității proiectului, cum ar fi ca de exemplu producția de șteițe în timp, se face folosind instrumentul matematic ce operează cu parametrii care caracterizează proprietățile fizice ale mediului solid și fluidelor conținute^[156;157].

Parametrii fizici ce caracterizează mediul solid din zăcământ și fluidele care-l saturează se determină:

- în condiții de zăcământ, „in situ”;
- în condiții de suprafață, cu reconstituirea condițiilor de zăcământ;
- în condiții atmosferice obișnuite.

În condiții de zăcământ, determinarea valorilor parametrilor se face prin metode indirecte geofizice, ca de exemplu electrice, acustice, radiații, ș.a. toate suferind de corelații slabe, pentru diversitatea situațiilor existente, a parametrului măsurat cu cel determinat. Deși parametrii fizici în condiții de zăcământ sunt cei mai autentici de folosit în cadrul modelului matematic, aceștia au o incertitudine importantă datorită caracterului indirect și slab corelativ.

În condiții de suprafață reconstituirea condițiilor de zăcământ este foarte dificilă, astfel că determinările sunt afectate de erori inerente.

În condiții atmosferice proprietățile se schimbă, ca de exemplu tasarea mediului solid.

Cea mai importantă cauză a incertitudinii valori parametrilor o constituie faptul că accesul la valorile proprietăților fizice se face prin sonde cu carote sau investigații geofizice, iar aceste valori caracterizează mediul din acel spațiu care, la nivelul zăcământului reprezintă un procent infim, iar supoziția unei variabilități spațiale relaționale sau constante a parametrilor nu aduc o siguranță a valorilor determinate la nivelul zăcământului și implicit a rezultatelor modelului. Mai simplu spus „se fac calcule pentru zăcământ pe ceace nu mai există în zăcământ”(carota). Evident că aceste incertitudini pot conduce la erori considerabile fiind amplificate de model.

4.2. Model analitico-statistic propus

Având ca bază de plecare modelele analitice Marx&Langenheim^[124], Mandl&Volek^[112], Myhill&Stegemeir^[113], Jones^[126], Chandra^[127], Dutt^[128] s-a revizuit și integrat modelele fizice suport al acestor modele analitice într-un model nou fizic și analitico-statistic bazat și pe observațiile din teren. Acest model este descries în continuare:

Parametrul esențial privind fezabilitatea exploatării printr-un proces de injecție cu abur este producția de țiței și evoluția ei în timp, adică producția prognoată, care de altfel, constituie scopul modelelor aplicate. Pe baza acestora sunt evaluate strategiile de dezvoltare, privind strategia de exploatare și distribuția sondelor, modalitatea extracției fluidelor, investiții de capital și ca urmare, precizarea rentabilității zăcămintelor de petrol, durata de viață când prognoza de producție atinge o limită economică predefinită

Majoritatea modelelor folosesc creșterea zonei de abur pentru a calcula recuperarea țițeiului în timp și cumulativă. Ele sunt o modalitate simplă de a obține o estimare rapidă a viabilității proiectului

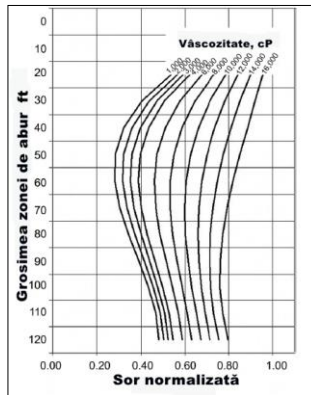


Fig 1.1 Graficul funcției adimensionale vs.saturația în țiței rezidual la grosimea brută a stratului Conform cu metoda Myhill și Stegemeier volumul cumulativ de țiței dezlocuit este:

$$N_d = F_{OS} * V_{sinj} \quad (4.10)$$

Raportul cumulativ de țiței dezlocuit pentru zona de abur la apa injectată ca abur rezultă din bilanțul termic al procesului de încălzire a zăcământului egalând cantitatea de căldură conținută de abur cu cea absorbită de zăcământ și fluidele conținute, obținând:

$$F_{OS} = \frac{\rho_w c_w h_n}{M_1 h_t} \Delta S_o \phi (1 + F_{hD}) E_{hs} \quad (4.11)$$

Raportul entalpiei aburului la entalpia apei este dat de:

$$F_{hD} = \frac{f_s h_{fg}}{c_w \Delta T} \quad (4.12)$$

stratului cu abur și vâscozitatea inițială a țițeiului^[151]

și determină capacitatea aburului de a ceda căldura masei zăcământului, căldură ce produce desaturarea de țiței a zăcământului cu ΔS_o , de la saturația în țiței inițială S_{oi} la saturația în țiței rezidual după dezlocuirea cu abur, S_{or}

Saturația în țiței rezidual este un element de calcul foarte important și în același timp greu de determinat, atât în laborator cât și din date de investigație geofizică sau de producție.

Texaco^[34] a publicat o corelație care estimează saturația de țiței rezidual pe baza imenselor date obținute dealungul deceniilor de SF în zăcămintele de la River Kern. Ei au concluzionat că saturația de țiței rezidual este o funcție de grosimea zonei brute, vâscozitatea și saturația inițială ale țițeiului înainte de procesul SF, Fig 4.1. Saturația de țiței rezidual crește continuu cu creșterea vâscozității țițeiului ajungând la domeniului de țiței imobil rămânând la o valoare ridicată. Datele lor se bazează pe o saturație inițială de țiței de 55%, grosime de strat sub 36m și vâscozitate inițială a țițeiului sub 16000cP, necesitând prudețnă în aplicare în afara acestor limite. Fig 4.1 arată această corelare pentru orice saturație inițială de țiței, alternativ calculându-se din ecuațiile:

$$S_{or} = F_{sor} * S_{oi} \quad (4.13)$$

$$S_{orb} = \frac{49,98 - 1,62h_t + 0,021h_t^2 - 0,000082h_t^3}{50} \quad (4.14)$$

$$S_{ora} = \frac{50,53 - 0,208h_t - 0,00026h_t^2 - 0,0000999h_t^3}{50} \quad (4.15)$$

$$F_{sor} = S_{or} + S_{oi}(S_{orb} - S_{ora}) \left(\frac{\mu_{oi}}{15000} \right) \quad (4.16)$$

Acest proces de încălzire a stratului se desfășoară în condițiile unor pierderi de căldură în vecinătățile zăcămintului adică în stratele adiacente din capul și baza acestuia. Prin urmare eficiența termic, după modelul Marx și Langenheim^[124] va fi o funcție de aria de contact cu cele două strate adiacente și conductivitatea acestora cât și de capacitatea termică a rocilor din zona de abur a zăcămintului și a stratelor adiacente. Aplicând legea lui Fourier pentru procesul de transfer tranzitoriu prin conducție a căldurii de la stratul productiv la stratele din cap și bază se găsește eficiența termică, sub forma:

$$E_{hs} = \frac{1}{t_D} \left(e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) \quad (4.17)$$

dacă $t_D \leq t_{cD}$, și

$$E_{hs} = \frac{1}{t_D} \left[\left(e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} + \sqrt{\frac{t_D}{\pi}} - 1 \right) - \sqrt{\frac{t_D - t_{cD}}{\pi}} \left(\frac{1}{1 + F_h} + \frac{t_D - t_{cD} - 3}{3} e^{t_D} \operatorname{erfc} \sqrt{t_D} - \frac{t_D - t_{cD}}{\sqrt{\pi t_D}} \right) \right] \quad (4.18)$$

(4.18)

dacă $t_D > t_{cD}$

unde:

$$t_D = \frac{42048 * k_h}{h_t^2 M_1} t \quad (4.19)$$

în care se asumă capacitatea termică a rocii din stratul de la bază și cel din cap ca fiind de 1,2 ori mai mare decât a rocii din zona de abur a stratului productiv, corelație cu care se convertește timpul de injecție în timp adimensional.

$$t_{cD} = 0,48 F_{hD}^{1,78} \quad (4.20)$$

este timpul injecție de abur la momentul când transferul de căldură prin convecție, se face prin frontul de condensare, adimensional.

Unii parametri sunt calculați din corelațiile^[111]:

$$h_{fg} = 865 - 0,208 p_s \quad (4.21)$$

$$h_f = 91p_s^{0,2574} \quad (4.22)$$

Debitul de țigeti dezlocuit va fi:

$$q_{od} = \frac{N_{dn} - N_{dn-1}}{\Delta t} \quad (4.23)$$

Având în vedere dispersia ^[158] fluidelor și căldurii în zăcământ cât și spațierea sondelor de injecție și producție eficiența dezlocuirii și a încălzirii rocii se micșorează și se produce o întârziere a răspunsului efectelor frontului de abur în sondele de producție^[159]. Acestea pot fi cuprinse într-un „factor de captură”, compus din trei elemente adimensionale, care convertește debitul dezlocuit în debit de producție:

$$q_o = q_{od} A_{cD} V_{oD} V_{pD} \quad (4.24)$$

unde A_{cD} exprimă influența vâscozității țigetiului și zona de abur:

$$A_{cD} = \left\{ \frac{A_s}{A[\alpha \ln(\mu_{oi}/100)]^{1/2}} \right\}^2 \quad (4.25)$$

unde

$$A_s = \frac{Q_{inj} h_n M_1}{4k_h(T_s - T_f) M_2 43560} E_{hs} \quad (4.26)$$

și

$$Q_{inj} = 14,6i_s * \{h_f + f_s h_{fg} - c_w(T_f - 32)\} \quad (4.27)$$

Titlul aburului f_s se determină prin calculul pierderilor de căldură de-a lungul sondei, de la suprafață la perforaturile sondei de la nivelul stratului productiv. Se cunosc parametrii aburului la suprafață în capul de injecție p_s, T_s, f_{sz} .

Pentru a determina pierderile de căldură în stratele traversate de sondă și a găsi parametrii de intrare ai aburului prin perforaturile sondei în zăcământ, se calculează întâi pierderea de presiune^[23]. Pentru aceasta se imparte adîncimea sondei, h_z , în n tronsoane, iar ecuația lui Bernoulli scrisă pentru un tronson va fi:

$$p_{z-1} = p_z + \rho_s \Delta h_z + \rho_s \frac{w_z^2}{2} - \Delta p_{frz} \quad (4.28)$$

unde: p_z, p_{z-1} - presiunile în punctul $z+1$, respectiv z [at]

ρ_s - densitatea aburului [Kg/m^3]

Δp_{frz} - pierdere de presiune prin frecare.

w_z - viteza aburului prin tubing sau coloană în punctul z [m/s]

$$w_z^2 = \frac{16q^2 v_z^2}{\pi^2 d_z^4} [m^2 / s^2]$$

q - debitul masic al aburului [Kg/s]

v_z - volumul specific al aburului saturat umed [m^3/Kg]

d_z - diametrul țevilor de extracție sau coloană prin care se injectează [m]

Plecînd de la parametrii aburului de la capul de injecție se calculează succesiv presiunea de-a lungul sondei și apoi ceilalți parametri ai aburului iar apoi p_z, T_z, f_s .

Temperatura mediului pe tronsonul z este dată de treapta geotermică prin relația:

$$T_{medz} = T_{sup} + \frac{T_z + T_{z+1}}{66} \quad (4.29)$$

unde: T_{sup} -temperatura solului la suprafață

T_{z-1}, T_z - temperatura în două puncte succesive

Căldura disipată din sondă în stratele traversate pe tronsonul z :

$$Q_z = \pi d_z \Delta h_z (T_z - T_{medz}) U_z \quad (4.30)$$

Deocamdată se consideră ca U_z , coeficientul de transfer al căldurii în stratele traversate ca fiind constant pe toată adîncimea sondei și cuprinde totalitatea proceselor de transfer a căldurii tubing-coloană-inel ciment-strate traversate ^[151].

Căldura totală disipată din sondă în stratele traversate:

$$Q_n = \sum_{z=1}^{z=n} Q_z \quad (4.31)$$

În acest mod se ajunge la parametrii aburului la intrarea în zăcămînt p_n, T_n, f_s , semnificațiile fiind arătate anterior, care vor fi folosiți în desfășurarea calculului pentru zăcămînt.

V_{oD} este fracția de volum dezlocuită din resursă:

$$V_{oD} = \left(1 - \frac{N_d}{N} \frac{S_{oi}}{S_{oi} - S_{or}} \right)^{1/2} \quad (4.32)$$

iar pentru stadiu III când se dezlocuie prin spălare, cu abur sau apă caldă, țiteiul rămas mobil în tot zăcămîntul, se folosește relația^[6]:

$$V_{oD} = A_{cDmax} \left\{ \exp \left[-\beta \left(1 - \frac{N_{dmax}}{N} \frac{S_{oi}}{S_{oi} - S_{or}} \right) \right] \right\} \quad (4.33)$$

unde:

$$\beta = 17,93 N_c + 1,3401 \quad (4.34)$$

$$N_c = \frac{7758 A h_t \phi (1 - S_{or} - S_{wc})}{365 i_s t_c} \quad (4.35)$$

$$t_c = \frac{t_{cD} h_t^2 M_1^2}{35040 k_h M_2} \quad (4.36)$$

V_{pD} cuantifică fenomenul reumplerii porilor ocupați de gaz cu abur:

$$V_{pD} = \left(\frac{V_{s,inj} * 5,62}{43560 A h_n \phi S_g} \right)^2 \quad (4.37)$$

iar pentru $S_g = 0$, $V_{pD} = 1$.

În aceste calcule se fac asumări cum sînt: panou în 5 puncte, presiunea în zăcămînt constantă.

Evoluția în timp a parametrilor ce caracterizează procesul SF impun analiza procesului, în scopul unei predicții a rezultatelor și eficienței, în 3 stadii de desfășurare^[160]:

Stadiul producției de țigete rece

Stadiul I al producției la rece se consideră a fi cel care se desfășoară de la începutul procesului până când bancul de țigete acumulat în fața frontului de abur și apă caldă ajunge la una din sondele cea mai apropiată de sonda de injecție. Curgerea se desfășoară în condițiile unei injecții de abur cu parametri cunoscuți și a unei extracții echivalente cu parametrii deasemenea cunoscuți

Stadiul I de producție poate începe în 3 situații posibile:

- Procesul de injecție cu abur începe odată cu punerea în producție a zăcământului. Debitul de țigete extras este egal debitul masic de abur injectat.
- Procesul de injecție cu abur începe după un timp de la punerea în producție a zăcământului. Debitul brut extras este egal debitul masic de abur injectat. Rația apă-țigete va fi extrapolată statistic conform cu perioada dinaintea inițierii procesului de injecție cu abur.

Parametrul α din relația (4.25) se determină cu ajutorul corelației^[127]:

$$\alpha_I = 0,00015 * i_s + 0,05 \quad (4.38)$$

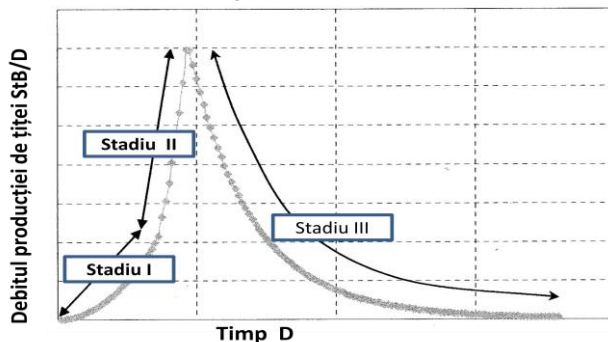


Fig 4.2. Stadiile producției la un proces de injecție cu abur^[6]

Limita stadiului I cu stadiul II de producție se definește ca fiind momentul când bancul de țigete acumulat în fața frontului încălzit de abur și apă caldă ajunge la una din sondele de producție cea mai apropiată de sonda de injecție. Raza echivalentă a zonei de abur și apă condensată este :

$$R_{ab+ac} = \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} \quad (4.39)$$

Stadiul II de producție începe când raza definită prin relația (4.32) este mai mare decât distanța dintre sonda de injecție și sonda de producție cea mai apropiată reală

sau proiectată. În acest stadiu se produc fluidele acumulate în fața frontului de abur „bancul de țigeti” care este mai bogat în țigeti decât cel corespunzător saturației de la începutul procesului.

Sfârșitul desfășurării acestui stadiu este atunci când raza echivalentă a zonei de abur (gaz) ajunge la cea mai depărtată sondă de producție aflată sub influența sondei de injecție. Raza zonei de abur este dată de:

$$R_{ab} = \left(\frac{14,6i_s h_n f_s h_{fg}}{4\pi k_h (T_s - T_f)^{1,2} \cdot 43560} E_{hs} \right)^{0,5} \quad (4.40)$$

În cazul în care timpul critic t_c arată că frontul de abur nu mai avansează de la R_{ab} , căldura injectată fiind insuficientă, calculul se desfășoară în continuare după algoritmul stadiului II.

Parametrul α din relația (4.25) se determină cu ajutorul corelației:

$$\alpha_{II} = -0,0106 * \left(i_s \frac{A_s}{2A} \right) + 2,45 \quad (4.41)$$

stabilită prin analiza statistică a rezultatelor de producție la 12 panouri exploatate prin injecție de abur cât și din simulări.

Vâscozitatea țigetiului încălzit se determină funcție de suprafața relativă a zonei de abur:

$$\bar{\mu}_{oi} = \frac{\mu_{oi}(A - A_s) + \mu_{oi} T_s A_s}{A} \quad (4.42)$$

Stadiul III de producție în condițiile sfârșitului stadiului II și se produce țigeti prin spălarea în continuare a zonei de abur și condens a țigetiului mobil rămas în aceste zone. În stadiul III parametrul α din relația (4.24) se determină cu ajutorul corelației:

$$\alpha_{III} = 41,244 * \left(\frac{A_s}{A} \right)^{10,994} \quad (4.43)$$

stabilită prin analiza statistică a rezultatelor de producție la 12 panouri exploatate prin injecție de abur cât și pe baza rezultatelor simulărilor.

Algoritm de calcul

1. Se stabilesc și determină parametrii aburului la intrarea în zăcământ folosind relațiile 4.21, 4.22 și debitul de abur respectiv cumulatele i_s, V_{sinj} ;
2. Se înscriu datele de intrare într-un fișier tip Excel, tabel 4.1, reprezentând parametrii caracteristici ai zăcământului și aburului de injecție, apoi calculele se fac într-o schemă pe foi de calcul;
3. Potențialul aburului de încălzire a stratului cu fluidele conținute F_{hD} cu relația 4.12 și timpul adimensional al injecției de abur la începutul transportului căldurii prin frontul de condensare t_{cD} cu relația 4.20;
4. Se stabilesc caracteristicile stratului productiv și a stratelor adiacente $h_n, h_t, k_k, M_1, M_2, \phi, A$;

5. Se calculează timpul adimensional de injecție a aburului t_D cu relația 4.19 și apoi eficiența termică adimensională în zona de abur E_{hs} cu relația 4.17 sau 4.18;
6. Se determină saturația de țiței reziduală S_{or} cu corelațiile 4.13, 4.14, 4.15, 4.17 și apoi valoarea desaturării ΔS_o ;
7. Se calculează rația cumulativă de țiței dezlocuită din zona de abur pentru apa injectată ca abur, F_{os} ;
8. Se calculează, cumulativul de țiței dezlocuit, N_d , cu relația 4.10, și debitul dezlocuit q_{od} , care conform cu metoda Myhill&Stegemeir, este și debitul produs;
9. Acest algoritm de calcul, pct.1-8, se implementează într-un program Excel, etapele de calcul se fac pentru un pas de timp stabilit, ca de exemplu anul;
10. Se calculează aria zonei de abur A_s ;
11. Se determină avansul frontului de abur și a bancului îmbogățit cu țiței și apă condensată, adică stadiile de producție, prin determinarea razelor zonelor respective R_{ab} și R_{ab+ac} cu relațiile 4.40 respectiv 4.39;
12. Se determină, pentru condițiile celor 3 stadii de producție, vâscozitatea medie a țițeiului și parametrul α cu relațiile 4.38 respectiv 4.41, 4.43;
13. Pentru condițiile primelor două stadii de producție se calculează factorul adimensional A_{cD} cu relația 4.24 iar pentru stadiul III, 4.17;
14. Considerând saturația în gaze ca fiind zero, avem $V_{pD} = 1$;
15. Pentru stadiile I și II, $V_{oD} = 1$ iar pentru stadiul III se calculează cu relația 4.33, ținând seamă de corelațiile 4.34, 4.35, 4.36;
16. Pentru perioada de producție desfășurată deja se stabilesc producțiile medii zilnice pe pasul de timp ales, an;
17. Se calculează debitele de producție, q_o , cu relația 4.23 pentru toți pașii de timp luați în considerație pentru fiecare din stadii presupunînd că zăcămintul ar funcționa întreaga perioadă în acel stadiu;
18. Se stabilește debitul proiectat la fiecare pas de timp în funcție stadiul de producție delimitat de razele zonei de abur și a bancului de țiței cu apă condensată, preluînd rezultatele corespunzătoare date la pct.17;
19. Se definește un criteriu pentru minimalizarea erorilor, ca de exemplu, pentru o perioadă de producție deja desfășurată, minimul diferenței dintre FR realizat și cel simulat pentru perioada respectivă sau cumulativul produs și cumulativul simulat, ș.a.;

20. Se aplică direct în foaia de calcul Excel, pentru parametrii aleși ca incerți k_h și M_1 în domeniul stabilit, metoda Monte-Carlo, rulând simulatorul de un număr de iterații corespunzător scopului proiectului;
21. În mod automat programul dă seria de valori a parametrilor zăcământului și fluidelor care satisface criteriul de minimalizare ales;
22. Cu această serie de valori, dată de program, se rulează simulatorul, în altă foaie de calcul, anexa 1, determinându-se astfel prognoza producției.

4.3 Aplicarea modelului pe un zăcământ real

S-a ales pentru aplicarea și verificarea modelului pentru evaluarea performanțelor procesului de injecție cu abur propus, zăcământul Dealu Bătrân Dacian.

În anul 1974 a fost pus în exploatare zăcământul Drader II, cu un debit de 3 t/zi țiței. Ulterior, au intrat în producție sonde noi, numărul lor crescând lent până la 30 în 1988. Draderul este constituit din nisipuri calcaroase, gălbui cenușii, cu slabe intercalații de gresii marnoase și marne slab nisipoase. Acumulările de petrol fiind cantonate în pachetele nisipoase, pachete separate printr-o marnă cu grosimea de 10-12m, conțin rezerve de importanță comercială.

Principalele proprietăți fizico-chimice ale colectorului și fluidelor conținute^[122] sunt:

- Grosime medie brută a stratului: 30-35m
- Grosime medie efectivă: 10-11m
- Adâncimea medie a zăcământului : 370m
- Înclinare medie a stratelor: 23-25 grade
- Temperatura medie de zăcământ: 25⁰ C
- Presiunea inițială de zăcământ: 37 bar
- Porozitate: 30%
- Saturație în apă interstițială: 21.5%
- Permeabilitatea absolută a colectorului: 360mD
- Țițeiul tip A, greu și vâscos cu conținut de rășini
- Densitatea țițeiului: 958.5 kg/m³
- Vâscozitatea țițeiului în condiții de zăcământ: 512.2 cP
- Punct de congelare: -11⁰C
- Factorul de volum: 1.05
- Rația de soluție inițială: 25 Sm³/m³
- Gazele asociate au densitatea relativă de 0.63
- Apa de zăcământ tip NaHCO₃, densitate: 1.1 kg/dm³

Producția de țiței a zăcământului a evoluat lent și cu dificultăți mari din cauza viiturilor de nisip, ajungând în 1978 la 15t/zi^[122].

După anul 1978 s-a aplicat injecția ciclică de abur cu câte 4 sonde pe lună, scăzând la 2-3 sd/lună sporadic, până în anul 1985 când s-a renunțat la această metodă. În 1985-1986 s-a încercat un proces de injecție continuă de abur, printr-o sondă, fără a se obține rezultate pozitive.

În perioada 1978-2002 debitul de țiței extras din zăcământ a înregistrat un declin mic, iar la sfârșitul acestei perioade, înaintea începerii procesului de injecție continue de abur în panouri, producția era de $37\text{m}^3/\text{zi}$ cu $20\text{t}/\text{zi}$ din 30 sonde, debitul mediu pe sondă fiind practic constant de 5 ani

Injecția continuă de abur a început în 2 panouri în 2002, sondele de injecție fiind 226 și 324, la un debit de $40\text{-}80\text{t}/\text{zi}$ pe sondă la o presiune de injecție de $15\text{-}30\text{bar}$ la temperatura de saturație și titlu de 0,8. Sondele de reacție au fost recondiționate și în general echipate cu filtre împachetate pentru prevenirea viiturilor de nisip.

Până în prezent injecția de abur s-a dezvoltat ajungându-se la 14 panouri, fiecare panou având o sondă de injecție și 4-6 sonde de producție.

Modelul propus a fost aplicat panoului 3 din acest zăcământ care are o sondă de injecție și 5 sonde de producție. Parametrii de zăcământ, ai procesului de injecție se regăsesc în datele de intrare a modelului, simulatorului.

Pentru a aplica programul de calculator, aferent modelului propus, a fost necesar determinarea datelor de intrare. Acestea au fost extrase din:

- analiza modelului geometric reprezentat tridimensional
- modelul geologic
- modelul de zăcămint și istoricul exploatării din ultimul Studiu de zăcământ, 2005
- analize de laborator pentru determinarea unor proprietăți fizice a fluidelor sau mediului solid
- măsurători de presiune și temperatură
- corelații stabilite sau luate din literatura de specialitate
- valori medii „tipice”

Calcululele au fost efectuate conform algoritmului prezentat mai sus, desfașurarea acestora și rezultatele sunt prezentate în anexa 1. Programul are posibilitatea de a alege grupul de valori a parametrilor zăcământului care minimizează diferența dintre un parametru calculat și cel realizat, în cazul de față producția de țiței.

Parametrii de intrare în simulator			Tabel 4.1
Parametru	Notăție	UM	Valoare
Debit abur	i_s	B/zi	170
Presiune abur	P_s	psia	100
Temperatură abur	T_s	F	316

Temperatură strat	T_f	F	72
Titlu abur la perforaturi	f_s		0,5
Grosime totală strat	h_t	ft	100
Grosimea netă strat	h_n	ft	66
Porozitate	ϕ		0,3
Suprafață panou	A_p	$acre$	2
Viscozitate țiței	μ	cP	500
Saturație inițială țiței	S_{oi}		0,7
Saturație țiței rezidual	S_{or}		0,277
Saturație apă interstițială	S_{wc}		0,3
Conductivitate termică	k_h	$BTU/h \text{ ft } F$	1,647
Capacitate termică zonei de abur	M_1	$BTU/cu\text{ft } F$	37,7

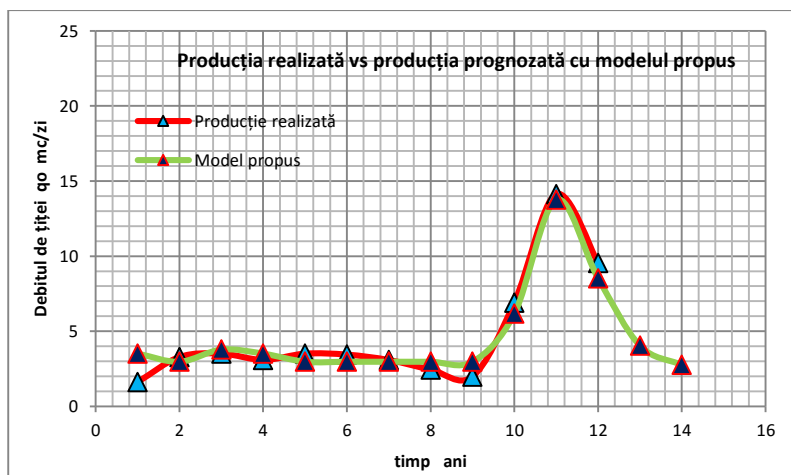


Fig.4.3 Producția realizată și cea prognozată cu modelul propus pentru zăcământul P3DB

Reprezentarea grafică a rezultatelor simulării cu grupul de valori ales este prezentată în Fig. 4.3

Se observă o bună corelare a producției prognozate cu cea realizată, evidențiindu-se și potrivirea stadiilor de producție, iar producția prognoată după ultima producție realizată se încadrează în tendința de evoluție dată de curba producției reale.

4.4 Introducerea utilizării conceptului filtrului Kalman în management zăcământ

Se prezintă cercetările și rezultatele acestora privind aplicarea filtrului Kalman în managementul zăcământului.

4.5 Conceptul filtrului Kalman în rezervor mangement ^[120]

Se prezintă conceptele și dezvoltarea matematică a filtrului pentru aplicarea în managementul zăcământului.

4.6 Metodă nouă de aplicarea filtrului Kalman în modelele analitice în injecția cu abur

În practică, cu toate acestea, ecuațiile de curgere și datele măsurate nu pot satisface astfel de ipoteze. Ca urmare a unui raționament similar se introduce un proces de iterație exterior în etapa actualizării EnKF, în scopul de a reduce efectele posibile unor ipoteze incorecte.

Actualizarea la fiecare iterație este deci următoare:

$$y_{k,j}^{u,i+1} = y_{k,j}^{u,i} + \alpha_k^i G_k^i (d_{k,j} - H_k y_{k,j}^{f,i}) \quad (4.46)$$

unde α_k^i este parametru de amortizare la momentul t_k și iterația i cu valoarea între 0 și 1 în funcție de gradul de neliniaritate, nivelul zgomotului de observare, de multe ori determinat prin încercare-eroare.

Pentru a lega un filtru Kalman de simulatorul procesului de injecție cu abur realizat și prezentat anterior^[163], în scopul prognozării producției de țiței cu eliminarea zgomotului de asumare la predefinirea modelului realizat se fac următoarele considerații:

- Filtrul Kalman prezice producția de țiței prin estimarea erorii între ecuația modelului analitic și datele reale;
- Variabila de stare a procesului o constituie valoarea debitului producției de țiței;
- Generarea ansamblului vectorului de stare se face luînd în considerare datele de producție anterioare, care sunt cunoscute fără incertitudini;
- Prognoza constă în rularea simulatorului pentru un pas de timp înainte folosind vectorul de stare cel mai recent la momentul când sunt disponibile datele de producție;
- Cu fiecare pas de asimilare de date de producție există un anumit grad de creștere a calității de estimare a modelului rezervor;
- Actualizarea în care vectorul producției de țiței este actualizat folosind ecuațiile Kalman.

Ecuațiile filtrului Kalman, avînd în vedere considerațiile de mai sus sunt:

Predicția

$$\hat{x}(t|t-1) = F_t \hat{x}(t-1|t-1) + B_t u_t \quad (4.47)$$

$$P(t|t-1) = F_t P(t-1|t-1) F_t^T + Q_t \quad (4.48)$$

Actualizarea

$$\hat{x}_{(t|t)} = \hat{x}_{(t|t-1)} + K_t (y_t - H_t \hat{x}_{(t|t-1)}) \quad (4.49)$$

$$\begin{aligned} K_t &= P_{(t|t-1)} H_t^T (H_t P_{(t|t-1)} H_t^T + R_t)^{-1} \\ P_{(t|t)} &= (I - K_t H_t) P_{(t|t-1)} \end{aligned} \quad (4.50)$$

(4.51)

unde:

\hat{x} - starea estimată, producția de țigări;

F - matricea de tranziție între stări;

u - controlul variabilei;

B - matrice de control;

P - matricea varianței stării, erori de estimare;

Q - matricea varianței procesului, erori datorate procesului;

y - variabila măsurată, producția de țigări măsurată;

H - matricea măsurării;

K - câștigul Kalman;

R - matricea varianței măsurărilor, erori la măsură;

Indicii sunt:

$(t|t)$ - perioada de timp curentă;

$(t-1|t-1)$ - perioada de timp anterioară;

$(t|t-1)$ - perioade de timp între pași.

Pentru procesul de recuperare cu injecție de abur studiat avem:

$\hat{x} = x$, variabila de stare poate fi redusă la un scalar, acesta fiind estimarea producția de țigări.

$x_{t+1} = x_t$ și $F_t = 1$ presupunem că modelul este constant pentru $t \geq 0$;

$B = 0$; $u = 0$ nu se folosesc variabile de control;

$H = 1$ și y au aceeași scală;

$R = r$; $P = p$; $Q = q$ nu există zgomot de proces și la măsură, procesul este un scalar nu o matrice.

Ecuatiile 4.42-4.51 devin:

Predicție

$$x_{(t|t-1)} = x_{(t-1|t-1)} \quad (4.52)$$

$$p_{(t|t-1)} = p_{(t-1|t-1)} + q_t$$

(4.53)

Actualizare

$$x_{(t|t)} = x_{(t|t-1)} + K_t (y_t - x_{(t|t-1)})$$

(4.54)

$$K_t = p_{(t|t-1)} (p_{(t|t-1)} + r)^{-1} \quad (4.55)$$

$$p_{(t|t)} = (1 - K_t) p_{(t|t-1)} \quad (4.56)$$

În baza acestor considerații și adaptări s-a construit un simulator-model, cu metoda Kalman pentru un proces de injecție cu abur în scopul prognozei producției de țiței, după o perioadă de producție și /sau monitorizarea datelor de producție, în timp real. De asemenea modelul Kalman poate folosi în locul producției monitorizate realizate, pentru diverse perioade, datele prognozei efectuate cu modelul analitic propus, în scopul corelării și completării prognozei.

Algoritm de calcul într-un program Excel

1. Se face inițializarea filtrului cu o estimare a producției arbitrare, cu covarianță destul de mare și un zgomot de sistem mic;
2. Primul pas de timp cuprinde egalarea valorii producției estimate arbitrar cu estimarea producției la pasul de timp următor, conform relației 4.52 și calculul covarianței cu relația 4.53;
3. Se înregistrează producția la ultimul pas sau prognozată cu modelul propus;
4. Se actualizează câșigul Kalman cu relația 4.53 și producția estimată cu relația 4.54;
5. Se actualizează covarianța cu relația 4.56;
6. La pași următori de timp se repetă operațiile de la pct. 2 la 5;
7. Se continuă iterațiile pentru a prognoza producția pentru termen scurt sau lung.

Calculul au fost efectuate conform algoritmului prezentat mai sus, desfășurarea acestora și rezultatele sunt prezentate în anexa 2. Reprezentarea grafică a rezultatelor aplicării metodei filtrului Kalman în cazul actualizării filtrului după producția realizată este prezentată în Fig 4.5

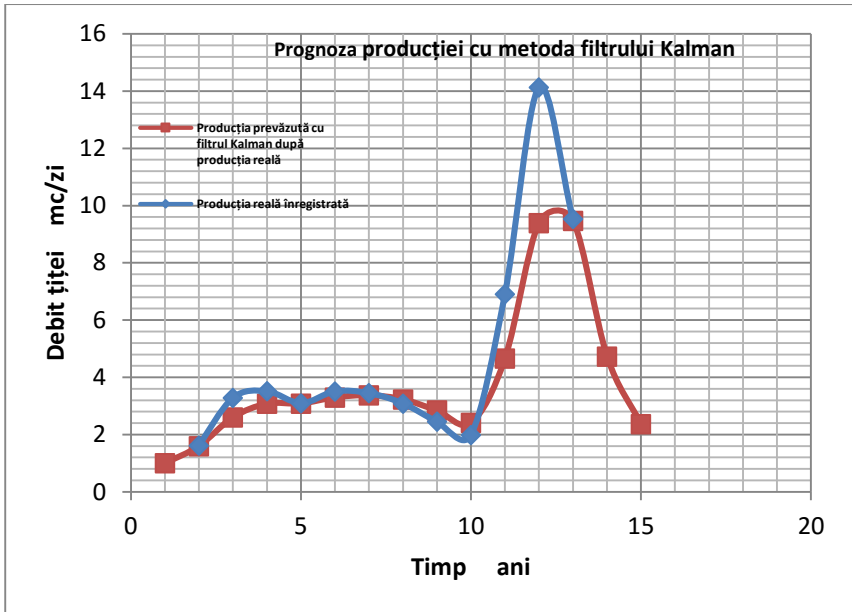


Fig.4.5 Proгноza producției cu filtrul Kalman actualizat cu producția reală pentru zăcământul P3DB

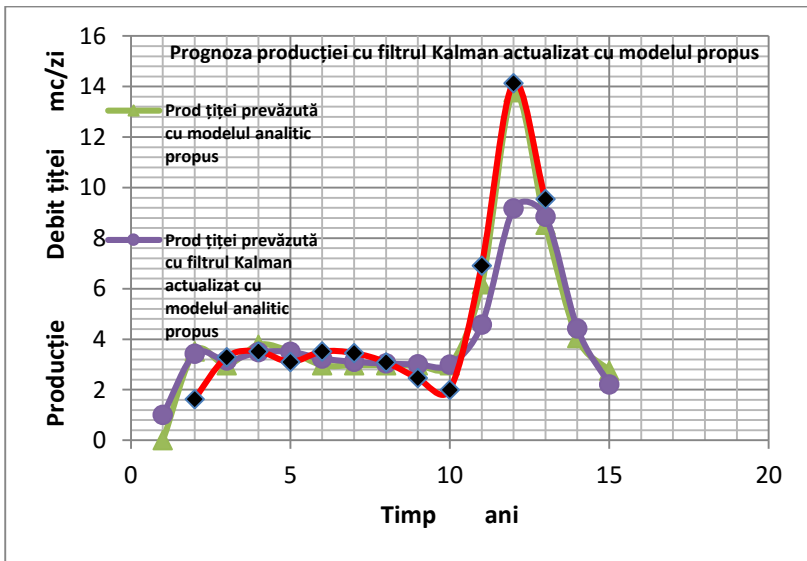


Fig.4.6 Prognoza producției cu filtrul Kalman actualizat cu producția prognozată cu modelul propus pentru zăcământul P3DB

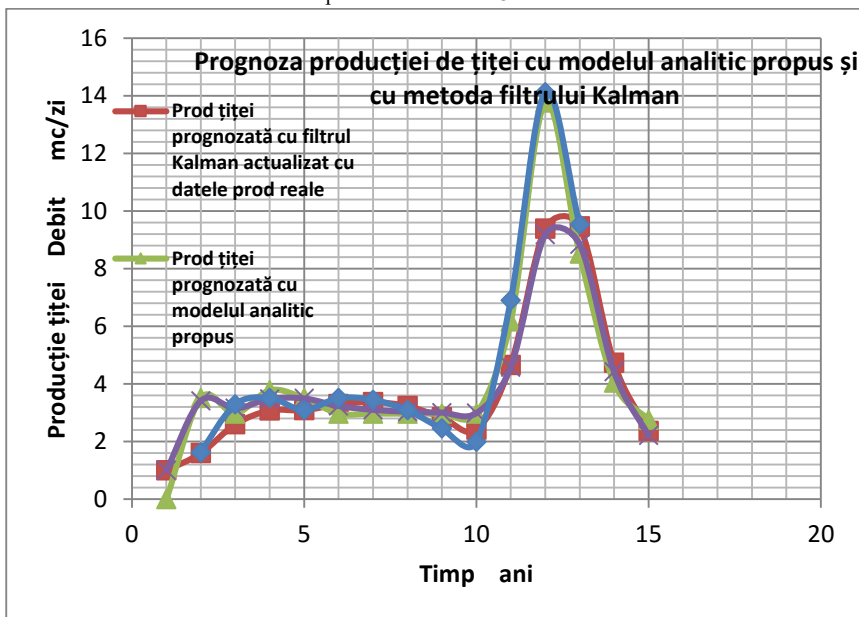


Fig. 4.7 Prognoza producției cu modelul propus și cu filtrul Kalman pentru zăcământul P3DB

Se observă o bună potrivire a producției prognozate cu filtrul Kalman actualizat cu producția reală comparat cu producția reală, excepție făcând producția maximă realizată, aceasta deoarece filtrul Kalman aplatizează vârful producției prognozate, datorită pasului de timp relativ mare, de un an, cu care a lucrat simulatorul.

Reprezentarea grafică a rezultatelor aplicării metodei filtrului Kalman în cazul actualizării filtrului după producția prognozată cu modelul analitic propus este prezentată în Fig 4.6

4.7 Metodă nouă analitico-statistică pentru calculul transferul căldurii în sondă

Procesele termice EOR implică introducerea de fluide calde în zăcământ prin sondele de injecție și extracția de fluide calde/reci prin sondele de producție.

Un model care să descrie procesul de transfer a căldurii de la fluidele care curg prin sondă la mediul adiacent acesteia [164], și calculul temperaturii de-a lungul sondei poate fi folosit în diverse aplicații ale aspectelor de transfer de căldură, mai ales când echipamentul de fund al sondei nu permite măsurarea, cum ar fi:

- ✓ Determinarea debitelor fluidelor ce curg din diverse strate în sondă;
- ✓ Determinarea temperaturilor de fund ale sondei;
- ✓ Depistarea unor disfuncționalități a echipamentului de fund;

- ✓ Aprecieri asupra câmpului termic al zăcământului și a desfășurării procesului termic de recuperare a țițeiului;
- ✓ Determinarea unor parametrii termofizici ai zăcământului sau ai elementelor de construcție a sondei.

Acest model pentru transferul căldurii de la sondă la mediu adiacent cuprinde:

- ecuația bilanțului de masă;
- ecuația bilanțului momentelor;
- ecuația bilanțului de energie, scrise de alungul sondei.

Temperatura fluidului în gaura de sondă este determinată de rata pierderii de căldură de la gaura de sondă la formațiile înconjurătoare, care la rândul său este o funcție de adâncime, debitul de producție/de injectare în timp și de modul de transfer a căldurii ^[166]. Pentru cazul unei sonde cu o zonă productivă având un singur strat productiv și o zonă neproductivă iar fluidul extras este lichid cu două faze, țiței și apă, modelarea matematică se face în următoarele ipoteze^[163]:

Zona de producție:

- Temperatura la perforaturi este aceeași cu cea stratului dată de gradientul geotermic;
- Transferul de căldură prin conducție este neglijat;
- Variația de energie potențială și cinetică, lucru mecanic pentru învingerea forțelor vâscoase considerate neglijabile;
- Lucru mecanic efectuat la frecare neglijabil;
- Fluid incompresibil;
- Procesul este adiabatic și în echilibru, nu se acumulează energie sau masă;
- Fluidul are presiune și capacitate termică constante.

Zona non productivă:

- Stare de echilibru, nu se acumulează energie, masă, impuls;
- Lucru mecanic pentru învingerea forțelor vâscoase considerat neglijabil;
- Conductivitatea termică constantă;
- Căldura conductivă din spre zona productivă este neglijată;
- Flux de căldură constant din tubing la coloană și de la coloană la teren;
- Rezistența termică a oțelului din țevi, neglijabilă în raport cu cea a fluidului din spațiul inelar tubing/coloană;
- Fluid incompresibil;
- Energie cinetică neglijată.

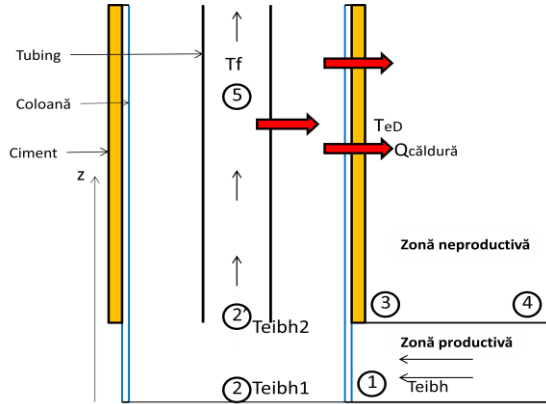


Fig.4.8 Reprezentarea schematică a procesului de transfer căldură în sondă

Reprezentarea schematică din Fig.4.8 ilustrează o analiză nodală termică utilizată pentru a dezvolta un model matematic, prin determinarea temperaturii în fiecare din nodurile, **1**, **2**, **2'**, **3**, **4**, și **5**, folosind ecuațiile de masa, impuls, și echilibrul energetic.

Notarea temperaturii la fiecare nod este după cum urmează:

- A. nodul **1** - temperatura stratului la adâncimea din gaura de sondă calculată din gradientul geotermal, T_{eibh} ;
- B. nodul **2** - temperatura lichidului care curge în gaura de sondă la partea inferioară a zonei productive, T_{fbh1} ;
- C. nodul **2'** - temperatura lichidului care curge în gaura de sondă la partea superioară a zonei productive, T_{fbh2} ;
- D. nodul **3** - temperatura la interfața sondă / termen în zona nonproductivă, T_h ;
- E. nodul **4** - temperatura stratului la adâncimea din gaura de sondă calculată din gradientul geotermal în zona nonproductivă, T_{ei} ;
- F. nodul **5** - temperatura fluidului, la orice adâncime z din zona productivă, T_f .

Zona productivă (nod 1 la 2)

Conform principiilor termodinamice de bază avem:

$$dH = C_p dT - \mu_{JT} dP \quad (4.57)$$

Considerând lichidul incompresibil, rezolvând ecuația diferențială (4.48) pentru condiții de echilibru energetic, obținem:

$$T_{fbh1} = T_{eibh} + \frac{144(P_e - P_{wf})}{\rho_f C_p J} \quad (4.58)$$

unde:

$$P_e - P_{wf} = \frac{142,2q\mu B}{Kh} \ln \left(\frac{r_e}{r_{wb}} \right) \quad (4.59)$$

În fața zonei productive (nod 2 la 2')

Pentru a obține o expresie pentru temperatură, zona productivă este împărțită în intervale egale, fiecare interval producând același debit. Prin aplicarea unei ecuații de echilibru de masă și de energie macroscopică datorită amestecării a două fluxuri, temperatura se obține la orice interval din interiorul zonei productive folosind următoarea ecuație derivată:

$$T_{fbh(i)} = \frac{(i-1)T_{fbh(i-1)} + T_{ei}}{i} \quad (4.60)$$

Zona non productivă (nod 4 la 3)

Când se produce fluid, căldura este transferată prin convecție în interiorul găurii de sondă și o parte din această căldură se pierde prin conducție la formația non-productivă. Astfel, în interiorul zonei non-productive, fenomenul de transport este numai a energiei termice ca urmare a pierderii de căldură de la gaura de sondă în zona non-productivă. Prin aplicarea ecuației generale de echilibru energetic între nodul 3 și 4, avem:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_e}{\partial r} = \frac{c_e \rho_e}{K_e} \frac{\partial T_e}{\partial t} \quad (4.61)$$

Considerând transferul termic ca fiind 1D radial, densitatea și conductivitatea termică a rocii constante în spațiu, și termenii adimensionali:

$$T_{eD} = - \frac{2\pi K_e}{w_t \left(\frac{dQ}{dz} \right)} (T_h - T_{ei}) \quad (4.62)$$

unde:

$$r_D = \frac{r}{r_{wb}} \quad \text{și} \quad t_D = \frac{K_e}{C_e \rho_e r_{wb}^2} t = \frac{\alpha}{r_{wb}^2} t \quad (4.63)$$

ecuația (4.62) devine:

$$\frac{\partial^2 T_{eD}}{\partial r_D^2} + \frac{1}{r_D} \frac{\partial T_{eD}}{\partial r_D} = \frac{\partial T_{eD}}{\partial t_D} \quad (4.64)$$

Eq.4.64 poate fi rezolvată utilizând următoarele condiții inițiale și la limită:

- Starea inițială: $\lim_{r_D \rightarrow 0} T_{eD} = 0$

Temperatura este constantă, egală cu T_{ei} , care este temperatura stratului la orice adâncime dată și la distanță infinită de de sondă, temperatura la nodul 4 .

- Condiții limită:

✓ Starea la limita exterioară: $\lim_{r_D \rightarrow r_{eD}} \frac{\partial T_{eD}}{\partial r_D} = 0$, Nici o schimbare a temperaturii la infinit (r_D);

✓ Starea la limita interioară: $\frac{\partial T_{eD}}{\partial r_D} \Big|_{r_D=1} = -1$

exprimă debitul de căldură din gaura de sondă la zona înconjurătoare pentru un element dz este constant.

Eq.4.64 este convertită în domeniu Laplace și pot fi rezolvată cu ajutorul software-lor cunoscute din Matlab sau Matematica. O aproximare a soluției ecuației 4.64 la interfața sondă/rocă folosind aceeași condiție inițială și limită a fost realizată prin Hasan, AR și Kabir ^[28], obținând următoarele relații:

$$T_{eD}|_{r_{D=1}} = 1,1281\sqrt{t_D}[1 - 0,3\sqrt{t_D}] \text{ dacă } t_D \leq 1,5 \quad (4.65)$$

$$T_{eD}|_{r_{D=1}} = [0,4063 + 0,5\ln(t_D)] \cdot \left[1 + \frac{0,6}{t_D}\right] \text{ dacă } t_D \geq 1,5 \quad (4.66)$$

Parcurs în sondă (nod 2' la 5)

Deoarece fluidul curge de la nod 2' la 5, energia termică este transportată prin convecție, dar masa și impulsul sunt transportate datorită fluxului de fluid. Deci, ecuațiile energiei, de masă, și de echilibru impulsului se aplică între nodul 2' și 5. Ecuația generală a bilanțului energetic și de masă este după cum urmează:

$$\frac{dH}{dz} = \frac{\partial Q}{\partial z} - v \frac{dv}{dz} - g \sin \theta \quad (4.67)$$

Pentru transferul radial de căldură de la interfața ciment/teren la roca înconjurătoare avem:

$$\frac{dQ}{dz} = \frac{2\pi r_{ti} U}{w_t} (T_f - T_h) \quad (4.68)$$

unde T_h este temperatura în nodul 3 iar w_t se determină cu relația:

$$w_t = \frac{q_g \gamma_g}{1,1309 \cdot 10^6} + \frac{q_w \gamma_w + q_o \gamma_o}{246,6} \quad (4.69)$$

Asumând că:

- Rezistența termică a tubingului și coloanei (oțel) este neglijabilă față de cea a cimentului și rocii terenului;
- Transferul căldurii prin radiație și convecție poate fi neglijat,

atunci:

$$U = \left[r_{ti} \frac{\ln\left(\frac{r_{ti}}{r_{to}}\right)}{K_{an}} + r_{to} \frac{\ln\left(\frac{r_{wh}}{r_{co}}\right)}{K_{cem}} \right]^{-1} \quad (4.70)$$

Combinând în continuare ecuațiile de bilanț ale masei și energiei, ținând seamă de condițiile curgerii în sondă, se găsește ecuația diferențială a distribuției temperaturii între nodurile 2' și 5 care poate fi aplicată pentru o fază sau mai multe faze:

$$\frac{dT_{fD}}{dz_D} = A_D \left(T_{fD} - \frac{T_{eibh}}{T_{fbh}} + \frac{G_f \sin \theta z_D L}{T_{fbh}} \right) + \phi_D \quad (4.71)$$

unde:

$$T_{fD} = \frac{T_f}{T_{fbh}}; z_D = \frac{z}{L}; \phi = \frac{144 \cdot 2,956 \cdot 10^{-12} f q^2}{J D_{ti}^3 c_p}; \phi_D = \frac{\phi L}{T_{fbh}}; Re = \frac{0,1231 \rho q}{D_{ti} \mu}; \quad (4.72)$$

$$A_D = \frac{2\pi L}{w_t c_p} \left[\frac{r_{ti} U K_e}{K_e + T_{eD} \frac{r_{ti} U}{12 \times 86,400}} \right] \frac{1}{12 \times 86,400} \quad (4.73)$$

Condiția limită folosită pentru a rezolva ecuația diferențială ordinară (4.71) este $T_{fD}(z_D=0)=1$ Aceasta înseamnă că temperatura la partea inferioară a tubingului este T_{fbh} . Această condiție de frontieră este potrivit pentru o producție de la un singur strat. O altă condiție de frontieră ar trebui să fie utilizate în cazul în care se folosește ecuația 4.71 în sondele care produc mai multe straturi. Soluția Eq.4.71 poate fi realizată utilizând softul Matlab pentru a obține profilul temperaturii adimensionale a fluidului în interiorul

sondei în fața zonele nonproductive în funcție de adâncimea adimensionă. Soluția este următoarea:

$$T_{fD} = \frac{G_T \sin \theta L - A_D G_T \sin \theta z_D L + A_D T_{eibh} - T_{fbb} \Phi_D + \exp(A_D z_D) \cdot [G_T \sin \theta L + A_D (T_{fbn} - T_{eibh}) + T_{fbb} \Phi_D]}{A_D T_{fbb}} \quad (4.74)$$

Modelul analitic prezentat dă variația temperaturii de-a lungul sondei în funcție de caracteristicile de construcție ale sondei, parametrii termo-hidrodinamici ai stratelor productive și adiacente cât și a debitului de producție. Aici parametrul dependent este temperatura, T , iar parametrul independent principal este debitul dar pot fi caracterizați ca independenți și alți parametri ai procesului de transfer a căldurii în sondă.

La sondele de producție din cadrul unui proces termic de recuperare, echipamentul de extracție se află în sondă nepermițând accesul pentru măsurători de temperatură decât în cazurile unor echipări speciale. Temperatura de fund a sondelor de producție, la nivelul stratului productiv, este importantă pentru determinarea distribuției temperaturii pe aria zăcământului cu scopul de control a procesului termic de recuperare. În mod curent, măsurarea temperaturii și debitului fluidului se poate face cu ușurință în instalația de suprafață a sondei. În schimb unii parametrii termodinamici ai zăcământului sau/și sondei cum sunt coeficientul de difuzie termică a stratului, conductivitatea rocii, coeficientul global de schimb de căldură, conductivitatea cimentului, ș.a. sînt determinați prin relații mai mult sau mai puțin empirice, corelări cu măsurători în laborator, caracterizări similare care dau acestor parametrii un grad de incertitudine, și prin urmare parametrii de ieșire din model au un grad de nesiguranță.

Folosind *metoda inversiunii* în acest model, se măsoară temperatura fluidului la suprafață care devine parametru independent, se dau valori aleatoare parametrilor nesiguri, menționați mai sus, bineînțeles într-un domeniu de constrângeri specifice, prin *metoda Monte Carlo* iar cu modelul analitic descris mai sus se calculează variantele posibile ale parametrilor deveniți prin inversiune dependenți (de valoarea temperaturii la suprafață a fluidului), între care și temperatura fluidului în sondă la nivelul stratului productiv de interes.

Cu ajutorul unui algoritm de optimizare de *gradient generalizat redus*, într-un program Excel, se găsește grupul de parametri, inclusiv temperatura de fund a sondei la nivelul stratului productiv care minimizează eroarea (diferența) dintre valoare calculată a temperaturii fluidului la suprafață și valoarea acesteia măsurată, diferență ce devine funcția obiectiv a acestei probleme de optimizare, exprimată astfel:

$$\text{Min } O(T) = \text{Min} \left[\sum_{i=1}^{n_d} (T_i^{\text{calc}} - T_i^{\text{măs}})^2 \right] \quad (4.75)$$

Algoritm de calcul

1. Se stabilesc temperatura la sol, temperatura stratului, se determină gradientul geotermic și se măsoară temperatura fluidului la sol T_{fr} ;
2. Se stabilesc caracteristicile sondei: L ; r_{ti} ; r_{to} ; r_{ci} ; r_{co} ; r_{wb} ;

3. Se deschide o foaie de calcul Excel în care se înscriu aceste date inițiale și apoi se derulează calculele următoare;
4. Se determină parametrii fluidului $q_w; q_o; \rho_w; \rho_o$, se calculează debitul masic w_t cu relația 4.69 și căldura specifică;
5. Se apreciază valorile medii posibile pentru caracteristicile termodinamice ale stratului și sondei productiv: $k_{an}; k_{cem}; k_e; \alpha$;
6. Se calculează coeficientul global de schimb de căldură sondă-strate, U ;
7. Se stabilește timpul t și se calculează timpul adimensional t_D apoi temperatura adimensională a rocii în zonele non productive, T_{eD} ;
8. Se calculează parametrii curgeri și transferului de căldură convectiv din zona non productivă: $\phi; \phi_D; Re; A_D; J; f; q; \mu; r_o$;
9. Se apreciază valoarea medie a temperaturii în stratul productiv la perforaturi T_{eibh} și a fluidului în sondă la nivelul perforaturilor T_{eibh1} ;
10. Se calculează temperatura adimensională a fluidului T_{fD} cu relația (4.74) și T_f la $z_D = 1$ adică la suprafață;
11. Se compară temperatura ieșită din rularea modelului cu cea măsurată și se calculează eroarea patritică;
12. Se stabilesc domeniile de posibilă variație pentru $T_{eibh}; k_{an}; k_{cen}; k_e; \alpha$ și se generează valori aleatoare (comanda RAND()) în limitele acestor domenii, rulând-se apoi modelul pentru n_q iterații (i.e.50-100), metoda Monte Carlo;
13. Se determină automat (comanda VLOOKUP(MIN())) grupul de parametrii care asigură eroarea cea mai mică, conform funcției obiectiv, relația 4.75;
14. În acest grup se găsește și temperatura fluidului din stratul productiv în sonda respectivă sau poate fi determinată temperatura fluidului din sondă la oricare adâncime;
15. Programul poate fi rulat și pentru mai multe strate productive, determinându-se temperatura fluidului la nivelul fiecărui strat;
16. Programul poate fi rulat și pentru suficiente puncte de-a lungul sondei, determinând astfel profilul termic cu sonda funcționând.

Aplicând algoritmul modelului descris mai sus unde s-a inclus metoda Monte Carlo pentru parametrii incerti, într-un program Excel, pentru sonda 391 din zăcămintul P3DB s-a calculat temperatura de fund cu sonda curgând, anexa 3, având măsurată numai temperatura fluidului la suprafață prezentată în Fig 4.9.

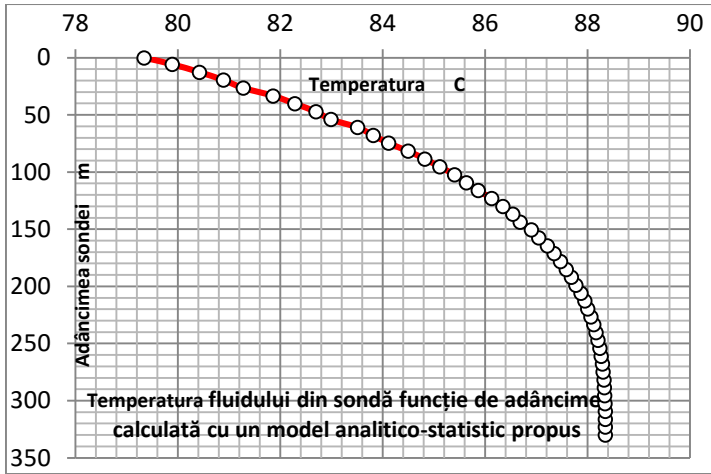


Fig.4.9 Temperatura fluidului din sondă calculată cu modelul propus

Modelul propus se poate aplica la sondele în pompaj, unde echipamentul existent în sondă nu permite introducerea de dispozitive de măsură a temperaturii în lungul sondei. Acest profil al temperaturii are diverse aplicații, cum ar fi: determinarea temperaturii zăcământului în zona din jurul găurii de sondă pentru întocmirea hărților cu distribuția temperaturii în scopul urmăririi eficienței procesului termic, determinarea unor defecțiuni a echipamentului de fund, ș.a.

4.8. Metodă de optimizare matematică a unui proces de injecție cu abur.

Se prezintă principiile de optimizare a unui proces de injecție cu abur.

4.9. Metodă de optimizare pentru continuarea unui proces de injecție cu abur

În cazul mai multor constrângeri impuse de practica de șantier în cazul evoluției procesului de injecție cu abur, se poate folosi modelul de predicție Gomma în care prin simulări parametrice a comportării istorice a unui zăcământ s-au construit grafice utilizate pentru estimarea performanței procesului^[27, 28]. Pe acest model s-a implementat metoda de optimizare locală, unde parametrii de decizie au o zonă locală de variație, prezentat anterior. Luând în considerare caracteristicile și parametrii de zăcământ ai panoului P3DB, luat ca studiu de caz și prezentat de autor^[122], se propune metoda de optimizare după următorul algoritm:

Cantitatea de căldură injectată pe unitatea de volum de zăcământ:

$$Q_{sv} = 350 \cdot 10^{-6} \frac{q_{is} h_{fs}}{A h_t} = 175 \cdot 10^{-8} q_{is} h_{fs} \quad (4.88)$$

Entalpia aburului:

$$h_{fs} = 91 p_s^{0,2574} + 1318 p_s^{-0,8774} \quad (4.89)$$

Debit căldură pierdut în stratele adiacente se determină din Fig 4.12^[168]

$$Q_l = 0,25 Q_{sv} \quad (4.90)$$

Căldura rămasă efectiv în strat:

$$Q = \Delta t Q_{sv} f_h (1 - Q_l) \quad (4.91)$$

Coeficientul de utilizare a căldurii:

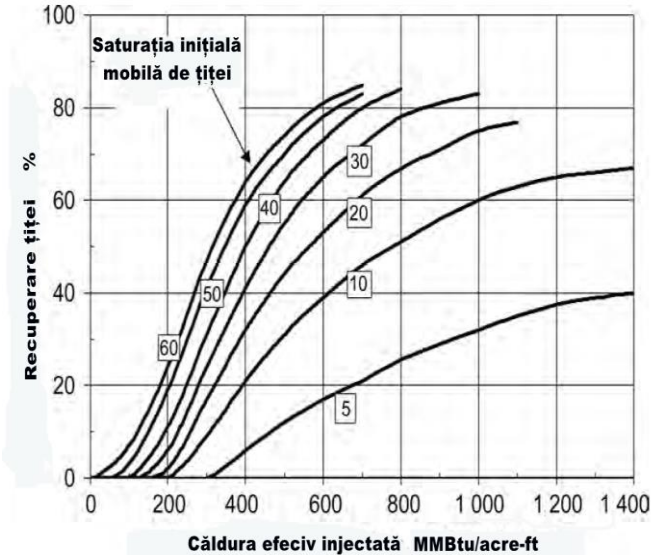


Fig. 4.12 Recuperarea țițeiului în SF funcție de căldura efectiv injectată și saturația inițială de țiței mobilă^[168]

$$f_h = 0,793 + 1,074f_s - 1,737f_s^2 + 0,628f_s^3 \quad (4.92)$$

Resursa mobilă, care poate fi dezlocuită:

$$N_m = \frac{7758Ah_n\Delta S_o\phi}{B_o} \quad (4.93)$$

Țițeiul recuperat:

$$N_p = N_m f_R = 20313 f_R [m^3] \quad (4.94)$$

Factorul de recuperare se determină cu relația:

$$f_R = 6 \cdot 10^{-6} Q^4 + 0,0015 Q^3 - 0,0416 Q^2 + 0,4 Q + 0,3815 \quad (4.95)$$

Relația (4.92) este transformarea analitică a graficului Gomma^[169].

Un profit brut convențional definit ca fiind diferența între valoarea producției și valoarea cheltuelilor de operare:

$$f_c = N_p P_v - q_{is} P_{ca} \Delta t \quad (4.96)$$

Optimizarea procesului de injecție cu abur având caracteristicile și parametrii procesului pe zăcămintul P3DB, constă în a găsi valorile parametrilor procesului care aduc profitul convențional maxim în condițiile impuse de model și în limitele practice (local) între care pot varia acești parametri.

Folosim aplicația de optimizare din softul MATLAB^[29;30], parcurgând următorii pași:

1. Se fac notațiile:

$$x(1) = f_R; x(2) = Q_{sv}; x(3) = Q; x(4) = f_h; x(5) = p_s;$$

$$x(6) = h_{fs}; x(7) = \Delta t; x(8) = q_{is}; x(9) = f_s$$

(4.97)

2. Pentru prețuri convenționale de 10\$ și 50\$ pentru cheltuelile cu aburul, respectiv al țițeiului ecuația (4.96) devine funcție obiectiv ce trebuie minimalizată:

$$f = 10x(8)x(7) - 2 * 10^6 x(1) \quad (4.98)$$

cu care se compune fișierul *objecfun.m*.

3. Relațiile (4.95), (4.91), (4.89), (4.92), (4.88) devin constrângeri egalități:

$$x(1) = 6 \cdot 10^{-6} x(3)^4 + 0,0015 x(3)^3 - 0,0416 x(3)^2 + 0,4 x(3) + 0,3815 \quad (4.99)$$

$$x(3) = 0,75 x(2) x(4) x(7) \quad (4.100)$$

$$x(6) = 91 x(5)^{0,2574} + 1318 x(5)^{-0,8774} \quad (4.101)$$

$$x(4) = 0,793 + 1,074 x(9) - 1,737 x(9)^2 + 0,628 x(9)^3 \quad (4.102)$$

$$x(2) = 175 \cdot 10^{-8} x(6) x(8) \quad (4.103)$$

În funcție de condițiile practice se stabilesc constrângeri inegalități pentru parametrii de decizie:

$$x(5) \leq 400; x(7) \leq 14; x(8) \leq 350; x(9) \leq 0,8 \quad (4.104)$$

Cu aceste constrângeri scrise sub formă de diferențe se formează un fișier al cărui nume este *nonlconstr.m*.

4. Se stabilesc limitele Min / Max ale tuturor parametrilor și un punct de start al iterațiilor în claculul determinării optimului, astfel:

	x(1)	x(2)	x(3)	(4)	x(5)	x(6)	x(7)	x(8)	x(9)
Min	0,2	0,3	100	0,5	20	600	1	30	0,3
Max	0,8	0,45	1600	0,96	400	1200	14	350	0,8
Start	0,5	0,34	333	0,9	200	1000	3	150	0,8

5. Se completează formularul cu modalitățile de calcul, punctul de start al încercărilor, opțiuni privind convergența rezultatelor și toleranța erorilor, forma de ieșire a rezultatelor, fig 4.14.

În fig 4.13 avem rezultatele calculului de optimizare efectuat cu programul de optimizare al softului Matlab iar fig 4.15 este reprezentarea grafică a producție prognozate a procesului de injecție cu abur după modelul Gomma cu parametrii determinați prin metoda de optimizare locală propusă, anexa 6.

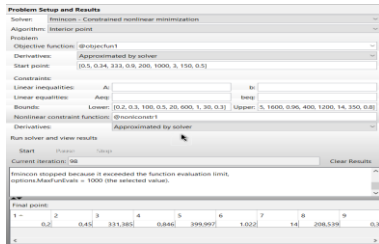


Fig. 4.13 Interfața aplicației cu datele de intrare și datele de ieșire^[167]

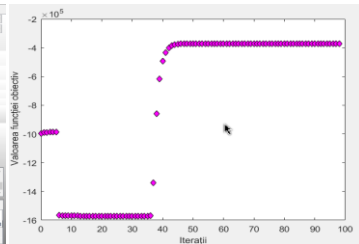


Fig. 4.14. Determinarea minimumului funcției obiectiv prin iterații succesive^[167]

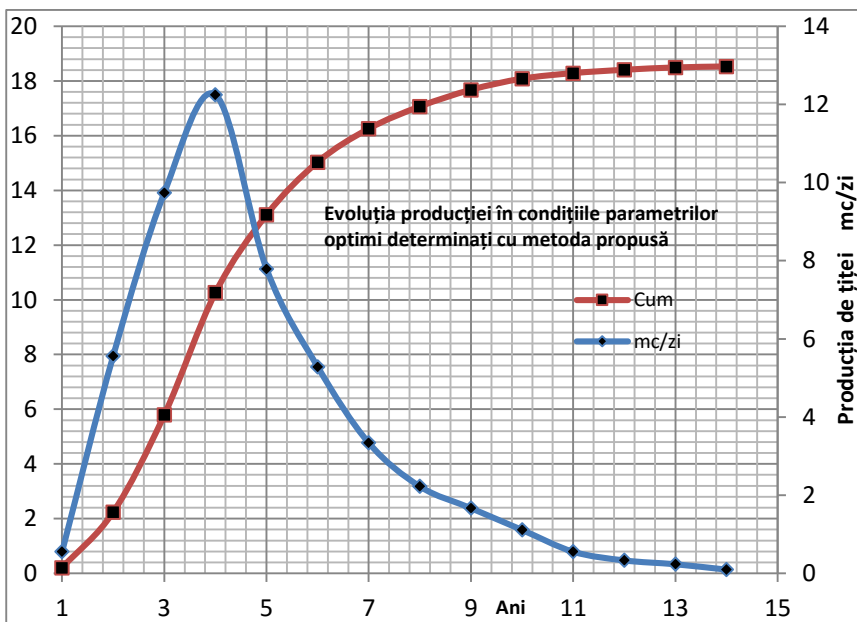


Fig. 4.15 Debitul de țigări și producția cumulativă cu parametrii optimi pe durata procesului *Observații și concluzii*. Evaluarea performanțelor proceselor termice, în cazul aprecierii fezabilității unui proiect prin modele analitice, permit aplicarea unor metode de optimizare a proceselor.

Metoda propusă aici ia în considerare modelele principale Myhill & Stegemeier și Gomma care au fost structurate într-un algoritm de aplicație în program de optimizare matematică în softul MATLAB.

Studiile de caz prezentate mai înainte arată modalitatea determinării unor parametrii de decizie care duc la un optim local al aplicării unui proces termic proiectat sau în

desfășurare. Optimizarea are drept criteriu diferența dintre valoarea producției dezlocuite/extrase și cheltuielile efectuate pentru aceasta. Pentru aplicarea instrumentului matematic, această diferență a fost denumită convențional profit.

Concluziile practice ce se desprind din aplicarea metodei propuse, în cele două studii de caz, sunt:

- ✓ Nu toate modele analitice pentru evaluarea performanțelor proceselor termice sunt adecvate unor condiții practice de desfășurare a proceselor, necesitând unele corecții;
- ✓ Raportul dintre cantitatea de țiței dezlocuit/extras și cantitatea de abur injectat să fie mai mare decât raportul dintre costul aburului și prețul de vânzare a țițeiului pentru a crea condiții favorabile fezabilității procesului;
- ✓ Durata desfășurării procesului termic, în anumite condiții de dezlocuire în zăcământ și de lucru, să fie cât mai mică pentru obținerea unui profit maxim;
- ✓ Condițiile termodinamice ale aburului, în frontul de dezlocuire, care asigură o valoare a căldurii latente cât mai mari ce va fi cedată mediilor din zăcământ sunt presiunea cât mai mică și titlu cât mai mare;
- ✓ Comportarea istorică a zăcământului cu proces termic trebuie introdusă în algoritmul de determinare a parametrilor de decizie ai procesului.

CAPITOLUL V

CONCLUZII

Lucrarea cu tema „**Contribuții la îmbunătățirea recuperării țițeiurilor grele prin procese de recuperare secundară**” conform cu obiectivele preconizate, prezintă analize detaliate a unor aspecte teoretice și practice ale proceselor de recuperare prin metode termice și în special ale procesului de injecție cu abur. Iar ca urmare a cercetărilor teoretice și din șantier efectuate au rezultat unele contribuții personale la creșterea eficienței acestor procese.

În acest sens, în capitolul II s-a prezentat situația actuală a aplicării în lume a metodelor IOR și EOR la zăcămintele cu țiței greu. Se devoltă aplicarea metodelor termice EOR, mecanismele principale ale recuperării țițeiului greu cât și tendințele actuale ale aplicării. metodelor termice pe zăcăminte din întreaga lume. Se descriu mecanismele și parametrii caracteristici ai metodelor SAGD, JAGD, ș.a. Se arată rolul și locul metodelor termice în cadrul metodelor EOR. Injecția cu abur este o tehnica EOR care a fost aplicată pe multe zăcăminte de petrol greu din întreaga lume. Alegerea zăcămintelor candidat este un factor esențial în obținerea unei eficiențe sporite, fapt pentru care se prezintă cele mai noi ghiduri de screening, tendințe noi în proiectarea și strategia dezvoltării proceselor de injecție cu abur. De asemenea se dezvoltă unele

cercetări privind dezlocuirea vâscoasă și dezlocuirea bypass sau combinația acestora cu mecanisme de recuperare prin injecția cu abur cât și eficiența lor în funcție de trei parametri adimensionali: raportul forțelor de gravitație, capilare și vâscoase cu presiunea aplicată, existând posibilitatea de a modifica variabilele din relațiile acestor parametri în scopul succesului potențial al extracției de petrol din rezervor.

Predicția performanței procesului de injecție cu abur este esențială pentru a furniza informații necesare bunei executări a fiecărei faze de dezvoltare și de asemenea, folosită pentru a determina durata de viață a unui zăcământ de petrol până la limita economică definită în cadrul conjunctural de desfășurare a procesului. Modelele, statistice, numerice și analitice, pentru evaluarea performanței procesului sunt prezentate succint, insistându-se totuși asupra celor mai noi și mai ușor de aplicat. Un interes deosebit pentru aplicarea în predicția performanțelor procesului de injecție cu abur a fost acordat modelului statistic cu Filtrul Kalman, modelului analitic Chandra și modelului numeric al liniei de curent

În capitolul III sunt cuprinse considerațiile actuale privind algoritmi matematici de optimizare și aplicarea celor mai potriviți pentru optimizarea producției de petrol în procesele termice și de asemenea se arată influența unor parametri asupra optimizării procesului și folosirea unor noi tehnologii pentru controlul lor.

Experimentul este prezentat ca un factor important în etapele optimizării proceselor termice iar în lucrare se dezvoltă abordarea experimentală a unui proces de injecție cu abur implicând o coinjecție abur-fluide multiple și de asemenea o coinjecție abur-surfactant.

Capitolul 4 prezintă cercetările teoretice, aplicațiile acestora pe zăcăminte reale, rezultatele și concluziile obținute de autor.

Având ca bază de plecare modelele analitice de predicție a performanțelor procesului de injecție cu abur, Marx&Langenheim^[124], Mandl&Volek^[112], Myhill&Stegemeir^[113], Jones^[126], Chandra^[127], Dutt^[128] s-a revizuit și integrat modelele fizice suport al acestor modele analitice într-un model nou fizic transpus analitico-statistic, dar bazat și pe analiza evoluției producției în 12 panouri de exploatare prin injecție de abur din zăcământ real DB, cât și pe baza simulărilor efectate. În succesiunea modelului analitic este introdusă o secvență statistică Monte Carlo pentru parametri cu incertitudini rezultând un model analitico-statistic cu acoperire mai largă a situațiilor de prognoză. Se prezintă algoritmul de calcul care s-a implementat într-un program Excel. S-a ales pentru aplicarea și verificarea modelului propus evaluarea performanțelor procesului de injecție cu abur pe zăcământul Dealu Bătrân Dacian. Concordanța producției realizate cu cea prognozată cu acest model este satisfăcătoare.

Se aduc unele îmbunătățiri și se definesc funcții obiectiv în aplicarea conceptului filtrului Kalman în managementul zăcământului. Pentru a lega un filtru Kalman de simulatorul procesului de injecție cu abur realizat și prezentat anterior, în

scopul prognozării producției de țiței cu eliminarea zgomotului de asumare la predefinirea modelului realizat se fac următoarele considerații:

- Filtrul Kalman prezice producția de țiței prin estimarea erorii între ecuația modelului analitic și datele reale;
- Variabila de stare a procesului o constituie valoarea debitului producției de țiței;
- Generarea ansamblului vectorului de stare se face luând în considerare datele de producție anterioare, care sunt cunoscute fără incertitudini;
- Prognoza constă în rularea simulatorului pentru un pas de timp înainte folosind vectorul de stare cel mai recent la momentul când sunt disponibile datele de producție;
- Cu fiecare pas de asimilare de date de producție există un anumit grad de creștere a calității de estimare a modelului rezervor;

Pe aceste considerente s-a construit o metodă nouă de aplicarea filtrului Kalman în modelele analitice pentru prognoza procesului de injecția cu abur. Algoritmul prezentat a fost introdus într-un program Excel. Metoda permite ca actualizarea filtrului Kalman să se facă după producția realizată dar și după modelul analitic propus, prezentat mai sus.

Modelul propus introduce în cadrul modelului analitic, metode statistice de probabilitate ce minimizează erorile rezultatelor. Stabilind domeniile de variație posibile cu limite constrânse pentru parametri ce pot fi considerați incerti și aplicând metoda Monte Carlo cu generarea unor valori aleatoare ale acestora în limitele stabilite, rulând apoi modelul cu un program Excel pentru un număr de iterații suficient, programul va alege automat varianta valorilor grupului de parametri care satisface relația criterială aleasă, de exemplu minimalizarea erorilor față de un parametru măsurat, cum ar fi producția anterioară. Cu varianta aleasă se rulează modelul și deasemenea se aplică algoritmul filtrului Kalman care prevede producția de țiței în timp real pas cu pas, ținând seamă de evoluția ei anterioară și eventuale modificări în proces. Rezultatele se pot compara, completa și eventual aduce rectificări. Previziunea cu filtrul Kalman poate fi folosită, ca atare, în cazul când avem disponibilă numai producția anterioară. Rezultatele aplicării metodei filtrului Kalman în cazul actualizării filtrului după producția realizată cât și după modelul analitic confirmă prognoze satisfăcătoare.

Se propune un model care să descrie procesul de transfer a căldurii de la fluidele care curg prin sondă la mediul adiacent acesteia, și calculul temperaturii de-a lungul sondei poate fi folosit în diverse aplicații ale aspectelor de transfer de căldură, mai ales când echipamentul de fund al sondei nu permite măsurarea, cum ar fi:

- ✓ Determinarea debitelor fluidelor ce curg din diverse strate în sondă;
- ✓ Determinarea temperaturilor de fund ale sondei;
- ✓ Depistarea unor disfuncționalități a echipamentului de fund;
- ✓ Aprecieri asupra câmpului termic al zăcământului și a desfășurării procesului termic de recuperare a țițeiului;

- ✓ Determinarea unor parametri termofizici ai zăcămintului sau ai elementelor de construcție a sondei.

Modelul analitic propus dă variația temperaturii de-a lungul sondei în funcție de caracteristicile de construcție ale sondei, parametri termo-hidrodinamici ai stratelor productive și adiacente cât și a debitului de producție. Aici parametrul dependent este temperatura, iar parametrul independent principal este debitul dar pot fi caracterizați ca independenți și alți parametri ai procesului de transfer a căldurii în sondă.

La sondele de producție din cadrul unui proces termic de recuperare, echipamentul de extracție se află în sondă nepermițând accesul pentru măsurători de temperatură decât în cazurile unor echipări speciale. Temperatura de fund a sondelor de producție, la nivelul stratului productiv, este importantă pentru determinarea distribuției temperaturii pe aria zăcămintului cu scopul de control a procesului termic de recuperare. În mod curent, măsurarea temperaturii și debitului fluidului se poate face cu ușurință în instalația de suprafață a sondei. În schimb unii parametri termodinamici ai zăcămintului sau/și sondei cum sunt coeficientul de difuzie termică a stratului, conductivitatea rocii, coeficientul global de schimb de căldură, conductivitatea cimentului, ș.a. sînt determinați prin relații mai mult sau mai puțin empirice, corelări cu măsurători în laborator, caracterizări similare care dau acestor parametri un grad de incertitudine, și prin urmare parametrul de ieșire din model au un grad de nesiguranță.

Folosind *metoda inversiunii* în acest model, se măsoară temperatura fluidului la suprafață care devine parametru independent, se dau valori aleatoare parametrilor nesiguri, menționați mai sus, bineînțeles într-un domeniu de constrângeri specifice, prin *metoda Monte Carlo* iar cu modelul analitic descris mai sus se calculează variantele posibile ale parametrilor deveniți prin inversiune dependenți (de valoarea temperaturii la suprafață a fluidului), între care și temperatura fluidului în sondă la nivelul stratului productiv de interes.

Cu ajutorul unui algoritm de optimizare de *gradient generalizat redus*, într-un program Excel, se găsește grupul de parametri, inclusiv temperatura de fund a sondei la nivelul stratului productiv care minimizează eroarea (diferența) dintre valoare calculată a temperaturii fluidului la suprafață și valoarea acesteia măsurată, diferență ce devine funcția obiectiv a acestei probleme de optimizare. Aplicând algoritmul modelului prezentat în lucrare unde s-a inclus metoda Monte Carlo pentru parametri incerti, într-un program Excel, pentru sonda 391 din zăcămintul P3DB s-a calculat temperatura de fund cu sonda curgând, având măsurată numai temperatura fluidului la suprafață.

Autorul propune o metodă de optimizare matematică a unui proces de injecție cu abur având drept criteriu maximizarea unui profit convențional considerat funcție obiectiv. Parametrii care maximizează această funcție sunt determinați cu o aplicație de optimizare din softul MATLAB după un algoritm prezentat în lucrare. Concluziile interpretării rezultatelor rulării procedurii propuse:

- Modelul analitic Myhill și Stegemeier este inadecvat condițiilor procesului, necesitând corecții care dealtfel au fost făcute în modelul propus^[25];
- Raportul țigetei dezlocuit/abur injectat este mai mic decât raportul cost abur/preț țigetei, condiție defavorabilă maximizării profitului, așa cum se observă în relația (4.82);
- Timpul în care se desfășoară procesul trebuie să fie cât mai mic;
- Presiunea de dezlocuire să fie cât mai mică iar titlul aburului cât mai mare pentru a se beneficia de o căldură latentă cedată zăcământului cât mai mare.

În cazul mai multor constrângeri impuse de practica de șantier în cazul evoluției procesului de injecție cu abur, se propune o metodă de optimizare pentru continuarea unui proces de injecție cu abur, folosind modelul de predicție Gomma, modificat cu metoda de optimizare locală, unde parametrii de decizie au o zonă locală de variație, prezentat în capitolul IV. Luând în considerare caracteristicile și parametrii de zăcământ ai panoului P3DB, luat ca studiu de caz și prezentat de autor, aplicând algoritmul asociat al acestei metode se determină valorile parametrilor care asigură continuarea desfășurării procesului în condițiile îndeplinirii funcției obiectiv.

Concluziile practice ce se desprind din aplicarea metodei propuse, în cele două studii de caz, sunt:

- ✓ Nu toate modele analitice pentru evaluarea performanțelor proceselor termice sunt adecvate unor condiții practice de desfășurare a proceselor, necesitând unele corecții;
- ✓ Raportul dintre cantitatea de țigetei dezlocuit/extras și cantitatea de abur injectat să fie mai mare decât raportul dintre costul aburului și prețul de vânzare a țigetei pentru a crea condiții favorabile fezabilității procesului;
- ✓ Durata desfășurării procesului termic, în anumite condiții de dezlocuire în zăcământ și de lucru, să fie cât mai mică pentru obținerea unui profit maxim;
- ✓ Condițiile termodinamice ale aburului, în frontul de dezlocuire, care asigură o valoare a căldurii latente cât mai mari ce va fi cedată mediilor din zăcământ sunt presiunea cât mai mică și titlu cât mai mare;
- ✓ Comportarea istorică a zăcământului cu proces termic trebuie introdusă în algoritmul de determinare a parametrilor de decizie ai procesului.

Principalele contribuții ale autorului din această lucrare, sunt în sinteză următoarele:

1. Autorul a conceput un model nou analitico-statistic pentru evaluarea performanțelor procesului de injecție cu abur integrând modele analitice cu

considerațiile statistice Monte Carlo, rezultând un model cu acoperire mai largă a situațiilor de prognoză. Algoritmul de calcul corespunzător s-a implementat într-un program Excel S-a ales pentru aplicarea și verificarea modelului propus evaluarea performanțelor procesului de injecție cu abur, 12 panouri de exploatare prin injecție de abur din zăcământ DB. Concordanța producției realizate cu cea prognozată cu acest model este satisfăcătoare.

2. Se definesc principiile de aplicare a conceptului Filtrului Kalman în managementul căldurii în cazul proceselor termice de recuperare.
3. Autorul a conceput o metodă nouă de aplicarea filtrului Kalman în modelele analitice pentru prognoza procesului de injecția cu abur Metoda permite ca actualizarea filtrului Kalman să se facă după producția realizată dar și după modelul analitic propus. Rulind apoi modelul cu un program Excel pentru un număr de iterații suficient, programul va alege automat varianta valorilor grupului de parametrii care satisface relația criterială aleasă, de exemplu minimalizarea erorilor față de un parametru măsurat, cum ar fi producția anterioară. Cu varianta aleasă se rulează modelul și deasemenea se aplică algoritmul filtrului Kalman care prevede producția de țiței în timp real pas cu pas, ținând seamă de evoluția ei anterioară și eventuale modificări în proces. Rezultatele se pot compara, completa și eventual aduce rectificări. Previziunea cu filtrul Kalman poate fi folosită, ca atare, în cazul când avem disponibilă numai producția anterioară. Rezultatele aplicării metodei filtrului Kalman în cazul actualizării filtrului după producția realizată cât și după modelul analitic confirmă prognoze satisfăcătoare.
4. Se propune un model care să descrie procesul de transfer a căldurii de la fluidele care curg prin sondă la mediul adiacent acesteia, și calculul temperaturii de-a lungul sondei poate fi folosit în diverse aplicații ale aspectelor de transfer de căldură, mai ales când echipamentul de fund al sondei nu permite măsurarea, cum ar fi:
 - Determinarea debitelor fluidelor ce curg din diverse strate în sondă;
 - Determinarea temperaturilor de fund ale sondei;
 - Depistarea unor disfuncționalități a echipamentului de fund;
 - Aprecieri asupra câmpului termic al zăcământului și a desfășurării procesului termic de recuperare a țițeiului;
 - Determinarea unor parametrii termofizici ai zăcământului sau ai elementelor de construcție a sondei.

Modelul analitic propus dă variația temperaturii de-a lungul sondei în funcție de caracteristicile de construcție ale sondei, parametrii termo-hidrodinamici ai stratelor productive și adiacente cât și a debitului de producție. Temperatura de fund a sondelor de producție, la nivelul stratului productiv, este importantă pentru determinarea distribuției temperaturii pe aria zăcământului cu scopul de control a procesului termic de recuperare.

În mod curent, măsurarea temperaturii și debitului fluidului se poate face cu ușurință în instalația de suprafață a sondei. În schimb unii parametri termodinamici ai zăcămintului sau/și sondei cum sunt coeficientul de difuzie termică a stratului, conductivitatea rocii, coeficientul global de schimb de căldură, conductivitatea cimentului, ș.a. sînt determinați prin relații mai mult sau mai puțin empirice, corelări cu măsurători în laborator, caracterizări similare care dau acestor parametrii un grad de incertitudine, și prin urmare parametrii de ieșire din model au un grad de nesiguranță.

Folosind *metoda inversiunii* în acest model, se măsoară temperatura fluidului la suprafață care devine parametru independent, se dau valori aleatoare parametrilor nesiguri, menționați mai sus, bineînțeles într-un domeniu de constrângeri specifice, prin *metoda Monte Carlo* iar cu modelul analitic propus se calculează variantele posibile ale parametrilor deveniți prin inversiune dependenți de valoarea temperaturii la suprafață a fluidului, între care și temperatura fluidului în sondă la nivelul stratului productiv de interes.

Cu ajutorul unui algoritm de optimizare de *gradient generalizat redus*, într-un program Excel, se găsește grupul de parametri, inclusiv temperatura de fund a sondei la nivelul stratului productiv care minimizează diferența dintre valoare calculată a temperaturii fluidului la suprafață și valoarea acesteia măsurată, diferență ce devine funcția obiectiv a acestei probleme de optimizare. Aplicând algoritmul modelului prezentat în lucrare unde s-a inclus metoda Monte Carlo pentru parametrii incerti, într-un program Excel, pentru sonda 391 din zăcămintul P3DB s-a calculat temperatura de fund cu sonda curgând, având măsurată numai temperatura fluidului la suprafață.

5. Autorul propune o metodă de optimizare matematică a unui proces de injecție cu abur având drept criteriu maximizarea unui profit convențional, considerat funcție obiectiv. Parametrii care maximizează această funcție sunt determinați cu o aplicație de optimizare din softul MATLAB după un algoritm prezentat în lucrare
6. În cazul mai multor constrângeri impuse de practica de șantier în cazul evoluției procesului de injecție cu abur, se propune o metodă de optimizare pentru continuarea unui proces de injecție cu abur, folosind modelul de predicție Gomma, modificat cu o metodă de optimizare locală, unde parametrii de decizie au o zonă locală de variație, prezentat în capitolul IV. Luând în considerare caracteristicile și parametrii de zăcămint ai panoului P3DB, luat ca studiu de caz și prezentat de autor, aplicând algoritmul asociat al acestei metode se determină valorile parametrilor care asigură continuarea desfășurării procesului în condițiile îndeplinirii funcției obiectiv.

Concluziile practice ce se desprind din aplicarea metodei propuse, în cele două studii de caz, sunt:

- Nu toate modele analitice pentru evaluarea performanțelor proceselor termice sunt adecvate unor condiții practice de desfășurare a proceselor, necesitând unele corecții;
- Raportul dintre cantitatea de țiței dezlocuit/extras și cantitatea de abur injectat să fie mai mare decât raportul dintre costul aburului și prețul de vânzare a țițeiului pentru a crea condiții favorabile fezabilității procesului;
- Durata desfășurării procesului termic, în anumite condiții de dezlocuire în zăcământ și de lucru, să fie cât mai mică pentru obținerea unui profit maxim;
- Condițiile termodinamice ale aburului, în frontul de dezlocuire, care asigură o valoare a căldurii latente cât mai mari ce va fi cedată mediilor din zăcământ sunt presiunea cât mai mică și titlu cât mai mare;
- Comportarea istorică a zăcământului cu proces termic trebuie introdusă în algoritmul de determinare a parametrilor de decizie ai procesului.

BIBLIOGRAFIE (extras)

- [1] Speight, J G: "*Heavy Oil Production Process*" GPP-Elsevier USA, 2013.
- [2] Meyer, R, Attanasi, E: "Heavy Oil land Natural Petroleum Resources", US Geological Survey, 2013.
- [4] Hama, Q.M.: "Updated Screening Criteria for Steam Flooding based on Oil Field Projects Data" Thesis, Missouri University Of Science And Technology, 2014.
- [5] Thomas, S, : "Enhanced Oil Recovery – An Overview" *Rev. IFP*, Vol. 63 (2008), No. 1, pp. 9-19 (12)
- [7] Ezekwe, N., "*Petroleum reservoir engineering practice.*" Pearson Education, Inc. (2011).
- [9] Satter, A, ș.a., "Practical Enhanced Reservoir Engineering: Assisted with Simulation Software", Pen Well Corporation, Tulsa, USA, 2007.
- [10] Lyons W. & Plisga, B. S. (Eds.), "*Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering*" (Second edition), Burlington, MA: Elsevier Inc. (2005).
- [12] Goran, N., Ionescu, G.F.: "*Creșterea recuperării petrolului*", Editura Universității Ploiești, 2003.
- [14] Carlson, M.: "*Practical Reservoir Simulation*", PennWell Books, Tulsa, Oklahoma (2006).
- [15] Gates, I. D. "Solvent-aided Steam-Assisted Gravity Drainage in thin oil sand reservoirs". *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 138-146, 2010.
- [17] Gates, ID-ul, Larter, SR, și Adams, JJ *in situ grele de petrol și bitum de recuperare proces*, Canada Cererea de brevet 2593585, 2007;

- [18]. Hernandez J. : "EOR Projects in Venezuela: Past and Future". Presented at the ACI Optimising EOR Strategy 2009, London, UK, 11–12 March 2009.
- [20]. Ramlal, V. : "Enhanced oil recovery by steamflooding in a recent steamflood project", Cruse "E" Field, Trinidad (SPE-89411). In Proceedings of 14th SPE/DOE IOR Symposium, Tulsa, OK, USA, 17–21 April 2004.
- [21]. Jelgersma, F.: " Redevelopment of the Abandoned Dutch Onshore Schoonebeek Oilfield With Gravity Assisted Steam Flooding". In Proceedings of International Petroleum Technology Conference, Dubai, 4–6 December 2007.
- [22] Lacerda, G.M.; Patriota, J.H.; Pereira, J.I.; Torres J.S.; De Lima, L.A. "Alto do Rodrigues GeDIg
 „Pilot—Case Study for Continuous Steam Injection Recovery Combined with Real-Time
 [23] Rivero, J.A.; Mamora, D.D. Oil Production Gains for Mature Steamflooded Oil Fields Using Propane as a Steam Additive and a Novel Smart Horizontal Producer (SPE-110538). In Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA, 11–14 November 2007.
- heterogeneous reservoirs within EnKF framework", University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2012
- [29] Patent US 2007/0213963 A1 „System And Method For Determining Flow Rates In A Well" Inventors: Younes Jalali, Cambridge (GB); Ahmed M. Daoud, Cairo (EG), 2007
- [35] Jimenez, J.: "The Field Performance of SAGD Projects in Canada (IPTC-12860)". In Proceeding of International Petroleum Technology Conference, Kuala Lumpur, Malaysia, 3–5 December 2008.
- [36] Stalder, J.L. : "Thermal Efficiency and Acceleration Benefits of Cross SAGD (XSAGD)"-(SPE-117244). In Proceedings of International Thermal Operations and Heavy Oil Symposium, Calgary, AB, Canada, 20–23 October 2008.
- [50]. WHITESANDS Project–Petrobank Energy and Resources Ltd. Available online: <http://www.petrobank.com/hea-whitesandsproject.html> (accessed on 23 October 2010).
- [67]. Kumar, V.K.; Gutierrez, D.; Moore, R.G.; Mehta, S.A.: "Air Injection and Waterflood Performance Comparison of Two Adjacent Units in the Buffalo Field" (SPE-104479). *SPE Reservoir Eval. Eng.* **2008**, October, 848–857.
- [71]. Lyons W. & Plisga, B. S. (Eds).: "*Standard Handbook of Petroleum & Natural Gas Engineering*" (Second edition), Burlington, MA: Elsevier Inc. (2005).
- [76]. Roman, M.; Andreica, M.: "Elaborarea Analizei De Risc În Cadrul Analizei Cost-Beneficiu", 2013

- [83]. Wahyuningsih, S., S. Darwis, A.Y. Gunawan, A.K. Permadi, and M. Ali Sahat, Predicting Steam Production Using Kalman Filter. *Far East Journal of Theoretical Statistics*, 26-2, 219-225, 2008.
- [90]. Zhouyuan Zhu: „*Efficient Simulation Of Thermal Enhanced Oil Recovery Processes*”, Thesis, Stanford University, 2011.
- [92]. STARS. STARS Version 2009 User’s Guide. Computer Modeling Group Ltd., Calgary, Canada, 2009.
- [93]. Eclipse. Eclipse Version 2009 Software Manual. Schlumberger Ltd., 2009.
- [101] Archana Kumar.: „Hybrid simulation of the eulerian method and the streamline method: Investigating the role of cross-product in cross-over time between the two methods”. Master’s thesis, Stanford University, 2010.
- [103] 3D.SL. Version 2010 Software Manual. StreamSim Technologies, Inc.,2010.
- [104] R.P. Batycky, M. Forster, M.R. Thiele, and K. Stuben.: „Parallelization of a commercial streamline simulator and performance on practical models”. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 13(3):383–390, June 2010.
- [105] A. Lapene, D.V. Nichitae, G. Debenesta, and M. Quintard.: „Three-phase freewater flash calculations using a new modified rachfordcrice equation”. *Fluid Phase Equilibria*, 128, October 2010.
- [109] Ionel, A.,: „Termodynamic investigation on oil reservoirs”, *Revista Română de Petrol*, Vol 16, Nr2, 2009
- [120] Tudor, V.,: „Stadiul actual al cunoașterii în domeniul recuperării țițeiurilor grele prin metode de recuperare secundară” Referat 1 Teză doctorat, UPG Ploiești,2015;
- [121]. Tudor, V.,: „Evaluarea performanței proceselor termice de exploatare a zăcămintelor de țiței”, Referat 2 doctorat, UPG-Ploiești, 2015.
- [122]. Tudor, V.,: „Experimente de șantier pentru optimizarea proceselor termice de exploatare a zăcămintelor de țiței”, Referat 3 doctorat, UPG-Ploiești, 2016.
- [123]. Kuzmz, H.A., ș.a.: „Performance Evaluation of Automatically Generated Statistical Type” *SPE 174914-MS*,2015
- [131]. Goran, N.,Ionescu, G.,-*Creșterea recuperării petrolului*, Editura Universității din Ploiești, 2003.
- [132]. Ionescu, M., Stoicescu, M.: *Metode termice de recuperare a petrolului*, Editura Universității din Ploiești, 2001
- [133]. Wenjiang Xu, ș.a.: „Experimental and Simulation Studies on Steam Stimulation with Multiple Fluids for Offshore Heavy Oil Reservoirs”, *International Journal of Numerical Analysis and Modeling, Series B, Volume 5, Number 1-2, Pages 31–45*, 2014;
- [137]. Zhu Z., ș.a., - „Thermal Stremline Simulation for Hot Waterflooding”, *SPE*, Junie 2010
- [138]. Shafiei A.,: „ Mathematical and Statistical Investigation of Steamflooding in Naturally Fractured Heavy Oil Reservoirs”, Thesis University Waterloo, Ontario, Canada, 2013

- [139] M. Chen,: „Thermal Production Technology on Offshore Oilfield”, the Press of Petroleum Industry, 2012.
- [140] Y. Sun and T. Lin,: „The automatic control for multiple fluid stimulation in BOHAI oil field” [J], Chemical Industry, 2012(5).
- [141] Dinmukhamed M. Sunnatov: „Experimental Study of Steam Surfactant Flood for Enhancing Heavy Oil Recovery after Waterflooding”, A Thesis Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University, 2010;
- [156] Speight, J G: *“Heavy Oil Production Process”* GPP-Elsevier USA, 2013.
- [157] Meyer, R, Attanasi, E: *“Heavy Oil and Natural Petroleum Resources”*, US Geological Survey, 2013.
- [160]. Andrea Capolei ş.a. : „Single Shooting and ESDIRK Methods for adjoint-based optimization of an oil reservoir” Technical University of Denmark, Kgs Lyngby, Denmark, 2012
- [162] Mahnaz Sepehrmanesh : Application Of The Kalman Filter On Full Tensor Gravity gradiometry Data Around The Vinton Salt Dome, Louisiana, University of Kentucky UKnowledge, 2014
- [163] Patent US 2007/0213963 A1 „System And Method For Determining Flow Rates In A Well” Inventors: Younes Jalali, Cambridge (GB); Ahmed M. Daoud, Cairo (EG), 2007
- [165]. Bahador Najafiazar: „Mathematical Optimization in Reservoir Management” Master Thesis,Norwegian University of Science and Technology, 2014
- [167] [Optimization Toolbox User's Guide](#)
- [171]. Bryan, J., and Mai, A.: “Investigation into the Processes Responsible for Heavy Oil Recovery by Alkali-Surfactant Flooding,” Paper SPE 113993, SPE/DOE Improved Oil Recovery Symposium on Improved Oil Recovery, Tulsa, OK, April 19-23, 2008.