



**MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE ȘI
CERCETĂRII ȘTIINȚIFICE
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN
PLOIEȘTI
ȘCOALA DOCTORALĂ
DOMENIUL MINE PETROL ȘI GAZE**

**“CONTRIBUȚII LA EXPLICAREA MECANISMULUI DE DEZLOCUIRE A
ȚIȚEIULUI ÎN PROCESUL INJEȚIEI DE APĂ PRIN SONDE ORIZONTALE”**

REZUMATUL TEZEI DE DOCTORAT

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,
Prof. univ. dr. ing. Iulian Nistor

DOCTORAND,
Ing. Codruț Cristian Călărașu

- PLOIEȘTI 2016 -

Contents

Introducere.....	4
PhD Thesis Contributions to water injection through horizontal wells_displacement mechanism explaining	4
Capitolul 1 Stadiul actual al proceselor de injecție de apă ca metode de îmbunătățire a recuperării țiteiului.....	6
1.1 Generalități	6
1.2 Injecția extraconturală a apei	10
1.3 Injecția intraconturală a apei	14
Capitolul 2 Mecanismele implicate în dezlocuirea țiteiului de către apa de injecție.....	15
2.1 Generalități	15
2.2 Dezlocuirea țiteiului	16
2.3 Comportarea moleculelor și schimbarea fazelor.....	22
2.4 Energia zăcămintelor de hidrocarburi fluide.....	22
2.5 Explicarea mecanismelor de dezlocuire	24
2.6 Dezlocuirea țiteiului	25
2.7 Migrația cauzată de mecanismele de recuperare	27
2.8 Recuperarea secundară.....	27
Capitolul 3 Injecția de apă utilizând sonde orizontale.....	28
3.1 Recuperare secundară, Prezentare generală.....	28
3.2 Proiectarea unui proces de injecție extraconturală a apei	28
3.3 Prevederea comportării în exploatare	29
3.4 Utilizarea sondelor orizontale	33
3.5 Injecția de apă prin sonde orizontale	35
3.6 Creșterea eficienței spălării orizontale.....	35
3.7 Beneficii ale proceselor de injecție de apă utilizând sonde orizontale de injecție	41
Capitolul 4 Contribuții aduse explicării mecanismului de dezlocuire a injecției de apă prin sonde orizontale.....	41
4.1 Generalități	41
4.2 Remedierea canalizării fluidelor de injecție în cazul aplicării proceselor de injecție de apă.....	42
4.3 Îmbunătățirea receptivității prin crearea de impulsuri de presiune	44
4.4 Studiu de caz	45

Capitolul 5 Contribuții și concluzii.....	47
Concluzii	48
BIBLIOGRAFIE.....	49

Introducere

Teza prezentată în această reumat își propune să aducă unele contribuții la îmbunătățirea mecanismului dislocuirii injecției de apă utilizând sonde orizontale și face o incursiune prin conceptele ingineriei de zăcămintă începând cu proprietățile fizice ale rocii colector, mecanismelor de deslocuire care pot produce zăcămintele de petrol și terminând cu proiectarea unui proces de injecție de apă utilizând sonde orizontale.

PhD Thesis

Contributions to water injection through horizontal wells displacement mechanism explaining

In the oil reservoir, the reservoir pressure and oil saturation varies along exploitation period, from production start till the reservoir abandonment. The displacement mechanisms are basic factors along the primary exploitation. The reservoir pressure and oil saturation are the primordial factors during reservoir's exploitation. In time according to reservoir pressure depletion, the necessity to design a water injection process for keeping or eventually increasing the reservoir pressure appears.

The peripheral water injection is applied to keep the reservoir pressure to a high value. We are able to talk (depict) about reservoirs having the initial pressure bigger or lower than bubble pressure, but for both cases the reservoir pressure has values close to initial reservoir pressure.

The contour water injection has been applied for depleted reservoirs, but these reservoirs have to contain major remaining volumes of oil. The most advantaged reservoirs, are the reservoir witch were produced in primary exploitation with dissolved gas drive because the volume of produced oil is lower. But a reservoir can not be produced with just one drive displacement in the primary exploitation. So the exploitation of an oil reservoir is a result of cumulative driving displacement processes. Each driving displacement process has contributed with a amount of oil to all produced oil volume. In cases of depleted reservoir, the water injection has contributed to the oil production increasing because the drained pore volumes near wellbore were resaturated. That is the result of a partially increasing of reservoir pressure, with a major condition like water injected flow rate has to be bigger than the oil flow rate.

In a case of an oil reservoir where is applied an water injection process, in order to realize a good sweeping efficiency it is necessary that the report between the mobility of water injection and the mobility of oil to be sub unitary.

A uniform water front advancing can be realized trough an efficient water injection process. When, during the process, an injection water channeling appears those channeling must be blocked, otherwise the water injection process will be shorted out

The processes of water injection trough horizontal wells provide a uniform water front advancing with a bigger water flow rates and smaller pressure than trough vertical wells.

The present work consists of five chapters, annexes and bibliographic references.

In the first chapter are presented:

- Basic concepts water injection processes, including all type of processes: peripheral water injection and contour water injection. Are described the characteristics of oil reservoir and methods of formations well testing from where we can determine the physical properties of reservoirs.
- Supplementary methods needed for improving the water injection processes. I refer to water polymer injection, CO₂ injection followed by carbonated water injection. These methods improve the oil recovery factor.

The second chapter emphasizes:

- The three reservoirs energy forms,
- Oil displacement concept, it is described large and microscopic sweep efficiency for miscible and immiscible oil displacement.
- Driving mechanisms involved in oil displacement during water injection processes.
- The oil migration caused by recovery/driving mechanisms.

In the third chapter are presented:

- A water injection process design, starting with the injection wells line positioning (case of peripheral water injection), we have to determine the cumulative of water needed to be injected, injection wells receptivity , injection pressure and how to choose the injection pumps.
- The production behavior forecast in a water injection process war accomplished using Buckley Leverett și Welge design and Borisov design. Eache design has a different theory.
- The water injection trough horizontal wells where are differently described injection schemas: using horizontal injectors (wells) and vertical production wells, or vertical injection wells and horizontal production wells, and schemas using horizontal injection and production wells. I presented the advantages of each schema.

In the fourth chapter are presented

- How we can remedy the channeling of water in a water injection process.
Due to the existence of reservoir geological features heterogeneity wit appears the deformation of water front displacement. The worst result is the creation of channeling. The channeling lead to shorting out the water injection process and some production wells will be flooded fast. We can to fix the channeling using bridging material. These are gelation systems witch lead to channels permeability decrease.
- We can improve the injectivity using pulse pressure. Along of water injection process the water injection flow rate decrease and the pressure increase till the minimum flow rate, after that the process becomes uneconomically. It is necessary to improve the layer's injectivity. A used method is to create pulses pressure into the perforated interval. That method performs pressure waves into the layer, witch improve the layer injectivity.
- The case study is made on Sarmatian reservoir, in Alpha field. A horizontal injector is proposed to be drilled using the production data. It is going to apply a scheme with a horizontal injector and two lines of vertical production wells. For this scheme were used Buckley Leverett & Welge and Borisov design models.

In the fifth chapter are presented contributions and conclusions:

- Because an oil reservoir has macro heterogeneity, a large variations of geological features exist in whole reservoir, so exist deformations of water front displacement. Those deformations can be solved remediating the channeling of water injection. The channels are blocked by using bridging material. In a horizontal injector the bridging material cannot be introduced into the reservoir with back pressure transient phenomenon. Was achieved a technical scheme allowing injection of bridging material just in some layers susceptible with channeling of water injection.
- Buckley Leverett și Welge design and Borisov design were used for water injection processes trough horizontal wells.
- The injectivity can be improved using pressure pulses. The pressure waves created an improving of geological features near the vicinity of the wellbore. That method is necessary to be applied in a water injection process when the injection pressure has a value witch do not permits water injection at high flow rate.

Key words: injection wells, periferal water injection, horizontal injection wells, vertical injection wells.

Autorul îi mulțumește conducătorului științific al tezei, domnului prof. univ. dr. ing. IULIAN NISTOR, pentru sprijinul și îndrumarea acordate pe parcursul elaborării tezei.

Capitolul 1 Stadiul actual al proceselor de injecție de apă ca metode de îmbunătățire a recuperării țițeiului

1.1 Generalități

Sunt prezentate caracteristicile fizice ale rocii colector dar și principiile de bază ale proceselor de injecție de apă pentru îmbunătățirea recuperării țițeiului. Înțelegerea geologiei zăcământului presupune cunoașterea proprietăților fizice ale rocii colector cum ar fi:

a) porozitatea care măsoară capacitatea volumetrică a unei roci rezervor de a conține fluide, reprezentând raportul dintre volumul porilor și volumul brut al rocii, se determină prin analize de laborator pe carotele extrase din zona productivă dar și din investigația geofizică;

b) saturația în fluide, în decursul erelor geologice datorită presiunii și temperaturii, materia organică a fost supusă transformărilor fizico chimice și datorită densității mai mici decât a apei, a migrat ascendent de la rocile generatoare până a întâlnit o capcană geologică, în același timp a avut loc o migrație descendentă a fluidului aflat până atunci în porii rocii rezervor, respectiv a apei, rămânând în porii rocii rezervor numai aceea cantitate de apă care nu a putut fi dezlocuită de hidrocarburi numită și apă ireductibilă. Deci la începutul exploatării unui zăcământ în roca rezervor există hidrocarburi și apă interstițială.

c) umectabilitatea rocii colectoare, este definită ca fiind tendința unui fluid de a adera la o suprafață solidă (roca colectoare) în prezența altui fluid cu care nu este miscibil.

Faza umezitoare este atrasă de către suprafața respectivă mai puternic decât faza neumezitoare, deci rocile pot fi udate preferențial de apă sau de țiței.

Umectabilitatea rocii determină performanța proceselor de injecție de apă întrucât în cazul rocilor udate preferențial de țiței, injecția de apă nu este recomandată deoarece în momentul începerii exploatării țițeiul este plasat pe suprafața rocii și în porii de dimensiuni mici, acest fapt făcând ineficient procesul de injecție de apă întrucât apa avansează prin centrul porilor rocii iar o mare parte din țiței rămâne în zăcământ pe pereții porilor.

d) presiunea capilară este diferența de presiune care există între două puncte aflate de o parte și de cealaltă parte a unei interfețe dintre două fluide, punctele situându-se la o distanță infimezimală unul față de celălalt. În cazul zăcămintelor a căror exploatare se face prin spălarea cu apă se poate considera că țițeiul și apa sunt imișcibile la fel ca și în cazul contactului țiței – apă, existând deci o interfață între cele două cu o diferență de presiune între cele două faze.

Pe direcția verticală se consideră că există o schimbare bruscă în starea de saturații a zăcământului, contactele apă – țiței și țiței – gaze fiind considerate suprafețe plane, lucru care nu reflectă realitatea, practic contactul apă - țiței este adâncimea cea mai mică pentru care saturația în apă (S_w) este de 100%.

La contactul apă - țiței presiunile dintre cele două faze sunt egale. Deasupra acestuia din cauza diferențelor de densitate ale celor două faze există o diferență de presiune între țiței și apă, care se manifestă printr-o presiune capilară și o stare de saturație. Există deci o zonă de tranziție pe verticală.

Cercetări hidrodinamice [17] sunt procese în urma cărora se obțin informații referitoare la zăcământ prin analiza comportării presiunii de zăcământ și a debitelor și ajută la următoarele:

- Investighează un volum mai mare din zăcământ decât în cazul carotelor și investigațiilor geofizice;
- Permite o mai bună evaluare a permeabilității;
- Permite o mai bună evaluare a condițiilor din jurul găurii de sondă;
- Permite o mai bună evaluare a limitelor zăcământului.

Obiectivele cercetării sondelor sunt:

- Definirea limitelor zăcământului;
- Estimarea ariei de drenaj;
- Caracterizarea zăcământului;
- Diagnosticarea condițiilor din jurul găurii de sonda (blocaj, fisuri, etc), în vederea evaluării productivității sondei;
- Evaluarea eficienței operațiilor de stimulare.

Testele de producție [17] sunt:

- Cercetarea la deschidere: constă în producerea sondelor cu un debit constant pe o anumită perioadă de timp și măsurarea variației în timp a presiunii dinamice. Analiza curbei de declin a presiunii permite estimarea capacității de curgere a stratului, permeabilității efective, factorului skin, rației de productivitate.

- Cercetarea pe game de duze și teste izocronale: utilizate în special în cazul sondelor de gaze, au drept scop determinarea ecuațiilor de curgere, a debitului potențial al sondei, a capacității de curgere a gazului, a factorului skin.
- Cercetarea la închidere: constă în producerea unei sonde la un debit constant pe o anumită perioadă de timp, astfel încât în jurul găurii de sondă distribuția de presiune să fie uniformă, urmată de închiderea sondei pe o perioadă de timp Δt . Înainte de închiderea sondei se lansează în gaura de sondă un manometru de presiune (meccanic sau electronic) care va înregistra variația presiunii din gaura de sondă în timpul testului hidrodinamic.
- Teste de interferență: pentru efectuarea acestui test se aleg două sau mai multe sonde, una din ele fiind sondă de observație. Sondele alese pentru test se închid, iar din curbele de restabilire a presiunii obținute se determină parametri ce interesează.

Parametrii fizici și hidrodinamici ai zăcămintelor care pot fi obținuți din analiza și interpretarea testelor hidrodinamice sunt:

- Transmisivitatea, T : reprezintă viteza la care un fluid de o vâscozitate dată trece printr-o secțiune de lățime unitară și înălțime egală cu grosimea efectivă a formației sub acțiunea unui gradient unitar de presiune.
- Indicele de productivitate/receptivitate, IP / IR : este definit ca debitul de fluid produs de o sondă (injectat printr-o sondă) raportat la presiunea diferențială strat sondă.
- Indicele de productivitate/receptivitate specific, IPs / IRs : este definit ca raportul dintre indicii de productivitate/receptivitate și grosimea efectivă a stratului productiv.
- Indicele de productivitate/receptivitate ideal: reprezintă debitul de fluid produs/injectat de o sondă raportat la diferența dintre presiunea diferențială și căderea de presiune suplimentară datorate efectului de sondă (factor skin).
- Rația de productivitate respectiv rația de receptivitate RP/RR : este egală cu raportul dintre indicii de productivitate/receptivitate, reali și ideali.
- Presiunea statică de zăcământ, P_s : reprezintă unul din cei mai importanți parametri necesari pentru conducerea exploatării zăcămintelor. Pentru obținerea ei sunt folosite mai multe metode de determinare care sunt aplicabile doar unor sisteme etanșe și folosesc: ecuații de bilanț material, aria de drenaj și istoricul de producție.
- Porozitatea fisurală, Φ_f : este un parametru ce caracterizează zăcămintele fisurate natural (zăcăminte cu porozitate duală – exemplu calcare fisurate).

Evaluarea efectului skin s-a introdus pentru a explica diferența observată între presiunea măsurată în timpul cercetării sondei și cea calculată [3].

Alterarea transmisivității în jurul sondei poate fi cauzată de un proces de:

- Deteriorare ($k_a < k$), factor skin pozitiv
- Stimulare ($k_a > k$), factor skin negativ

Impactul injecției asupra factorului skin:

- particulele solide din apa de injecție pot bloca formația,

- apa de injecție poate fi incompatibilă cu apa de zăcământ determinând depunerea carbonaților și deteriorarea proprietăților din jurul găurii de sondă,
- apa de injecție poate fi incompatibilă cu mineralele argiloase din roca rezervor, putând determina dispersarea argilelor în particule fine, deplasarea lor conducând la blocarea formației.

Dacă permeabilitatea zonei alterate este mai mică decât permeabilitatea stratului, factorul skin este pozitiv. Dacă permeabilitatea zonei alterate este mai mare decât permeabilitatea stratului, factorul skin este negativ. Dacă permeabilitatea zonei alterate este egală cu permeabilitatea stratului, factorul skin este 0.

Cel mai bine injecția de apă se aplică la zăcămintele:

- exploatate prin regimul gazelor dizolvate (ieșirea gazelor din soluție), acestea fiind unul dintre cei mai buni candidați pentru injecția de apă;
- exploatate prin expansiunea capului de gaze, necesită o atenție sporită pentru a preveni pierderile de apă în capul de gaze și avansarea țițeiului în capul de gaze;
- cu o slabă avansare a apei, aduce un aport la menținerea presiunii de zăcământ;
- acționate prin segregare gravitațională, sunt de regulă zăcăminte foarte înclinate și cu suprafață redusă ceea ce face dificilă amplasarea sondelor de injecție.

Prin utilizarea injecției de apă se pot realiza următoarele avantaje tehnice:

- creșterea rezervelor de țiței, fără a săpa sonde noi, putând fi utilizate sondele de exploatare inundate;
- menținerea unor ritmuri de exploatare ridicate și atingerea unor factori de recuperare ridicați, dacă procesul injecției se începe după o perioadă de timp relativ scurtă de la începerea procesului de producție, cazul ideal este de a se începe injecția de apă extraconturală înainte ca presiunea de zăcământ să scadă sub presiunea de saturație;
- prelungirea duratei de producere a sondelor prin erupție naturală, chiar producând cu procente mari de apă.

Nu se aplică la zăcămintele cu împingere puternică de apă, la aceste zăcăminte procesul injecției de apă aduce un aport prea slab pentru a putea deveni rentabile.

De asemenea, injecția de apă nu este recomandată pentru următoarele zăcămintele: cu permeabilități foarte mici, în cazul zăcămintelor de țițeiuri grele, în cazul zăcămintelor caracterizate printr-o puternică neuniformitate a stratelor lenticulare.

Eficiența spălării unui zăcământ este funcție de raportul mobilităților fluidului injectat și al celui dezlocuit [17].

$$M = \frac{\text{Mobilitate a fluidului injectat}}{\text{Mobilitate a fluidului deslocuit}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (1.1)$$

unde λ este raportul dintre permeabilitatea efectivă a stratului și vâscozitatea fluidului din mediul poros.

Dacă:

- $M=1$, atunci mobilitățile fazei injectate și a celei deslocuite au aceeași valoare,

- $M < 1$ eficiența deslocuirii țițeiului este mare, în acest caz injecția de apă este preferabilă celei de gaze întrucât valoarea raportului mobilităților este mică fapt ce conduce la obținerea unei eficiențe superioare a spălării,
- $M > 1$ eficiența spălării este mică. Este cazul injecției de gazelor într-un zăcământ de țiței vâcos.

Se obțin eficiențe mici ale spălării datorită valorilor mari ale raportului mobilităților..

1.2 Injecția extraconturală a apei

Presupunând că avem un zăcământ ipotetic de formă circulară [17], de dimensiuni foarte mari și care conține un singur fluid puțin compresibil. Sondele de injecție sunt amplasate într-un șir concentric față de sondele de reacție, din analiza cazurilor în care injecția de apă ar începe concomitent cu procesul de producție pentru menținerea presiunii de zăcământ la valoarea inițială, sau injecția va fi începută mai târziu la o presiune de zăcământ mai mică decât presiunea inițială, rezultă următoarele constatări:

- o parte din apa injectată se pierde în sinclinal neparticipând la procesul de dezlocuire a țițeiului, această cantitate este mare la începutul procesului dar apoi descrește în timp tinzând către zero [17], [23] și [29].
- cantitatea de apă pătrunsă în sinclinal în unitatea de timp este cu atât mai mare cu cât presiunea la șirul sondelor de injecție este mai mare față de presiunea inițială de zăcământ și cu cât sondele de injecție sunt amplasate mai departe față de sondele de reacție, debitul de injecție necesar menținerii de presiune este cu atât mai mare cu cât presiunea de zăcământ (care se menține prin injecție) este mai mare, mai apropiată de presiunea inițială de zăcământ.

Pentru a utiliza într-un mod cât mai eficient energia de zăcământ, injecția de apă extraconturală trebuie începută numai din momentul scăderii presiunii sub valoarea necesară care asigură erupția naturală, dacă exploatarea cu ajutorul procesului de injecție nu este mai costisitoare decât exploatarea în gazlift și pompaj de adâncime.

În cazul zăcămintelor de petrol care au în acoperiș și culcuș strate cu permeabilități mari, saturate cu apă și gaze, procesul injecției de apă trebuie să înceapă imediat după începerea exploatării. În caz contrar scăderea presiunii în decursul exploatării poate atrage de la sine inundarea zonei productive cu apă și gaze din acvifer și cupola de gaze.

În procesul de dezlocuire a țițeiului de către apă au loc inerente deformări ale contactului țiței apă față de frontul de dezlocuire, deformări ce sunt rezultatul neuniformității zăcământului pe orizontală și verticală și sunt numite canalizări ale apei, rezultând avansări preferențiale ale apei. Datorită unui strat cu permeabilitate foarte mare intercalat într-un pachet de nisipuri se poate produce scurt-circuitarea între sondele de injecție și cele de extracție, apa curgând practic numai prin acest strat [5].

Ca metodă de prevenire a avansării preferențiale a apei se folosește injectarea unor agenți de obturare introduși în sonda odată cu apa de injecție. Se folosesc substanțe chimice care în contact cu apa precipită și reduc permeabilitatea, un exemplu este dat de emulsiile de rășini în apă.

Se determină astfel indicele de receptivitate (injectivitate) "IR": caracterizează capacitatea de recepție a apei în sonda respectivă și este definit ca debitul de apă injectat zilnic pentru o presiune diferențială

egală cu unitatea. Presiunea diferențială este egală cu diferența dintre presiunea medie de injecție la talpa sondei și presiunea de zăcământ.

În timpul oricărui proces de injecție de apă, se cercetează sondele pentru a se vedea cauza reducerii sau creșterii debitului de injecție. Se determină indicele de receptivitate localizat "IRL" care caracterizează numai receptivitatea cilindrului de rocă din spatele perforaturilor, deci nu este afectat de interferența sondelor vecine și nici de zona mai depărtată de sonda de injecție. Din analiza indicelui de receptivitate local, pe parcursul procesului se obțin următoarele informații:

- evaluarea efectului de blocare al porilor rocii în jurul sondei,
- evaluarea eficienței operațiilor de mărire a receptivității stratului,
- evaluarea eficienței operațiilor de blocare a intervalelor cu permeabilități foarte mari.

La injecția extraconturală sondele de injecție se amplasează paralel cu limita țigței apă, iar sondele din primul șir situate izobatic mai sus față de cele de injecție, devin sonde de reacție [16]. Apa deslocaiește țigțeiul împingându-l spre sonda de producție [17].

Presiunea de zăcământul este mai mare decât presiunea de saturație.

Saturația în țigței scade în spatele frontului de apă până la atingerea saturației reziduale în țigței. Acesta este un model mai realist al procesului de dezlocuire. Majoritatea cantității de țigței este deslocuită în fața frontului [17]. O altă cantitate importantă de țigței este deslocuită de apa care se mișcă în spatele frontului de injecție, aceasta antrenează și țigțeiul care a rămas în spatele frontului de dezlocuire, acest mecanism fiind de tip piston neetanș

Presiunea de zăcământul este mai mică decât presiunea de saturație.

Sub presiunea de saturație, în spațiul poros există și o saturație în gaze. Pe măsură ce presiunea de zăcământ crește până deasupra presiunii de saturație, gazele vor intra înapoi în soluție. Deci în prima fază a injecției va avea loc umplerea porilor saturați cu gaze. Cu cât zăcământul este mai depletat, cu atât timpul necesar umplerii este mai mare și prin urmare efectul injecției se va resimți mai târziu [17].

După inițierea unui proces de injecție de apă extracontural, apar două perioade majore:

- perioada de la inițierea procesului de injecție de apă până la interferența frontului de apă de la fiecare sondă de injecție, rezultând frontul de dezlocuire,
- Perioada avansării frontului de dezlocuire până la primul șir de sonde de reacție, apa injectată apare la sondele de reacție, fapt care se poate demonstra prin analiza salinității și prin creșterea fracției de apă,
- perioada de deplasare a frontului de dezlocuire de la primul șir de sonde de reacție care produc cu 80-95% impurități la al-II-lea șir de sonde de reacție și mai departe.

În afară de condițiile naturale ale zăcământului (grosimea stratului, permeabilitate, raportul mobilităților, uniformitatea zăcământului) eficiența unui proces de apă mai depinde și de:

- modul de pregătire al sondelor de injecție;
- debitele și presiunea de injecție;
- amplasarea rețelei sondelor de injecție și reacție;
- calitatea apei de injecție;

- modul de urmărire și dirijare a procesului pe parcursul acestuia.

Injecția de apă cu polimeri

Injecția de apă cu polimeri a venit ca o soluție de îmbunătățire a proceselor de injecție de apă, utilizându-se apă cu vâscozitate ridicată pentru creșterea eficienței spălării.

Ținând seama de legea lui Darcy pentru o presiune diferențială dată,

$$q = \frac{KA(h_1 - h_2)}{L} \quad (1.2)$$

debitul de curgere al unui fluid prin mediul poros este direct proporțional cu raportul dintre permeabilitatea efectivă (k) a mediului poros și lungimea mediului poros (L), unde h_1 și h_2 sunt grosimile mediului poros iar (A) este secțiunea mediului poros.

Când apa dezlocuiește țiteiul într-un proces convențional de spălare cu apă, eficiența procesului este influențată de vâscozitățile apei și a țiteiului, dar și de neuniformitatea rocii rezervor, adică descrește cu cât mobilitatea apei în raport cu cea a țiteiului este mai mare.

Se observă că apa cu o vâscozitate mai mică decât a țiteiului are o mobilitate " λ_w " mai mare și prin urmare raportul mobilităților va fi supraunitar " $M > 1$ ". Deci apa injectată în zăcământ va avea o abilitate de curgere mai mare decât a țiteiului și o tendință de ocolire a acestuia. Această tendință va fi cu atât mai mare cu cât raportul mobilităților " M " va fi mai mare. În scopul de a reduce raportul mobilităților apei și țiteiului într-un proces de spălare cu apă se poate acționa în două moduri:

- micșorând vâscozitatea țiteiului;
- crescând vâscozitatea apei.

Metoda injecției de apă cu polimeri urmărește reducerea mobilității apei de dezlocuire prin solubilizarea unor cantități de polimeri sintetici în apa de injecție [2]. Această reducere a mobilităților este atribuită nu numai unei creșteri a vâscozității apei ci și unei rezistențe la curgere manifestată de unii polimeri în apă. Polimerii solubiliți în apa de injecție pot manifesta diferite grade de rezistență la curgere numai în mediul poros, deoarece acesta se caracterizează printr-un grad mare de tortuozitate.

Efectul de rezistență la curgere constă în comportarea soluției de apă cu polimeri într-un mediu poros ca și cum vâscozitatea soluției este mult mai mare decât valoarea inițială. Soluția de apă cu polimeri reduce permeabilitatea mediului poros prin care curge.

Se injectează în zăcământ un dop de apă aditivată și se împinge spre sondele de reacție cu ajutorul apei neaditivate. Aditivul utilizat trebuie să fie în concentrație foarte mică, să reducă de câteva ori mobilitatea apei de injecție.

Scopurile injecției de apă cu polimeri sunt fie reducerea mobilității apei, fie creșterea eficienței spălării, prin urmare corectarea efectului neuniformității datorate variațiilor accentuate ale permeabilității. Injecția de apă cu polimeri nu se aplică după spălarea cu apă a zăcământului ca metodă terțiară pentru că pot avea loc pierderi de apă în acvifer sau în zona capului de gaze.

Dezlocuire miscibilă.

După spălarea cu apă a unui zăcământ la presiune joasă, în porii rocii în care a pătruns apa rămâne țitei reținut de tensiunile interfaciale oricâte volume de agent de dezlocuire vor fi injectate

Prin dezlocuirea miscibilă a țițeiului se înțelege dezlocuirea acestuia cu un fluid cu care să se amestece.

Dezlocuirea miscibilă cu dioxid de carbon și apă carbonată

Fenomenele care contribuie la creșterea capacității de curgere (respectiv a mobilității țițeiului) prin utilizarea bioxidului de carbon ca agent de dezlocuire, sunt:

- reducerea vâscozității țițeiului până la valori de 10 – 100 ori mai mici, dacă presiunea crește treptat până la valoarea presiunii de saturație; această reducere este mult mai importantă în cazul țițeiurilor medii și grele decât la țițeiurile ușoare. Pe lângă îmbunătățirea mobilității țițeiului, scăderea vâscozității acestuia duce la o mai eficientă utilizare a energiei de zăcământ - creșterea factorului de volum al țițeiului prin solubilizarea CO₂ în țiței
- creșterea volumului și a densității țițeiului, astfel încât o parte din țițeiul imobil (reținut în microcapcane și care depășește prin "umflare" volumul corespunzător saturației reziduale în țiței) devine mobil. Astfel, volumul ocupat în condiții de suprafață de țițeiul rezidual din zăcământ care conține bioxid de carbon în soluție este mai mic.

Poate apare fenomenul de mărirea permeabilității rocilor calcaroase și carbonatice datorită efectului de acidizare al bioxidului de carbon, conform reacției reversibile:

În cazul rocilor calcaroase și/sau carbonatice, acidul carbonic format în zăcământ dizolvă carbonații de calciu și magneziu, bicarbonații rezultați fiind solubili în apă [26].

Crește energiei de zăcământ se datorează, atât destinderii bioxidului de carbon solubilizat în țiței, cât și injectiei de CO₂ și apă.

Injectia de dioxid de carbon urmată de injectia de apă pentru împingere.

Deoarece bioxidul de carbon este miscibil cu țițeiul din zăcământ la presiuni mai mari și este solubil și în apă la aceste presiuni, pentru îmbunătățirea recuperării țițeiului se poate aplica injectia de dopuri de bioxid de carbon pur împinse cu apă.

Reducerea vâscozității țițeiului datorită miscibilității sale cu bioxidul de carbon și folosirea apei ca agent de deplasare imiscibilă a bioxidului de carbon, contribuie la reducerea atât a gradientilor de presiune la curgerea țițeiului prin zăcământ, cât și a posibilităților de canalizare.

În zăcământ rămâne însă o saturație reziduală de bioxid de carbon, ceea ce face ca în urma frontului de dezlocuire să existe un amestec de țiței CO₂, de vâscozitate redusă, care duce la reducerea saturației în țiței remanent.

Injectia de apă carbonată.

Procedeeul constă în injectarea unui dop de apă carbonată (de 0,5 – 1 volume de pori), care intrând în contact cu țițeiul din zăcământ permite difuzia bioxidului de carbon. Această difuzie este însă mai lentă decât în cazul injectiei de bioxid de carbon pur, diminuând astfel șansele obținerii unei concentrații efective de CO₂ în frontul de dezlocuire.

La zăcămintele de țiței epuizate energetic, pentru creșterea factorului de recuperare (respectiv reducerea saturației în țiței rezidual), poate fi aplicată spălarea cu apă carbonată. Efectul acestui

proces de recuperare constă în reducerea vâscozității țițeiului, îmbunătățind astfel raportul mobilităților fluidelor în zăcământ,

1.3 Injecția intraconturală a apei

Injecția intraconturală se aplică zăcămintelor epuizate din punct de vedere energetic, dar care mai conțin cantități importante de hidrocarburi, zăcămintelor a căror saturație în țiței nu trebuie să fie mai mică de 35-40%, avantajate fiind zăcămintele a căror exploatare primară s-a realizat în regimul gazelor dizolvate la care factorii finali de recuperare sunt mai mici de 15%. Următoarele zăcăminte candidate la injecția intraconturală sunt cele care au lucrat în regim mixt de energie: iesirea gazelor din soluție și împingerea parțială a acviferului. Nu se folosește injecția de apă în cazul zăcămintelor cu acvifere active, deoarece nu sunt deosebiri majore în procesul de dezlocuire a țițeiului de către apă. Acest proces de injecție se folosește în cazul zăcămintelor ale caror strate au înclinări reduse și o rețea uniformă de sonde [17] și [23].

Pentru realizarea unui proces de injecție intracontural se folosesc panourile în cinci, șapte sau chiar nouă puncte și se pleacă de la următoarele ipoteze teoretice:

- zăcământul este omogen și uniform;
- permeabilitatea efectivă pentru apă se considera constantă;
- exploatarea are loc la presiune constantă.

Conform acestor ipoteze se presupune că apa injectată prin sonda de injecție aflată în centrul panoului se răspândește radial împingând în față ei țițeiul [32].

În procesul de injecție se pot stabili trei etape [17] și anume:

- prima etapă durează de la începutul injecției până când pâlniile de influx se întâlnesc, debitul de injecție variind puternic la început, după care tinde să se stabilizeze;
- a doua etapă numită și perioada de interferență durează din momentul întâlnirii pâlniilor de influx până în momentul pătrunderii apei în sondele de extracție;
- a treia etapă este cea a curgerii stabilizate care începe din momentul pătrunderii apei în sondele de extracție, debitul devenind constant.

Un proces de injecție poate fi aplicat numai dacă debitul maxim de țiței obținut pe sondă medie, este mai mare de câteva ori decât debitul de țiței obținut înaintea începerii procesului de injecție.

Factorii care influențează alegerea tipului de rețea sunt:

- amplasamentul actual al sondelor;
- azimutul fracturilor;
- geometria zăcământului;
- receptivitatea stratului;
- planul de foraj de îndesire;
- etanșeitatea coloanelor sondelor candidat la convertirea în injecția de apă.

Orientarea greșită a rețelei ar putea determina apariția unor fisuri pe o anumită direcție la injecția cu presiuni mai mari decât presiunea de fisurare.

Apa injectată în sonda de injecție aflată în centrul panoului, se răspândește radial împingând în fața ei țițeiul. S-a introdus noțiunea de porozitate dinamică pentru apă, având în vedere distribuția saturațiilor la începutul procesului de injecție. În porii rocii există o saturație în apă ierductibilă, o saturație în țiței și o saturație în gaze.

$$s_{wi} + S_o + S_g = 1 \quad (1.3)$$

Apa întâi va umple porii saturați cu gaze și dupe aceea va începe procesul de dezlocuire a țițeiului de către apa injectată.

Capitolul 2 Mecanismele implicate în dezlocuirea țițeiului de către apa de injecție

2.1 Generalități

Dizolvarea gazelor în țiței este asociată cu presiunea de saturație. Presiunea medie de zăcământ „ p_z ” poate fi mai mare sau mai mică decât presiunea de saturație „ p_s ”. Dacă $p_z > p_s$, țițeiul este nesaturat, iar curgerea în zona productivă este omogenă. Dacă $p_z < p_s$, țițeiul este saturat, iar curgerea va fi eterogenă (țiței și gaze), deci mai defavorabilă din punctul de vedere al consumului de energie.

Rația de soluție influențează nivelul energetic al zăcămintelor de țiței. Atât rația de soluție cât și presiunea de saturație variază pe grosimea stratului, în cadrul aceluiași zăcământ, ambele având valori mai mari în partea superioară a zăcământului decât în apropierea zonei de contact.

Pe de altă parte, viscozitatea și masa specifică a țițeiului au valori mai ridicate în partea de jos a zăcământului.

Cele două aspecte menționate arată că țițeiul are mobilitate mai mare în partea superioară a zonei productive decât în apropierea contactului țiței/apă. De asemenea, în partea superioară se manifestă mai de timpuriu ieșirea gazelor din soluție.

Zăcământul de hidrocarburi fluide a fost definit ca un sistem unitar, alcătuit dintr-o zonă saturată cu hidrocarburi (zona productivă) și o zonă saturată 100% cu apă (acviferul adiacent), energia de zăcământ fiind încorporată în cele două zone, iar de capacitatea energetică a fiecărei zone va depinde capacitatea energetică a zăcământului.

În cazul zăcămintelor de țiței sunt trei formele de energie naturală:

1. Forma elastică a energiei de zăcământ;
2. Forma mixtă a energiei de zăcământ;
3. Energia gravitațională.

Forma elastică a energiei de zăcământ. Dacă presiunea de zăcământ este superioară presiunii de saturație, țițeiul este nesaturat, curgerea în zona productivă fiind omogenă. Mecanismul care provoacă deplasarea țițeiului din mediul poros către tălpile sondelor de extracție este următorul: datorita gradientilor de presiune strat-sonde, roca se destinde măriru-și volumul, în timp ce volumul de pori se reduce (volumul brut rămâne invariabil); pe de altă parte, lichidele din pori (apa și țițeiul) se destind și ele, măriru-și volumul, deci aceste efecte se însumează.

În ce privește regimul de exploatare, pot apărea două situații: dacă acviferul are o capacitate

elastică deosebit de însemnată, regimul de exploatare derivat va fi *regimul elastic*; în schimb dacă acviferul finit are o capacitate elastică redusă, dar este alimentat printr-un afloriment, atunci regimul care este generat este un *regim rigid*.

Forma mixtă a energiei de zăcământ. Luând în considerare cazul unui zăcământ care are o cupolă de gaze, o zona saturată cu țiței (zona productivă) și un acvifer adiacent activ.

În această situație există mai multe forțe care promovează curgerea țițeiului spre sondele de extracție, și anume: destinderea acviferului adiacent, destinderea cupolei de gaze și destinderea gazelor ieșite din soluție (gazele libere din zona productivă). Ultimul fenomen este denumit „ieșirea gazelor din soluție”. Cele trei forțe menționate au toate o pondere însemnată și de aici rezultă caracterul mixt al energiei de zăcământ. Regimul de exploatare derivat va fi așadar, regimul mixt.

Din cazul general derivă alte trei cazuri particulare:

1. Absența cupolei de gaze. Forțele care acționează în sistem se reduc la două: destinderea elastică a acviferului și ieșirea gazelor din soluție. Este cazul zăcămintelor de țiței la care presiunea inițială de zăcământ este egală cu cea de saturație sau mai mare. Regimul de exploatare derivat este *regimul împingerii parțiale a apelor marginale* numit așa pentru faptul că acviferul nu are o capacitate elastică suficient de mare pentru a menține presiunea de zăcământ peste cea de saturație.

2. Absența acviferului sau capacitatea lui elastică este nesemnificativă, dar există o cupolă de gaze. Forțele care acționează în sistem sunt asociate cu destinderea cupolei de gaze și ieșirea gazelor din soluție. Cupola de gaze poate exista de la început (cupolă primară) sau se poate forma ulterior (cupolă secundară). Regimul de exploatare se numește *regimul acționării gazelor*.

3. Absența cupolei de gaze și acviferului (sau acesta din urmă este inactiv). Singura forță care lucrează în sistem este ieșirea gazelor din soluție. Este situația zăcămintelor la care presiunea de zăcământ este apropiată de presiunea de saturație. Regimul de exploatare poartă denumirea de *regim de gaze dizolvate*.

Energia gravitațională.

Se întâlnește cu precădere la zăcămintele cu înclinări și permeabilități mari, fiind predominant în ultima perioadă din timpul exploatării. Pe măsură ce țițeiul este dezlocuit, gazele, prin segregare gravitațională, ocupă zonele structural ridicate, formând un cap secundar de gaze.

Debitele de țiței ale sondelor sunt cu atât mai mari cu cât ele sunt deschise în poziții structurale mai coborâte, unde saturația în țiței este mai mare și rațiile gaze/țiței mici.

2.2 Dezlocuirea țițeiului

Eficiența procesului de dezlocuire este analizată la nivelul porilor – eficiența deslocuirii microscopice, și la nivelul zăcământului, atât pe orizontală cât și pe verticală – eficiența deslocuirii macroscopice.

a) Eficiența deslocuirii microscopice este fracțiunea de fluid deslocuit din zona contactată de faza deslocuitoare. Parametrul care o caracterizează este *factorul de spălare* (E_M).

În prima perioadă a deslocuirii unui țiței de către o fază nemiscibilă cu aceasta, se extrage numai țiței. În continuare apare și agentul de dezlocuire a cărui fracție crește în timp, accentuat la început pentru

ca apoi să aibă o tendință de aplatizare, corespunzător cu scăderea fracției în țigăi. Dacă exploatarea ar continua până la stabilirea saturației reziduale în țigăi, atunci fracția de apă ar ajunge maximă [9].

Factorul de spălare este cu atât mai mare cu cât mobilitatea agentului de dezlocuire este mai mică decât mobilitatea țigăiului, respectiv raportul mobilităților este subunitar, vezi ecuația (1.1):

Un alt parametru ce caracterizează eficiența dezlocuirii la scară micro este *numărul capilar* (N_{cap}), definit ca raportul dintre forțele de viscozitate și forțele capilare:

$$N_{cap} = \frac{\mu v}{\sigma}; \quad (2.1)$$

μ este viscozitatea fazei dezlocuitoare, σ tensiunea interfacială, v viteza de filtrare în mediul poros.

Creșterea numărului capilar conduce la scăderea saturației reziduale în țigăi.

Creșterea eficienței de dezlocuire microscopică poate fi realizată prin:

- micșorarea mobilității fazei dezlocuitoare în raport cu cea a țigăiului (metodele termice, injecția de soluții de polimeri);
- creșterea numărului capilar. Dacă în cazul injecției de apă valoarea N_{cap} este de ordinul a 10^{-6} , pentru care saturația remanentă în țigăi este de cca. 40 – 45% într-un proces de injecție de soluție alcalină sau tensioactivă, datorită micșorării substanțiale a tensiunii interfaciale, valoarea numărului capilar crește până la valori de ordinul 10^{-4} – 10^{-3} , ceea ce corespunde unei saturații remanente în țigăi de cca. 30 – 35%;

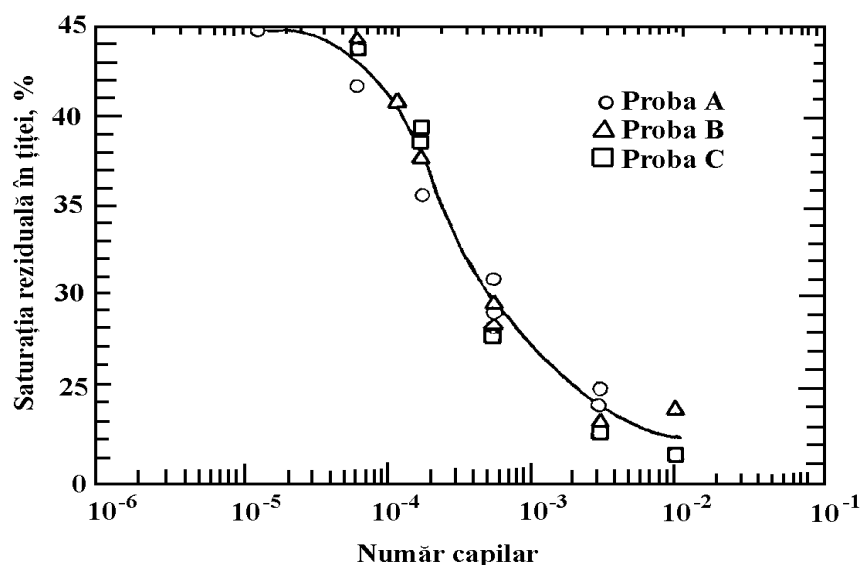


Figura 2.1 Influența numărului capilar asupra saturației reziduale în țigăi [17].

b) Eficiența dezlocuirii macroscopice arată cât de mare este volumul de pori contactat de faza dezlocuitoare din întregul volum de pori al zonei productive. Aceasta este caracterizată prin factorul de inundare volumetrică (E_v) care este compus din eficiența inundării în suprafață – fracția din suprafața unui zăcământ invadată de fluidul dezlocuitor și de eficiența inundării pe verticală - fracția din secțiunea verticală a zăcământului care este contactată de faza dezlocuitoare. Dezlocuirea se realizează în mod diferențiat, începând cu zonele cu permeabilitățile cele mai mari. Presiunea rămâne mai ridicată în

stratele mai puțin permeabile, țițeiul curgând din acestea către zonele mai permeabile. Se poate vorbi și de un factor de inundare datorită neuniformității rocii [1] și [9].

Factorul de inundare volumetrică crește pe măsura exploatării zăcământului. În timp, însă, creșterile sunt din ce în ce mai mici, iar volumul fazei dezlocuitoare este din ce în ce mai mare. Neuniformitatea zăcământului va conduce la o eficiență de dezlocuire macroscopică cu atât mai redusă cu cât aceasta este mai mare.

Histereza de udare În momentul în care saturația în țiței ajunge la valoarea saturației reziduale, țițeiul existent în zăcământ nu mai poate fi extras, fiind necesară o energie suplimentară care să-l dezlocuiască. În canalele capilare de mici dimensiuni dezlocuirea de către apă (apa fiind faza umezitoare) este funcție de histereza de udare. Practic histereza de udare este denumită ca fiind modificarea unghiului de contact a unei picături de țiței care se află în contact cu apa de zăcământ în prezența suprafețelor pereților capilari sub acțiunea unei forțe exterioare [14].

Dezlocuirea nemiscibilă a țițeiului

Dezlocuirea nemiscibilă a țițeiului presupune existența interfețelor între faza dezlocuitoare și faza dezlocuită (țiței). Tensiunea interfacială care caracterizează interfața va genera o presiune capilară. În funcție și de caracteristicile de umectabilitate, de structura spațiului poros, etc. această presiune poate avea un rol mai mare sau mai mic în procesul de dezlocuire.

Dezlocuirea țițeiului este :

- a) dezlocuirea tip „piston” [17] care consideră că de la primul contact apa dezlocuie în întregime țițeiul;
- b) dezlocuirea tip fracțional (teoria Buckley-Leverett) [17] care consideră că saturația în țiței se reduce treptat, după trecerea mai multor volume de fază dezlocuitoare, în spatele frontului de dezlocuire se formează o zonă de tranziție cu o variație descrescătoare a saturației în țiței.

Pentru cazul dezlocuirii țițeiului cu apă sau diferite soluții nemiscibile cu țițeiul, teoria Buckley-Leverett este cea mai aplicată.

Conform acestei teorii, dezlocuirea nemiscibilă a țițeiului poate fi considerată o dezlocuire de tip fracțional, caracterizată printr-o distribuție a saturațiilor în fluide de-a lungul mișcării, invariabilă în cadrul grosimii stratului.

Se definește fracția f_D , a debitului de fluid dezlocuitor Q_D din debitul total Q_t , ca:

$$f_D = \frac{Q_D}{Q_t} = \frac{Q_D}{Q_D + Q_o} \quad (2.2)$$

pentru curbele de permeabilitate relativă avem relația fracției f_D devine:

$$f_D = \frac{1}{1 + \frac{k_{ro} \mu_D}{k_{rD} \mu_o}}; \quad (2.3)$$

Ecuția vitezei de deplasare a frontului de saturație constantă este:

$$v = -\frac{Q_t}{mA} f_D \quad (2.4)$$

Q_t este suma dintre debitul de țigăi și cel de fluid dezlocuitor,

m este porozitatea,

A este aria secțiunii zăcământului prin care se face dezlocuirea

Poziția frontului de saturație la momentul t este:

$$x = \frac{V_t}{m A} f_D' \quad (2.5)$$

f_D' este derivata fracției de fază dezlocuitoare.

Pe baza curbelor de permeabilități relative funcție de saturație, (figura 2.2), se construiește curba fracției de fază dezlocuitoare și a derivatei acesteia, (figura 2.3), determinându-se avansarea frontului de dezlocuire la diferite momente, (figura 2.4).

După modul cum se realizează miscibilitatea, aceasta este de două feluri [17]:

a) *miscibilitate la primul contact (miscibilitate directă)* se obține la frontul de dezlocuire indiferent de proporția celor două fluide (dezlocuitor și dezlocuit);

b) *miscibilitate prin contact multiplu (miscibilitate dinamică)* se obține numai după un transfer de componenți între cele două fluide, fie la frontul de dezlocuire, fie în spatele frontului de dezlocuire.

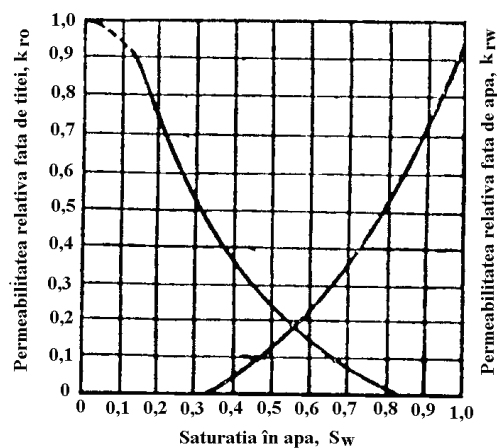


Figura 2.2 Curbe de $k_r = f(S)$ în ipoteza că faza umezitoare este apa [17]

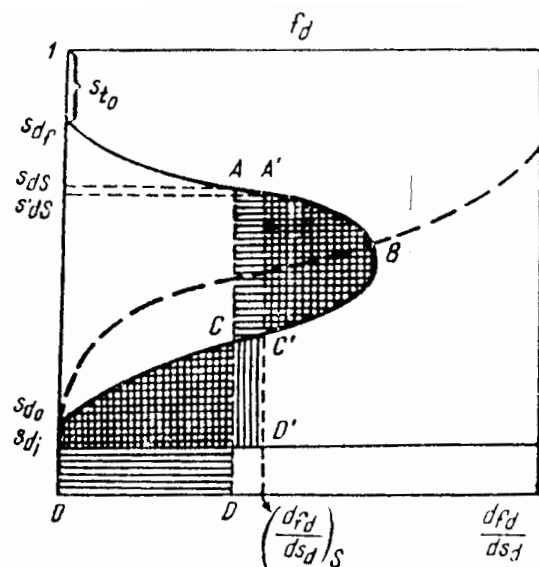


Figura 2.3 Curba fracției de fază deslocuitoare și a derivatei acesteia [17]

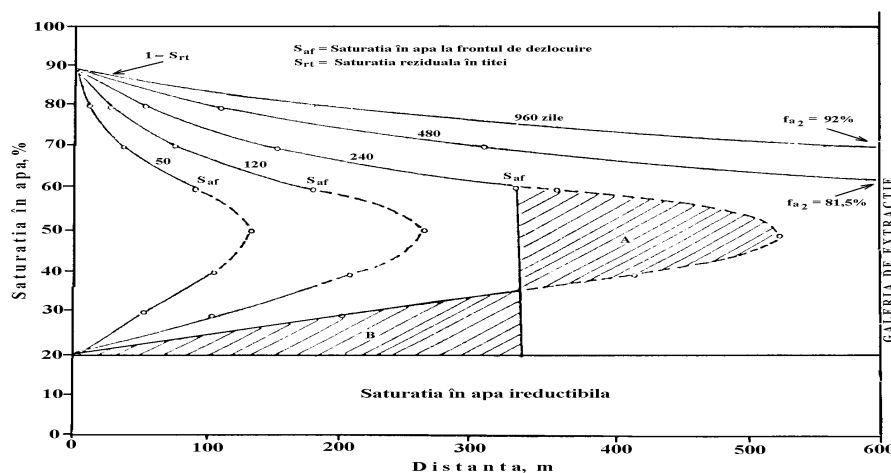


Figura 2.4 Avansarea frontului de dezlocuire la diferite momente [17]

Dezlocuirea miscibilă a țiteiului

Fie un sistem oarecare reprezentat prin trei componente X, Y, Z, (figura 2.5), în care se consideră componentul Z miscibil în orice proporție cu componentii X și Y. Componentul X este miscibil cu Y numai până la concentrația reprezentată prin punctul N (concentrația de saturație a componentului X). Componentul Y este miscibil cu X până la concentrația de saturație a componentului Y (punctul M). Punctele situate între X și M, respectiv între Y și N, reprezintă sisteme omogene (o singură fază).

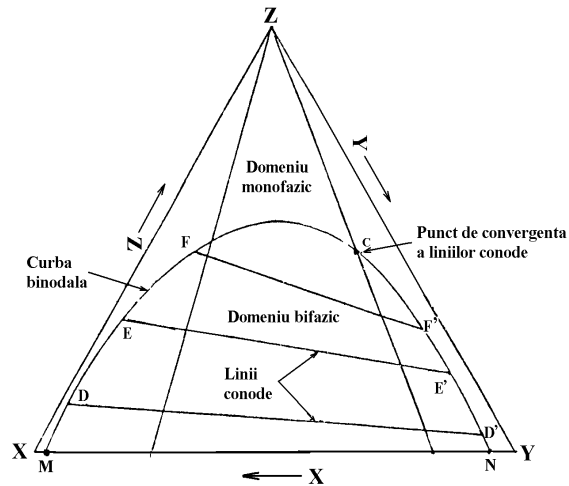


Figura 2.5 Comportarea de fază a unui sistem ipotetic reprezentată într-o diagramă de compoziție [17]

Un punct situat între M și N va reprezenta un sistem în stare bifazică. Dacă la acest sistem se adaugă componentul Z, se vor forma sisteme eterogene în care se vor separa două faze reprezentate prin punctele D și D', E și E', respectiv F și F'. Punctele M, D, E, F și N, D', E', F' generează două curbe care se întâlnesc în punctul C numit *punct critic de solubilitate*, punct la care concentrațiile celor două faze sunt identice. Punctele D și D' se numesc *puncte conjugate*, iar dreapta DD' *linie de legătură sau conodă*.

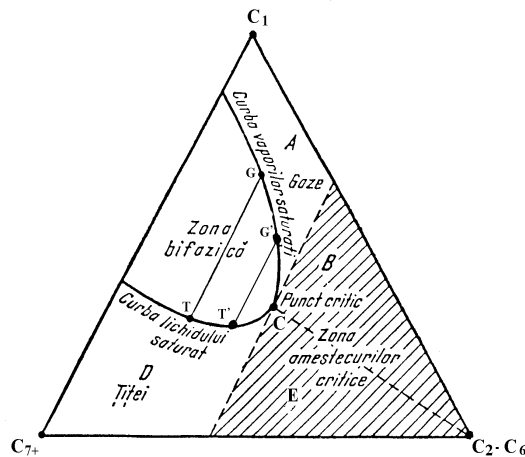


Figura 2.6 Comportarea de fază a unui sistem de hidrocarburi reprezentată într-o diagramă de compoziție [17]
Curba (MCN) se numește *curbă binodală* și separă domeniul bifazic (interiorul curbei) de cel monofazic (exteriorul curbei). Pentru o valoare dată a temperaturii zona bifazică este cu atât mai restrânsă cu cât valoarea presiunii este mai mare.

Un sistem de hidrocarburi aflat la temperatura și presiunea de zăcământ, este reprezentat într-o diagrama ternară, (figura 2.6), prin trei pseudocomponenți: C₁ în stare gazoasă, C₇₊ în stare lichidă și C₂ - C₆ în stare lichidă sau gazoasă în funcție de condițiile de presiune și temperatură la care se

găsește sistemul. Zona bifazică în care sistemul se prezintă sub formă de gaz și lichid, este cuprinsă între curba vaporilor saturați și curba lichidului saturat. Linia G-T este linia de legătură care unește gazul saturat de compoziție G cu țiteiul de compoziție T. Gazul G se află în echilibru cu țiteiul T. Pentru alte compoziții mai bogate în componenți intermediari ai gazului saturat și ai lichidului saturat, corespund alte linii de legătură (G'T'), care la limită se suprapun în punctul critic C. Dincolo de acest punct, sistemul se află în stare supercritică, monofazică.

Tangenta dusă prin C la curbă separă domeniul monofazic în următoarele subdomenii:

- la stânga tangentei în subzonele A și D, în care sistemul este în stare gazoasă, respectiv lichidă;
- la dreapta tangentei în subzonele B și E în care un sistem din subzona B este miscibil cu un gaz din subzona A, respectiv un sistem din subzona E va fi miscibil, în orice proporție, cu țiteiul din subzona D.

2.3 Comportarea moleculelor și schimbarea fazelor

Hidrocarburile au o comportare caracteristică funcție de schimbarea presiunii și a temperaturii [14]. Factorii fizici care determină comportarea lor sunt:

- presiunea,
- forța de atracție între molecule,
- energia cinetică, adică mișcarea moleculelor asociată cu temperatura,
- forța de respingere a moleculelor.

Presiunea și forța de atracție a moleculelor au tendința de a apropia moleculele, cu cât aceste forțe sunt mai mari cu atât substanța va deveni mai densă, așa se întâmplă când gazele devin lichide, spre exemplu apare fenomenul de umplere a țiteiului [17].

Atracția moleculară este considerată ca o presiune interioară, deoarece are loc în interiorul sistemului și acționează asupra moleculelor în același fel ca și presiunea exterioară. Forța de atracție dintre molecule variază cu distanța dintre acestea, atracția crescând când distanța scade.

Energia cinetică sau mișcarea moleculelor crește odată cu creșterea temperaturii, adică cu cât temperatura substanței este mai mare, cu atât tendința de împrăștiere a substanței va fi mai mare și substanța va fi mai puțin densă, adică gazele vor expanda – hidrocarburile vor trece din faza lichidă în faza gazoasă.

Când moleculele se apropie atât de mult încât câmpurile lor electrice se suprapun, apar *forțe de respingere* care măresc rezistența substanței la o comprimare și mai mare.

Este cazul țiteiurilor din zăcăminte aflate la presiune inițială. Când hidrocarburile sunt în stare de repaos adică nu expandează, nu se contractă și nici nu-și schimbă starea, forțele care tind să aglomereze moleculele ajung în echilibru cu forțele care tind să le împrăștie rezultând starea de echilibru.

2.4 Energia zăcămintelor de hidrocarburi fluide

Odată cu scăderea presiunii de zăcământ formele de energie se eliberează progresiv producând curgerea țiteiului. Recuperarea țiteiului depinde de:

- Expansiunea gazelor ieșite din soluție,
- Destinderea capului primar de gaze,
- Destinderea acviferului adiacent zonei saturate în țiței ,
- Destinderea sistemului rocă – fluid , adică decomprimarea țițeiului, a apei interstițiale și a rocii colectoare,
- Segregarea gravitațională a gazelor și a țițeiului.

Se disting următoarele mecanisme de dezlocuire:

- Elastic (destinderea sistemului rocă – fluid),
- Gaze dizolvate,
- Destinderea gazelor din capul de gaze,
- Împingerea apei (marginale sau de talpă),
- Gravitațional.

Mecanismul gazelor dizolvate se dezvoltă odată cu scăderea presiunii de zăcământ sub presiunea de saturație, gazele care ies din soluție reprezintă energia dezlocuirii țițeiului din strat către sondă.

Mecanismul destinderea gazelor din capul de gaze poate avea un aport substanțial asupra ameliorării factorului de recuperare în comparație cu cel realizat în regimul gazelor dizolvate, dacă volumul capului de gaze este considerabil mai mare decât volumul saturat cu țiței. Pentru dezvoltarea acestui mecanism exploatarea trebuie realizată astfel încât să se favorizeze segregarea gravitațională a gazelor ieșite din soluție, evitându-se exploatarea gazelor din capul de gaze prin sondele situate sus pe structură sau care produc țiței cu rații gaze – țiței mari.

Mecanismul împingerii naturale a apei reprezintă unul din cele mai eficiente mecanisme de dezlocuire și se dezvoltă în situația în care volumul bazinului acvifer adiacent zonei saturate cu țiței este mult mai mare decât volumul saturat cu țiței și are loc ca urmare a decomprimării acviferului. Acest fenomen se face simțit în momentul realizării unei diferențe de presiune între acvifer (care are o presiune mai mare) și zona de țiței exploatată. Același fenomen are loc și în situația în care acviferul este de dimensiuni reduse dar are o sursă de alimentare continuă, practic presiunea acviferului trebuie să aibă o variație mică în timp.

Mecanismul drenajul gravitațional se aplică la zăcămintele înclinate sau de grosime mare, care au fost exploatate în regim de gaze dizolvate, eventual și cu destinderea parțială a capului inițial de gaze, ajuns în fază finală de depletare când gradientii gravitaționali devin mai mari decât cei de presiune. În această situație ultimele volume de gaze rămase în soluție, se degajă, segregându-se spre partea superioară a stratului, luând locul țițeiului care se segregă spre partea inferioară a stratului care rămâne încă productivă.

La sfârșitul exploatării primare, în zăcământ rămâne o cantitate însemnată de țiței, care alcătuiește saturația reziduală în țiței, valoarea acesteia depinzând de mecanismele de dezlocuire care au produs zăcământul.

2.5 Explicarea mecanismelor de dezlocuire

Mecanismul gazelor dizolvate

Gazele fiind foarte expandabile dau energia necesară pentru a împinge țigheul spre gaura de sondă pe măsură ce presiunea începe să scadă.

Explicarea mecanismelor: [21], [30] și [31].

Mecanismul gazelor dizolvate Când se sapă o sondă nouă pe un zăcământ care este produs în regimul gazelor dizolvate, aceasta începe să producă, presiunea din vecinătatea găurii de sondă începe să scadă. Această scădere a presiunii face ca petrolul din zăcământ să se destindă elastic și să pătrundă în sondă. Presiunea din zăcământ scade datorită extragerii petrolului, gazele ies din soluție și apar sub formă de bule mici în pori, la început aceste bule mici nu se deplasează deoarece nu pot trece prin porii mici, însă gazele ies din soluție în cantități tot mai mari, pe măsură ce presiunea din zăcământ scade.

Aceste bule mici se măresc formând în final o fază continuă de gaze, care începe apoi să curgă.

Rația gaze țighei este mică la început, dar se mărește până când presiunea atinge o valoare scăzută încât atât țigheul cât și gazele încetează să mai curgă.

Adică energia zăcământului asigură deplasarea petrolului din zăcământ în gaura de sondă neputând să-l ridice până la suprafață.

Dintr-un zăcământ care este produs în regim de gaze dizolvate nu se produce apă sau se produce într-o cantitate foarte mică, întrucât zăcământul este format dintr-o capcană umplută cu țighei și apă interstițială care nu curge.

Mecanismul destinderea gazelor din capul de gaze

În unele zăcăminte au avut loc acumulări de țighei în care au existat volume mari de hidrocarburi ușoare, iar presiunea de zăcământ nu a fost suficient de mare pentru a menține toate hidrocarburile ușoare sub formă dizolvată în țighei. Astfel hidrocarburile ușoare și o parte din hidrocarburile grele au format o fază de gaze libere care au migrat la partea superioară a zăcământului unde au format o cupolă de gaze.

Acest surplus de gaze este comprimat și a devenit o sursă de energie pentru a împinge țigheul în gaura de sondă și a-l ridica la suprafață. Energia necesară producerii țigheului provine din două surse:

- expansiunea gazelor din capul de gaze;
- expansiunea gazelor ieșite din soluție, ambele procese având loc odată cu declinul presiunii.

Nivelul de țighei din zăcământ scade în perioada de producție, cupola de gaze expandând în zona saturată cu țighei. Presiunea de zăcământ tinde să se mențină la un nivel mai ridicat decât în cazul zăcămintelor produse prin mecanismul gazelor dizolvate.

Cu cât este mai mare volumul cupolei de gaze, cu atât mai puțin va scădea presiunea de zăcământ [21] și [30].

Menținerea țigheului la presiune ridicată prezintă avantajele:

- gazele dizolvate sunt menținute în soluție;
- țigheul este mai puțin vâscos și se va deplasa mai ușor spre sondele de extracție;

- cupola de gaze în expansiune împinge țiteiul în josul structurii menținând debitele de producție la un nivel ridicat;
- rațiile gaze țitei se pot mări în sondele din apropierea contactului gaze – țitei.

Dacă sunt produse gazele din capul de gaze, iar volumul gazelor produse în această situație este mai mare decât volumul de gaze care ar fi intrat în zona saturată cu țitei, ca urmare a scăderii presiunii în timpul exploatarei, gazele din capul de gaze, nu vor pătrunde în zona de țitei, și deci nu va avea loc un mecanism de recuperare prin destinderea capului de gaze [31].

Mecanismul împingerii de apă.

Cea mai mare sursă de energie care există astăzi pentru producerea țiteiului este apa. Această sursă de energie este cantitatea de apă sărată care există în spațiul poros al rocii adiacentă zăcămintelor actuale de țitei. Acviferele cantonate în roci poros permeabile, trebuie considerate ca având o întindere foarte mare în comparație cu zona saturată cu țitei [31].

Pe măsură ce este produs țiteiul, presiunea scade în zona în care are loc exploatarea, apa pătrunde în zăcământ pentru a înlocui țiteiul, datorită expansiunii elastice a apei. Zăcămintele produse în acest fel sunt cunoscute ca: zăcăminte cu regim de împingere de apă. Rația gaze - țitei rămâne aproximativ constantă deoarece presiunea are o valoare ridicată mai mare decât presiunea de saturație, gazele rămânând dizolvate în țitei. Creșterea impurităților se face simțită întâi la sondele situate în vecinătatea contactului țitei apă [11], [21] și [30].

Mecanismul drenajului gravitațional

Reprezintă tendința (datorată forțelor de gravitație) gazelor, țiteiului și apei de a reveni la o distribuție în zăcământ conform cu densitățile lor, după ce zăcământul a fost exploatat [21] și [30]. La alte zăcăminte odată cu creșterea efectului drenajului gravitațional se poate obține o sensibilă creștere a recuperării țiteiului [31].

Regim combinat de exploatare adică acționarea a două sau mai multe mecanisme.

Rar se poate întâlni un zăcământ care să se potrivească exact mecanismului de dezlocuire. În situațiile cel mai des întâlnite se găsesc zăcăminte care lucrează în două mecanisme de dezlocuire și anume: împingere de apă și destinderea gazelor din cupolă, care pătrund în zăcământ și deslocuiesc țiteiul împingându-l către sondele de extracție.

Regimul gazelor dizolvate se consideră un regim de epuizare, aici are loc epuizarea energiei de zăcământ prin producerea gazelor ieșite din soluție, fenomen ce duce la scăderea presiunii de zăcământ. În cazul regimurilor de dezlocuire: împingerea gazelor din cupolă și împingerea apei, atât gazele cât și apa, ca fluide de dezlocuire, provin din afara zonei de țitei și pătrund în aceasta dezlocuind și împingând țiteiul către sondele de producție [31].

2.6 Dezlocuirea țiteiului

Atât pentru regimul gazelor dizolvate cât și pentru regimul expansiunii capului de gaze, în procesele de dezlocuire cu gaze, gazele tind să se deplaseze prin mijlocul canalelor porilor, deoarece gazele nu pot fi fază umectantă. Într-un sistem în care apa este fază umectantă, aceasta formează o interfață țitei – apă în formă de cupă care tinde să dezlocuiască tot țiteiul din canalele porilor. Practic,

umectabilitatea rocii influențează dezlocuirea țiteiului, în sensul că dacă roca este udată preferențial cu apă, dezlocuirea cu apă va fi mult mai eficientă decât cea cu gaze.

Variația porozității și forma canalelor porilor influențează dezlocuirea țiteiului.

Gazele tind să se deplaseze cu ușurință prin zonele cu porozitate mare datorită mobilității lor ridicate, deci dezlocuirea țiteiului prin mecanismele de acționare a gazelor conduce la un procent mic de recuperare al țiteiului. Pe măsură ce gazele înaintează în zăcământ, o parte din țitei tinde să rămână în zonele cu porozități mici

În regimurile de exploatare prin împingere cu apă, fenomenele de capilaritate permit apei să se deplaseze mai repede în zone cu porozități și permeabilități mai mici.

În partea inferioară a zăcământului spațiul poros este complet saturat cu apă, saturația în țitei urmând să crească odată cu creșterea distanței de la contactul țitei apă.

Dezlocuirea cu apă a țiteiului din gresii și nisipuri nu are loc sub forma unui piston așa cum se consideră în modelele teoretice ci se deplasează sub forma unui banc în zona căruia saturația în apă crește rapid începând cu frontul bancului unde există încă saturație în apă interstitială și continuând în jos până la un punct unde se va găsi o saturație în apă de până la 60-65%. Țiteiul fără apă continuă să fie produs până când bancul de apă ajunge în partea superioară a nisipului după care începe să se producă cu apă într-un procent care crește repede ajungând la 60-70%. Pe măsură ce se injectează tot mai multă apă, procentul de impurități crește iar saturația în țitei scade. Caracteristic acestor mecanisme: zona productivă trebuie să fie spălată de o mare cantitate de apă pentru a se obține o recuperare maximă.

Viteza de dezlocuire a țiteiului este definită ca fiind viteza de deplasare a interfeței dintre fluidul de dezlocuire și țitei adică viteza de deplasare a frontului de dezlocuire.

În general, cu cât viteza de dezlocuire este mai mică, cu atât va fi mai mare recuperarea. Țiteiul dintr-un strat subțire cu permeabilitate mică, poate fi dezlocuit cu ușurință de efectele forțelor capilare întrucât aceste forțe acționează pe o mică distanță pentru împingerea țiteiului în curenții de curgere din stratele cu permeabilități mari.

Pentru zăcămintele cu împingere de gaze din capul de gaze, când stratele au grosimi mari și înclinări mici, deschiderea stratului trebuie să se facă în partea inferioară pentru a da posibilitate capului de gaze să se destindă și să împingă țiteiul în jos pentru a putea obține o recuperare maximă și o producție mică de gaze [8].

Când statele au grosimi mici și înclinări mari, gabaritul sondelor de exploatare poate fi neregulat în partea de jos a structurii. Datorită înclinării mari a stratului, un gabarit regulat al sondelor de producție ar putea duce la deschiderea stratelor în apropierea contactului gaze țitei.

Pentru zăcămintele cu împingere de apă, când stratele au grosimi mari și înclinări mici, sondele se pot amplasa într-un gabarit regulat cu distanțe egale între ele. Intervalele în care se deschide stratul în sondele de producție, trebuie să fie în partea superioară a stratului pentru a putea produce o perioadă îndelungată fără procent mare de apă.

Când stratele au grosimi mici și înclinări mari, gabaritul sondelor de producție trebuie să fie neregulat, datorită caracteristicilor zăcământului. Amplasarea sondelor trebuie să se facă în partea superioară a structurii, pentru a se întârzia apariția apei în sondele de producție.

Pentru zăcămintele care produc în regim combinat, când stratele au grosimi mici, dacă se știe că împingerea de apă va predomina, amplasarea sondelor trebuie să se facă sus pe structură, pe de altă parte dacă se știe că acviferul activ este mic și aportul lui este slab, atunci o împingere de gaze din capul de gaze ar completa eficiența regimului mixt și atunci este necesar ca amplasarea gabaritului de producție să se facă jos pe structură.

2.7 Migrația cauzată de mecanismele de recuperare

Fluidele se deplasează în roca rezervor din zonele cu presiuni mari spre zonele cu presiuni mici atât timp cât aceste zone sunt în comunicație, deci migrația este funcție doar de presiunea diferențială. Cauzele migrației sunt:

- exploatarea insuficientă a unei zone productive cauzată de o punere în producție defectuoasă;
- lipsa unei participări la cota de producție a unei zone productive.

Astfel se va forma un gradient de presiune în roca rezervor care va avea ca rezultat migrarea țigăiului din zona cu o producție mai mică spre zona cu o producție mai mare.

Migrația poate fi cauzată și de mecanismele de recuperare prin care este produs un zăcământ. Într-un zăcământ cu împingere de gaze din capul de gaze, țigăiul este împins în jos pe structura datorită expandării capului de gaze, deci prin sondele săpate jos pe structură se va obține o producție mai mare de țigăi. În cazul zăcămintelor produse prin împingerea acviferului activ, sondele fiind săpate sus pe structură, țigăiul este împins în partea superioară a structurii. Dacă zăcămintele sunt produse în regim mixt cu cât se modifică debitele de producție cu atât este mai mare posibilitatea modificării eficienței mecanismelor de dezlocuire deci și posibilitatea schimbării migrației este mare. Dacă zăcămintele sunt alcătuite dintr-o succesiune de strate există posibilitatea ca stratele superioare să fie supuse unui mecanism de dezlocuire iar stratele inferioare altui mecanism de dezlocuire, deci migrația să se realizeze în sensuri diferite.

Avantajele menținerii presiunii de zăcământ constau în:

- împingerea gazelor și apei prin zona cu țigăi până în gaura de sondă,
- menținerea țigăiului cu gaze în soluție și deci cu o vâscozitate scăzută putând fi mai ușor împins spre sondele de extracție.

2.8 Recuperarea secundară

Exploatarea cu menținerea presiunii de zăcământ sub presiunea de saturație prin injecție de apă prezintă avantajul că în formațiunile productive, caracterizate prin strate și zone cu permeabilități foarte diferite, expansiunea gazelor ieșite din soluție poate asigura recuperarea unor cantități de țigăi și din zonele cu permeabilitate mai mică care ar putea rămâne complet neafectate de procesul de dezlocuire.

Pe de altă parte însă, în zăcămintele neuniforme stratificate există posibilitatea ca apa injectată să se canalizeze prin zonele cu permeabilitate mare unde s-a creat o saturație mai mare în gaze.

În procesul de dezlocuire a țuțeiului de către apă au loc inerente deformări ale contactului țuței apă, deformări ce sunt rezultatul neuniformității zăcământului pe orizontală și verticală și sunt numite canalizări ale apei, rezultând avansări preferențiale ale apei. Datorită unui strat cu permeabilitate foarte mare intercalat într-un pachet de nisipuri se poate produce scurt-circuitarea între sondele de injecție și cele de extracție, apa curgând practic numai prin acest strat.

Capitolul 3 Injecția de apă utilizând sonde orizontale

3.1 Recuperare secundară, Prezentare generală

La sfârșitul exploatării primare funcție de mecanismul de dezlocuire, cantitatea de țuței recuperată este mică, fiind necesare metode de creștere a factorului de recuperare.

Așa cum s-a arătat în capitolul anterior, eficiența recuperării secundare depinde de modul în care a fost produs zăcământul în exploatarea primară. Prin exploatare primară se înțelege acea fază a procesului de exploatare în care zăcământul se găsește în condiții energetice apropiate de cele ale momentului inițial. Pe de altă parte, reducerea presiunii de zăcământ sub cea de saturație a țuțeiului determină apariția, în mediul poros, a curgerii eterogene țuței-gaze. Când presiunea de zăcământ este mai mică decât presiunea de saturație, dar totuși are valori apropiate cu aceasta, prin procesul recuperării secundare, presiunea de zăcământ poate să ajungă la presiunea de saturație și deci să aibă loc fenomenul de reumplere, adică intrare a gazelor înapoi în soluție ajungându-se iar la curgerea monofazică [17]. De asemenea, prin injectarea agentului de dezlocuire se poate realiza menținerea presiunii de zăcământ la o valoare constantă sau se poate atenua panta căderii de presiune.

3.2 Proiectarea unui proces de injecție extraconturală a apei

Injecția extraconturală a apei se aplică în cazul zăcămintelor cu ape marginale

Pentru proiectarea unui proces de injecție [17] trebuie stabilite următoarele:

- amplasarea sondelor de injecție;
- determinarea necesarului de apă;
- determinarea receptivității sondelor de injecție;
- determinarea numărului sondelor de injecție;
- determinarea presiunii de injecție;
- alegerea pompelor de injecție.

În ce privește amplasarea, sonda orizontală de injecție se dispune paralel cu contactul țuței-apă și sub acesta. Deci, sondele de injecție trebuie amplasate în acvifer pentru a evita influența permeabilităților de fază și deci, pentru a avea o cât mai bună receptivitate.

Distanța de amplasare a galeriei de injecție față de conturul petrolifer, aceasta este condiționată de satisfacerea a două cerințe [17]:

- 1) deplasarea cât mai uniformă a frontului de dezlocuire;
- 2) o cât mai bună comunicare între drenele de injecție și șirul sondelor de extracție deci o eficiență sporită a injecției.

Modul de proiectare al unui proces de injecție este:

- se amplasează în mod arbitrar drena de injecție sau galeria de injecție (se alege X), cu condiția ca acesta să fie în afara conturului țigii apă pe acoperiș, dar nu prea departe de acesta;
- se impune $p_{str} > p_s$ (cu circa 2 - 5 bar);
- se estimează σ_{inj} și se calculează IR_{si} ;
- se calculează presiunea la pompe;
- se aleg din standarde, pompele cu presiunea nominală cât mai apropiată de cea rezultată prin calcul;
- se calculează presiunea la talpa sondelor de injecție sau în drenă;
- se determină pe cale grafică, debitul de pierderi, se dau valori lui t , se citește ϖ_{inj} și se calculează Q_p . Se reprezintă grafic $Q_p = f(t)$, de unde se citește Q_p ;
- se calculează debitul total de iniecție (Q_{ex} este impuls);
- se calculează, prin metoda aproximărilor succesive, numărul de sonde de injecție verticale, funcție de care se stabilește arbitrar lungimea drenei ;
- se determină $2\sigma_{inj}$ și se verifică dacă amplasarea șirului de injecție este corectă. Dacă condiția impusă de relația 3.1 nu este îndeplinită, se îndepărtează șirul de injecție de conturul petrolifer (se mărește X) și se reiau calculele, în ordinea prezentată mai sus.

3.3 Prevederea comportării în exploatare

Modelul Buckley - Leverett și Welge [17]

Leverett a prezentat conceptul de curgere fracțională pentru care s-a determinat fracția de apă în curentul de curgere [4], [17] și [18]:

$$f_a = \frac{1 + \frac{k}{u_t} * \frac{k_{rt}}{\mu_t} \left(\frac{\partial p_c}{\partial x} - g * \Delta \rho * \sin \alpha \right)}{1 + \frac{\mu_a}{\mu_t} * \frac{k_t}{k_a}} \quad (3.1)$$

K - permeabilitatea absolută a rocii;

K_{rt} - permeabilitatea relativă față de țigii;

K_t - permeabilitatea efectivă față de țigii;

K_a - permeabilitatea efectivă față de apă;

μ_t, μ_a - vâscozitatea dinamică a țigiiului, respectiv a apei;

u_t - viteza totală de curgere a fluidelor ($u_t = Q/A$);

$p_c = p_t - p_a$ este presiunea capilară, ca diferență între presiunea în faza țigii și presiunea în faza apă;

x - distanța în lungul direcției de mișcare;

$\Delta \rho = \rho_a - \rho_t$ - diferența dintre masa specifică a apei și a țigiiului;

α - unghiul de înclinare a stratului față de orizontală.

Gradientul de presiune capilară " ∂p_c " este neglijat întrucât se determină greu.

Fracția de apă este o funcție de saturația în apă întrucât k_{rt} și k_{ra} sunt la rândul lor funcții de saturația în apă. Dacă crește saturației în apă, k_{rt} scade în timp ce k_{ra} crește deci fracția în apă crește. Fracția de apă este raportul dintre debitul de apă și debitul total de curgere

Fracția de apă " f_a " depinde de vâscozitățile dinamice ale țiteiului respectiv ale apei.

Prevederea comportării în exploatare va avea două etape:

- până la pătrunderea frontului de apă în sondele de extracție,
- după ce frontul de apă a depășit șirul sondelor de extracție.

Algoritmul de calcul este următorul:

- se construiesc curbele $f_a=f(S_a)$ și $df_a/dS_a=f(S_a)$,
- din curba $f_a=f(S_a)$ se citește saturația în apă la front (S_{af}) iar din curba $df_a/dS_a=f(S_a)$ se citește valoarea pantei corespunzătoare,
- se calculează timpul de pătrundere al frontului de apă în galeria de extracție
- se calculează debitul de țitei funcție de fracția de apă:
- se calculează poziția frontului de dezlocuire la un anumit moment "t:"
- se determină timpul după care frontal de dezlocuire ajunge la distanța "X" față de drena de injecție:

În momentul pătrunderii frontului de dezlocuire în galeria de extracție, fracția de apă crește brusc la " f_{af} ", după aceasta continuă să crească însă mai lent până când devine egală cu unitatea.

După pătrunderea apei în galeria de extracție calculul de prevedere se face astfel:

- se dau valori lui $S_a > S_{af}$,
- se calculează saturația medie în apă între galeria de injecție și cea de extracție:
- se calculează cumulativul de țitei

$$\Delta N = SLh\phi(S_{Maf} - S_{ai})\frac{1}{b_t} \quad (3.2)$$

S_{Maf} - saturația medie în apă în spatele frontului de dezlocuire până la pătrunderea acesteia în galeria de extracție și poate fi determinată din figura 3.1 la limită când frontul de dezlocuire ajunge la șirul sondelor de reacție. iar b_t este factorul de volum al țiteiului

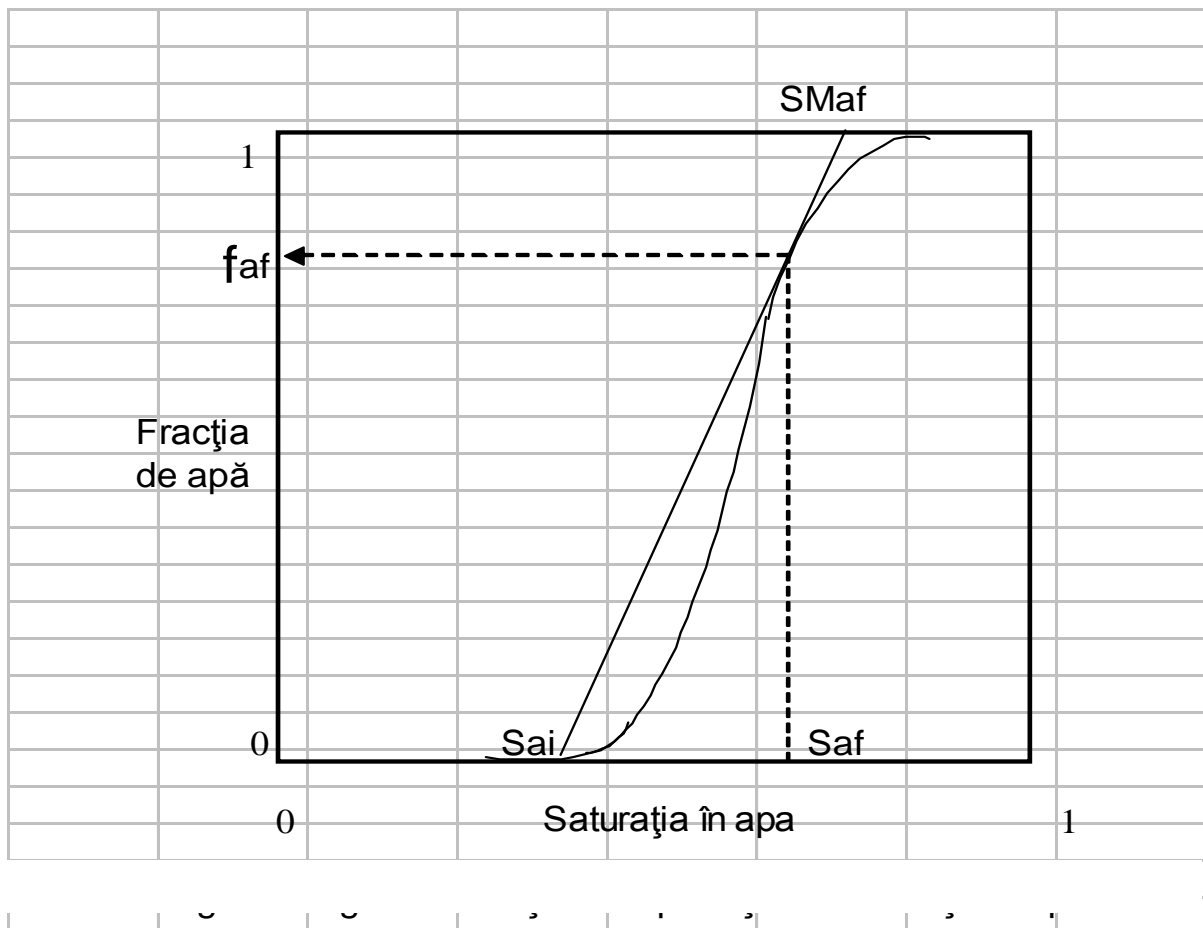


Figura 3.1 Graficul fracției de apă funcție de saturația în apă [18]

Dacă exploatarea are loc cu două galerii de extracție, trebuie ținut seamă de faptul că frontul de dezlocuire atinge cele două galerii la momente diferite. În această situație, prevederea cuprinde trei etape principale care vor fi prezentate în sumar mai jos.

- etapa 1 este cuprinsă între momentul începerii procesului de injecție și pătrunderea apei în primul șir de sonde de extracție.
- etapa 2 are durata cuprinsă între $t_{p1} < t < t_{p2}$ unde " t_{p2} " este timpul de pătrundere al apei în cel de al-II-lea șir de sonde de extracție.

Către șirul al-II-lea de sonde de extracție nu se deplasează toată apa injectată ci numai o parte din aceasta care trece de primul șir de sonde de extracție și este egală cu debitul de extracție pentru șirul 2 în exploatarea primară. În această etapă primul șir produce cu apă iar al-II-lea fără apă injectată.

- etapa 3 Ambele șiruri prduc cu fracții de apă diferite.

Modelul Borisov [17]

Acest model este valabil numai în cazul în care presiunea de zăcământ este superioara presiunii de saturație, iar colectorul este considerat omogen și uniform. Se consideră două galerii: de injecție formată dintr-o drenă de injecție și de extracție.

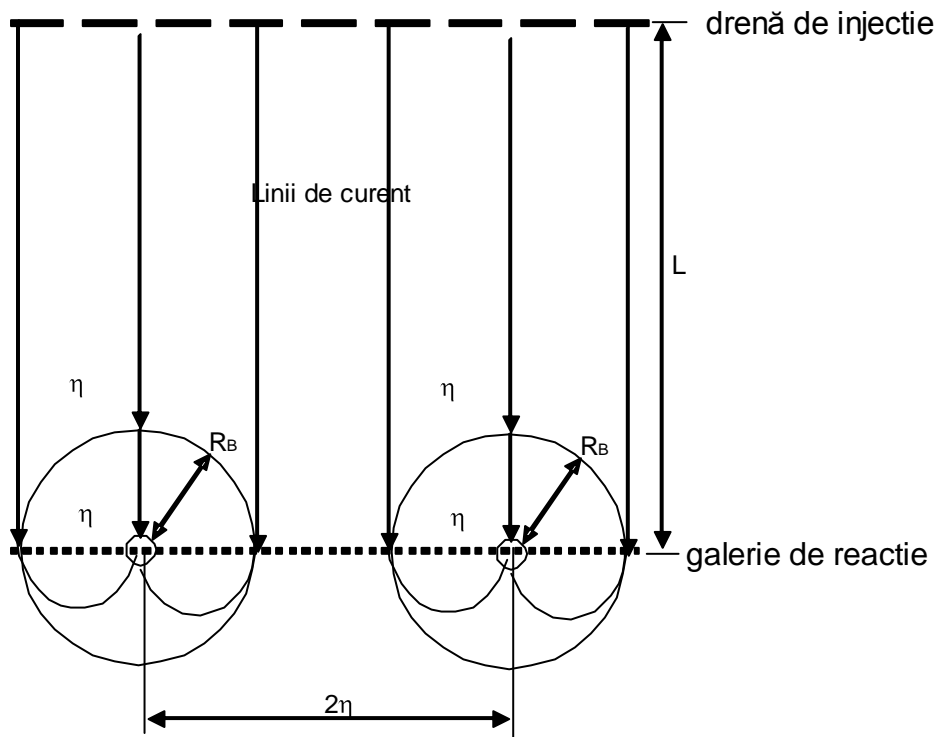


Figura 3.2 Schema modelului de dezlocuire Borisow [17]

Fluidul injectat se deplasează spre galeria de extracție, liniile de curent dintre cele două galerii fiind paralele, însă când aceste linii de curent intra în razele de influență a sondelor de reacție, aceste linii de curent converg spre sondele de reacție [17].

Mărimea razelor de influență a sondelor de reacție este funcție de distanța dintre aceste sonde în lungul galeriei de extracție. Practic raza de influență este egală cu jumătate din distanța dintre sondele de reacție.

În timpul deplasării fluidului de la galeria de injecție la cea de extracție apar rezistențe hidraulice suplimentare la curgere, care se impart în:

- rezistențe hidraulice suplimentare interioare, cele care apar în interiorul razelor de influență ale sondelor de reacție “ ω ”,
- rezistențe hidraulice suplimentare exterioare, care apar în afara razelor de influență ale sondelor de reacție “ Ω ”.

Între apa injectată și țigetei dezlocuit, apare un front de dezlocuire care separă colectorul situat între cele două galerii în mai multe zone:

- zona 1 situată între galeria de injecție și poziția inițială a contactului țigetei apă unde se află numai apă într-o curgere omogenă,
- zona 2 situată între poziția inițială a contactului țigetei apă și poziția frontului de dezlocuire la un moment dat “ t ” unde se află un amestec de țigetei și apă având o curgere eterogenă, deci dezlocuirea nu este de tip piston,
- zona 3 situată între poziția actuală a frontului de dezlocuire și galeria de reacție unde avem țigetei într-o curgere omogenă.

Modul de calcul al sistemului se realizează prin două variante:

- se introduc debitele de producție ale celor două galerii de reacție, cunoscându-se presiunea de injecție și se determină $P_{\text{ext } 1}$ și $p_{\text{ext } 2}$. În cazul în care $p_{\text{ext } 2}$ este mai mică decât presiunea de saturație se va folosi varianta a-II-a,
- se impune $p_{\text{ext } 2}$ mai mare decât presiunea de saturație, (având în vedere că modelul Borisov se folosește pentru zăcăminte la care presiunea de zăcământ nu a scăzut sub presiunea de saturație), se calculează căderea de presiune $P_{\text{ext } 1} - p_{\text{ext } 2}$, și se calculează debitele de extracție la cele două galerii de reacție.

Poziția pe care o ocupă frontul de dezlocuire la un moment dat “t” se determină printr-o ecuație de bilanț în care se introduce volumul de apă injectată ca fiind egală cu volumul de pori al colectorului din care a fost dezlocuit țiteiul.

3.4 Utilizarea sondelor orizontale

Sondele neconventionale sunt definite ca sonde nonclasice incluzând sonde adânci înclinate și sonde multilaterale. În comparație cu sondele verticale, sondele neconvenționale contactează o arie de drenaj mult mai largă și pot fi folosite ca sonde izolate, distribuția liniilor de curent de la o sondă orizontală de injecție este arătată în figurile 3.3 și 3.4.

În unele cazuri căderea de presiune în lungul secțiunii unei sonde orizontale generează un flux neuniform și o distribuție de potențial de-a lungul sondei [24].

Modelul în blocuri

Pentru evaluarea debitului și a căderii de presiune în lungul secțiunii unei sonde orizontale, figura 3.5, trebuie combinate curgerea fluidului prin mediul poros și curgerea fluidului prin conductă. Considerând zăcământul divizat de plane perpendiculare pe axa drenei în “n” blocuri de lungime “ ΔL_j ”, dacă se neglijează greutatea și forța capilară pentru fiecare element de bloc, distribuția potențialului “ q_j ” de-a lungul sondei este similar cu cel elaborat de Muskat [15] pentru injecția de apă într-un panou:

$$q_j = \frac{2k * \Delta L * \Delta p}{\mu_j B_j \left(\frac{\Delta Y}{H} - 1.17 + \frac{2}{\pi} \ln \frac{H}{r_w} + s \right)} \quad (3.3)$$

k – permeabilitatea efectivă a zăcământului,

H – grosimea formațiunii,

ΔY - lățimea zăcământului,

μ - vâscozitatea fluidului,

B – factorul de volum al formației,

s – factorul skin,

Δp - diferența dintre presiunea statică a blocului, “j” și presiunea dinamică a aceluiași bloc, “Pj” în gaura sondei, corespunzătoare blocului “j”

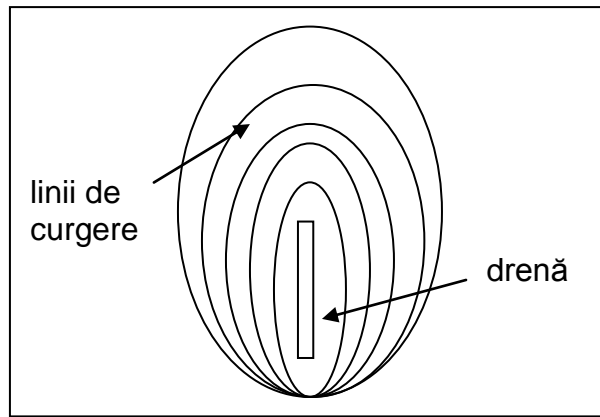


Figura 3.3 liniile de curgere de-a lungul unei sonde orizontale de lungime medie [15]

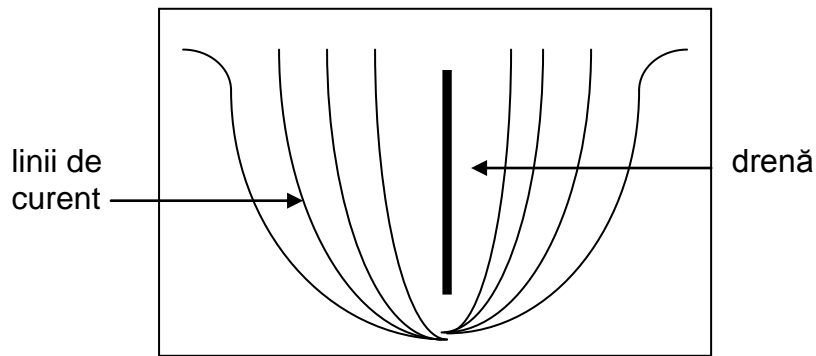


Figura 3.4 linii de curgere de-a lungul unei sonde orizontale de lungime mare [15]

Căderea de presiune este funcție de " F_{fj} " coeficientul de frecare al fluidului prin segmental de drenă aparținând blocului "j" iar coeficientul de frecare al fluidului prin drenă este dat de suma căderilor de presiune pentru fiecare segment de drenă al fiecărui bloc.

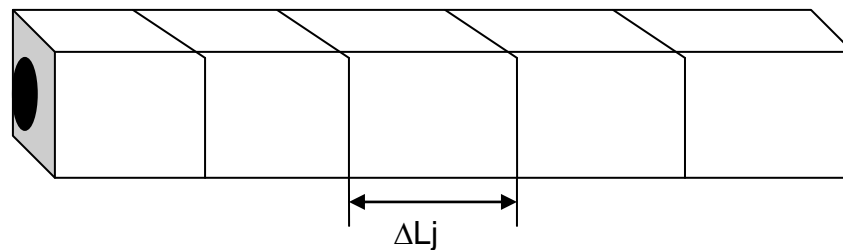


Figura 3.5 Împărțirea unui zăcământ traversat de o sondă orizontală in blocuri [15]

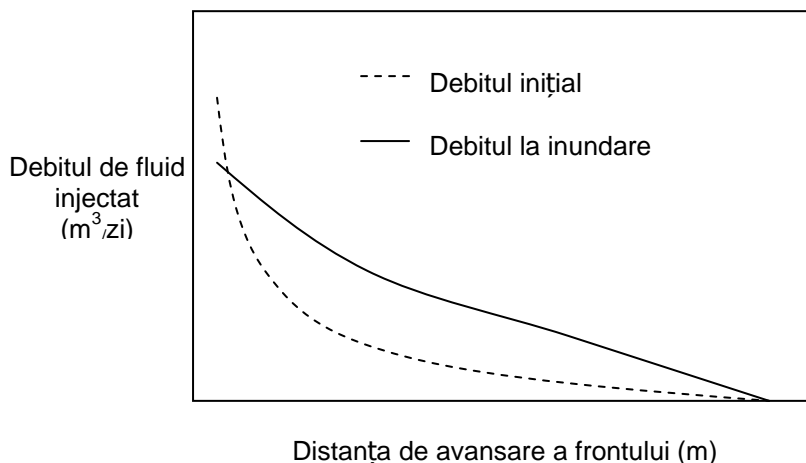


Figura 3.6 variația debitului cu distanța de avansare a frontului [17]

Coeficientul de frecare poate fi calculat pentru o curgere multifazică prin drenă [25].

3.5 Injecția de apă prin sonde orizontale

Procesele de injecție de apă prin sonde orizontale a fost introdus în 1992 ca o îmbunătățire a performanței injecției de apă.

Injecția de apă prin sonde orizontale arată că apa poate fi injectată la debite mult mai mari și presiuni mai mici în sonde orizontale decât în sonde verticale pentru o recuperare mai rapidă a țiteiului [10]. Pe de altă parte, injecția de apă prin sonde orizontale crește eficiența spălării orizontale și desigur factorul de recuperare [20], [22] și [27].

Au fost investigate două cazuri și anume:

1 Eficiența dezlocuirii orizontale a injecției de apă prin sonde de injecție orizontale:

- sonde orizontale de injecție și producție având două cazuri:
 - a) sonde orizontale de producție paralele cu sonde orizontale de injecție;
 - b) sonde orizontale de producție perpendiculare pe sonde orizontale de injecție.
- sonde orizontale de injecție și sonde verticale de producție
- sonde verticale de injecție și sonde orizontale de producție.

2) Eficiența dezlocuirii verticale a injecției de apă prin sonde orizontale.

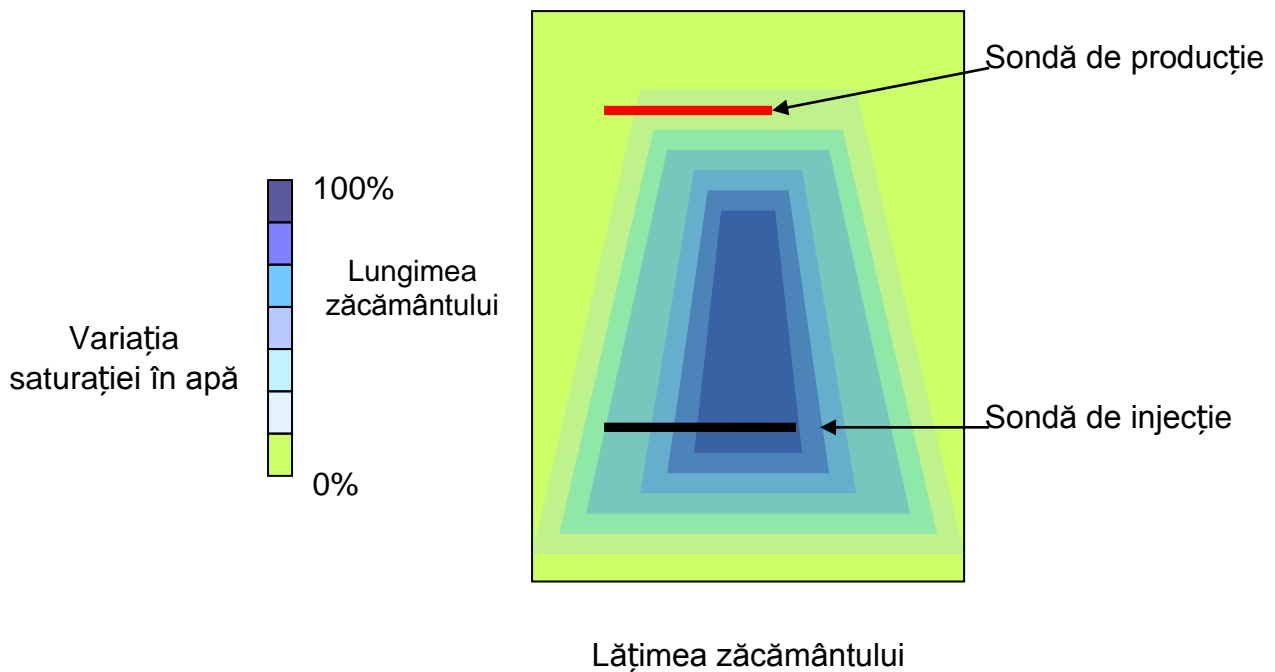
3.6 Creșterea eficienței spălării orizontale

Pentru a se realize o eficiență mărită a spălării, se pot folosi următoarele scheme de injecție:

Sonde orizontale de producție paralele cu sonde orizontale de injecție

Căderea de presiune la intrarea în drenă este mică față de căderea de presiune la șiful drenei pentru o sondă de producție, deci căderea de presiune în sondă la intrarea în drenă este mai mare față de căderea de presiune existentă în sondă la șiful drenei pentru o sondă orizontală de injecție figura 3.7.

Eficiența spălării între cele două sonde orizontale de injecție și de producție este ridicată datorită aceleiași tendințe a apei injectate să dezlocuie preferențial de la intrarea în drena de injecție spre intrarea în drena de producție după care apa spala segmentul de zăcământ cuprins între șiful sondei de injecție și cel al sondei de producție crescând aria de drenaj [22].



Figuar 3.7 Variația saturației în apă în zăcământ datorită procesului de injecție de apă [19]

La deplasarea fluidelor atât cel inecat cât și cel produs pot exista trei situații:

- fluidul inecat și cel produs se deplasează între cele două drene dar în direcții opuse, dar fluidul produs nu va ajunge la șitul sondei de injecție ci se va îndepărta de cele două șuri datorită fluxului slab de fluid inecat la șitul sondei de injecție,
- fluidul inecat și cel produs de deplasează între cele două drene paralele în aceeași direcție,
- fluidul inecat și cel produs de deplasează între cele două drene paralele în aceeași direcție dar în colțuri opuse crescând aria în care țiteiul este împins dinspre șitul sondei de injecție spre intrarea în drena de producție.

În funcție de geologia zăcământului și de istoricul procesului de injecție cele două drene se pot săpa în aceeași direcție sau din direcții opuse evitând astfel inundarea prematură a drenei de producție [28].

Principalele constatări ale eficiența injecției de apă prin sonde orizontale

Eficiența injecției de apă este puternic influențată de pierderea de presiune de-a lungul drenei dar și de geometria panoului. Un proces de injecție de apă utilizând sonde orizontale este conceput pentru cel puțin o sondă orizontală de injecție și una sau mai multe sonde adiacente orizontale paralele de producție.

Pentru un număr mare de simulări se pot enumera câteva observații:

- eficiența injecției de apă este puternic influențată de pierderea de presiune de-a lungul drenei,
- pierderea de presiune de-a lungul drenei este rezultatul distribuției neuniforme a aflului de fluid în lungul drenei,

- tendința apei este să curgă prin zăcământ de la intrarea în drena de injecție spre intrarea în drena de producție,
- drena de injecție și cea de producție pot fi săpate paralel din direcții opuse [19],
- panoul sondelor orizontale poate fi modelat perpendicular pe orientarea direcției de fracturare în procesele de injecție de apă,

Următoarele idei trebuie reținute:

- țiteiul poate migra după o perioadă de timp de ordinul anilor datorită gradientilor de presiune,
- drenele de injecție pot atinge debite mult mai mari decât în cazul sondelor verticale.

Sonde orizontale de injecție și verticale de producție

Pentru o sondă de injecție orizontală sunt necesare două sau chiar patru sonde de reacție verticale.

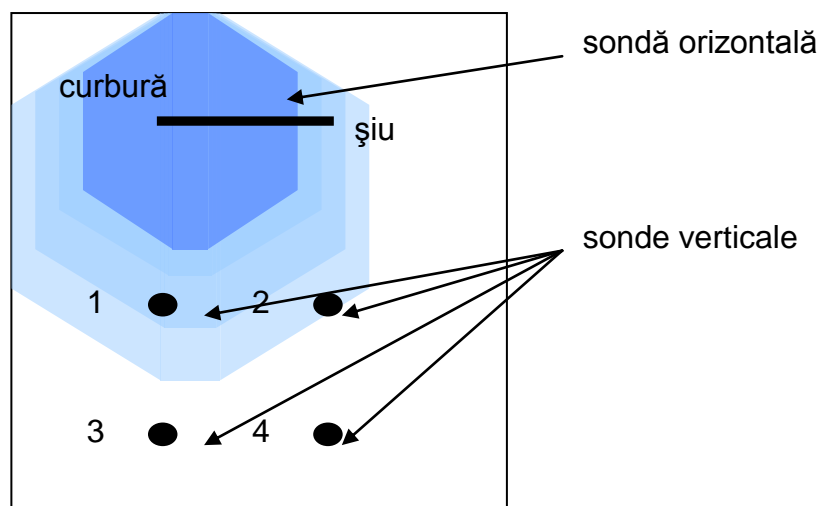


Figura 3.8 distribuția saturațiilor cu inundarea unei sonde de producție [19]

Cazul unei sonde orizontale de injecție și patru sonde verticale de producție.

Cele patru sonde verticale de producție sunt amplasate pe două rânduri

În figura 3.8 se arată că sonda 1 este inundată datorită avansării puternice a apei dinspre curbura sondei orizontale de injecție.

Ca în orice proces de injecție primul șir de sonde de producție se inundă firesc înaintea celui de al-II-lea șir însă așa cum s-a arătat frontul de apă avansează mai repede în dreptul curburii sondei de injecție și mai lent în dreptul șiolui. În figura 3.9 se arată că înaintarea frontului de dezlocuire se îndreaptă către cel de al-II-lea șir de sonde de producție, sondele din primul șir fiind închise deoarece sunt inundate.

Cazul unei sonde orizontale de injecție și două sonde verticale de producție.

Cele două sonde verticale formează un rând de sonde de producție perpendicular pe drena de injecție, în dreptul șiolui drenei.

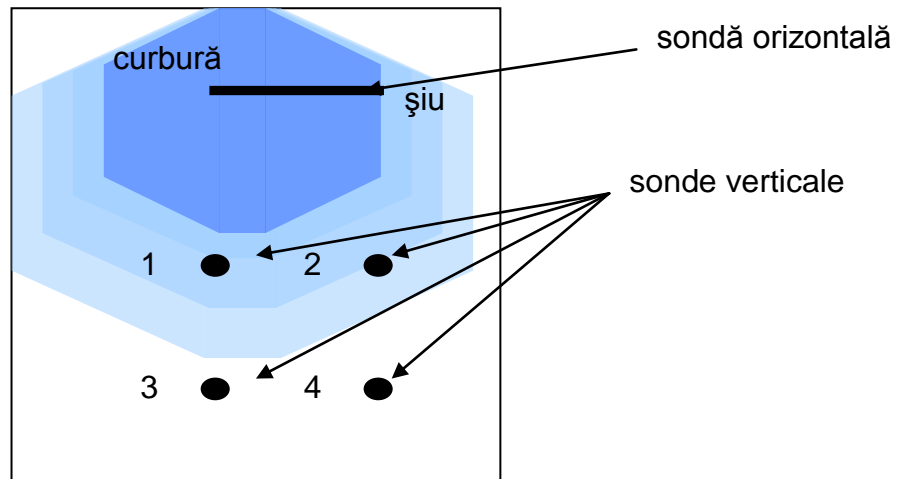


Figura 3.9 distribuția saturațiilor cu inundarea a două sonde de producție [19]

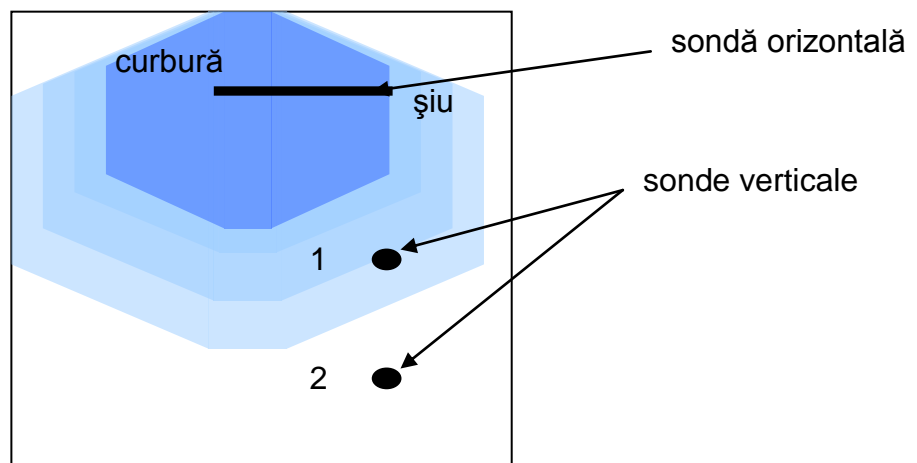


Figura 3.10 distribuția saturațiilor cu inundarea a două sonde de producție [19]

Întrucât apa injectată este canalizată de la curbura drenei de injecție către sondele verticale de producție, ideea este de a săpa un rând de sonde verticale perpendicular pe drenea de injecție în dreptul șifului drenei, pentru a îmbunătăți eficiența spălării pe o suprafață cât mai mare și de a mări timpul de exploatare al sondelor de producție, figura 3.10.

Cazul sondelor verticale de injecție și al unei sonde orizontale de producție.

În figura 3.11 este arătată distribuția saturațiilor utilizând două sonde verticale de injecție, la un moment dat al procesului. După interferența frontului de dezlocuire a apei de la cele două sonde verticale de injecție, procesul de injecție este identic cu cel rezultat la folosirea unei sonde orizontale de injecție. Se poate observa că funcție de caracteristicile zăcământului frontul de dezlocuire poate avansa mai mult de la o sonda verticală de injecție decât de la alta, existând posibilitatea ca sonda orizontală de producție să se inunde mai repede în dreptul curburii.

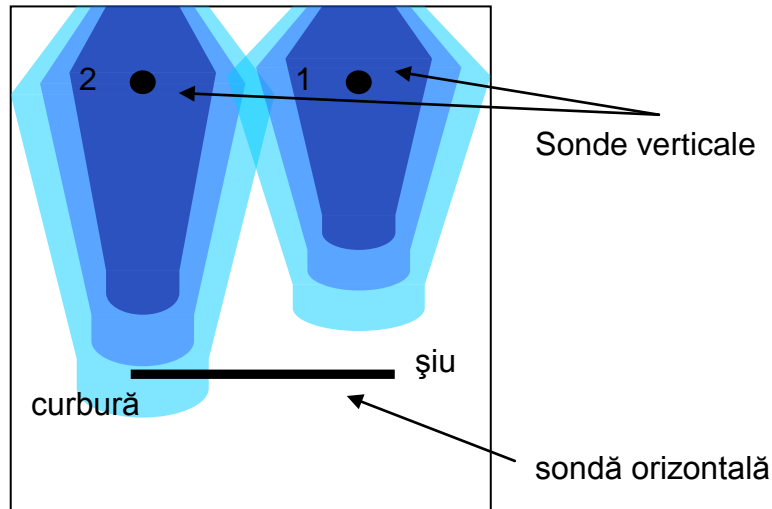


Figura 3.11 distribuția saturațiilor folosind două sonde de injecție verticale [19]

În general dacă sondele verticale de injecție generează un control mai bun al frontului de dezlocuire, sondele orizontale de injecție conferă o capacitate mai mare de injecție.

Sonde orizontale de producție perpendiculare pe sonde orizontale de injecție

Rândul sondelor verticale fiind situat în dreptul șiuului drenei de producție figura 3.12, s-a încercat înlocuirea celor două sonde verticale de injecție cu o sondă orizontală de injecție situată perpendicular pe sonda orizontală de producție, figura 3.12.

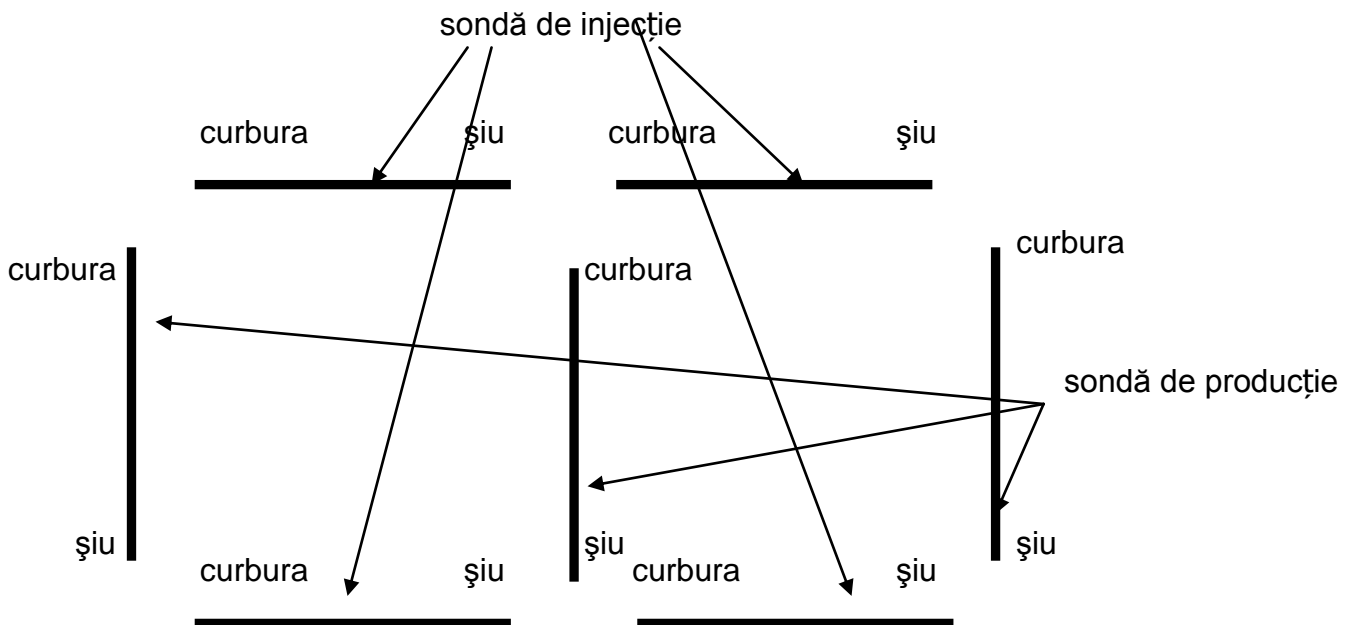


Figura 3.12 configurarea de tip “L” a unor drene de injecție, respectiv de producție [19]

Numită și configurație de tip “L” și se folosește pentru îmbunătățirea procesului de dezlocuire.

Se pot folosi atât sonde orizontale cât și sonde dual – laterale de injecție respectiv producție simulând tehnologia injecției de apă de la șiu la curbura. Se pot deosebi două tipuri de panouri și anume:

- dezlocuirea pe distanțe lungi a țiteiului,

- dezlocuirea pe distanțe scurte a țiteiului.

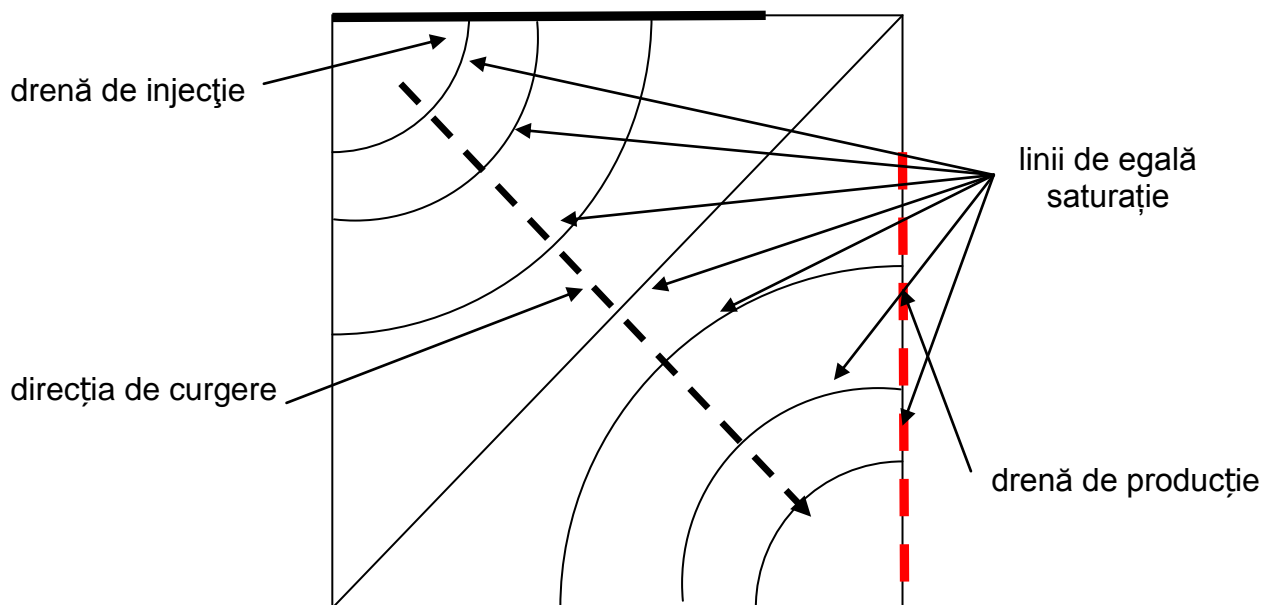


Figura 3.13 distribuția saturațiilor la un panou tip "L" cu drenă de injecție și producție de lungimi asemănătoare [19]

Panouri tip L cu sonde orizontale de injecție și producție de lungimi asemănătoare.

Sunt panourile formate din câte două drenă de injecție și a-II-a de producție, figura 3.13, aranjate să dezlocuie de la curbura sondei de injecție spre curbura sondei de producție, După începerea procesului de injecție, apa se deplasează în strat începând de la curbura sondei de injecție. Aceste drenă sunt săpate pe direcții perpendiculare cu șururile unul în apropierea celuilalt, pentru a se putea realiza o inundare totală a drenă de producție, pentru drenă foarte lungi, căderea de presiune strat-sondă la șiu poate fi egală cu zero.

O zonă sigură de lângă șiu poate fi neglijabilă la procesul de recuperare al țiteiului, adică debitul de țitei rezultat de la șiu sondei poate fi considerat zero pentru cazul teoretic al lungimilor finite ale drenă.

Panouri tip L cu sonde orizontale de injecție și producție de lungimi diferite.

Drenă de injecție au lungimi mai mici decât cele de producție.

În figura 3.14, sonda orizontală de injecție folosește intrarea sa în drenă pentru intrarea apei prin mediul poros, apa inundând prima oară șiu sondei de producție, urmând ca frontul să avanseze în lungul drenă de producție. Impuritățile nu pot crește rapid la 100%, existând doar o creștere lentă, fiind evident că frontul de dezlocuire al apei ocupă mai multe poziții de-a lungul drenă de producție, frontul de apă devenind perpendicular pe drenă de producție.

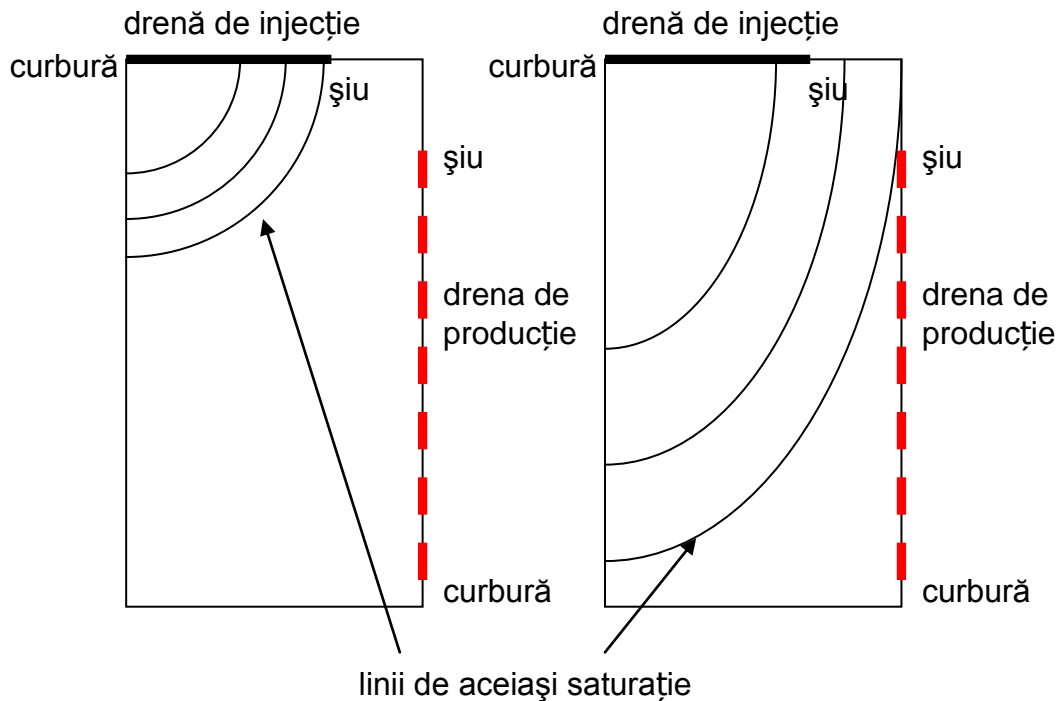


Figura 3.14 distribuția saturațiilor la un panou tip “L” cu drene de injecție și producție de lungimi diferite [19]

3.7 Beneficii ale proceselor de injecție de apă utilizând sonde orizontale de injecție

Procesele cu sonde orizontale de injecție și producție de lungimi diferite devin atractive în cazul în care reduc importanța rației mobilităților nefavorabile, punând în evidență efectele altor parametri cum ar fi curgerea gravitațională. O altă caracteristică importantă este atenuarea efectului heterogenității, efectul negativ al acestuia este atenuat în special de sonda orizontală acționând ca o linie de înaintare cu multe degete de avansare neregulată, datorate vâscozității, se vor dezvolta într-o măsură limitată ca linii de curent care nu urmăresc planele de stratificație, iar frontul de dezlocuire se deplasează ușor pe direcția naturală de propagare de la șiu la curbură.

Capitolul 4 Contribuții aduse explicării mecanismului de dezlocuire a injecției de apă prin sonde orizontale

4.1 Generalități

Dacă zăcămintul de hidrocarburi fluide are presiune mai mare decât presiunea de saturație, gazele nu au putut ieși din soluție, deci spațiul poros este saturat cu țitei și numai acesta curge. Gazele nu curg dar încetinesc curgerea țiteiului în prezența lor. Așa cum s-a arătat anterior, dacă presiunea de zăcămint scade sub presiunea de saturație dar este apropiată de aceasta, bulele de gaze ies din soluție, și se măresc până se stabilește o fază de gaze, deci vom avea curgere bifazică țitei și gaze. Saturația în gaze în momentul în care acestea încep să curgă, se numește saturație în gaze la echilibru care diferă de la un nisip la altul datorită formelor variate ale spațiului poros.

Permeabilitatea relativă se poate defini ca: viteza de curgere a unui fluid prin spațiul poros în prezența unui al-II-lea fluid, în comparație cu viteza de curgere care ar exista dacă am avea un singur

fluid. Permeabilitatea pentru țitei este zero când saturația în țitei este minimă și nu mai asigură curgerea.

Grosimea stratelor Orice zăcământ indiferent de forma și compoziția rocii rezervor are grosime variabilă pe toată extinderea sa. Diferențele de grosime pot fi semnificative și sunt funcție de mediile depoziționale sau de mișcările tectonice la care au fost supuse stratele în decursul erelor geologice. Pot varia atât grosimea totală cât și cea efectivă a stratelor, fiecare sondă care deschide un strat productiv interceptează stratele cu grosimi diferite decât alte sonde vecine. În momentul proiectării unui proces de injecție de apă, trebuie ținut cont că volumul de apă injectat printr-o sondă de injecție va fi diferit de volumul injectat prin altă sondă vecină [13].

4.2 Remedierea canalizării fluidelor de injecție în cazul aplicării proceselor de injecție de apă

Canalizarea se definește ca fiind: deformarea frontului de dezlocuire față de pozițiile sale în timp în cazul dezlocuirii fluidelor printr-un mediu poros. Practic, prevenirea canalizării apei injectate se poate face în cazul zăcămintelor macroneuniforme și a zăcămintelor stratificate (ale căror stratificații se păstrează pe toată suprafața zăcământului), pe orizontală.

În cazul în care există o diferență mare între proprietățile fizice ale rocii rezervor în cadrul zăcământului, ar trebui uniformizată permeabilitatea rocii rezervor, aceasta realizându-se prin acidizări sau fisurări, încercându-se evitarea creării unui sistem de fisuri pe lungimi mari atât pe verticală cât și pe orizontală pentru a se putea obține o uniformizare a frontului de injecție.

Reducerea și chiar blocarea canalizărilor se poate realiza cu agenți de obturare, agenți care trebuie să îndeplinească următoarele condiții:

- să fie stabili și să nu coaguleze în urma variațiilor de presiune,
- metoda trebuie să fie economică,
- materialul emulsionat trebuie să fie insolubil în țitei pentru a se putea obține obturări permanente,
- solidele utilizate trebuie să fie ușor solubile într-o soluție chimică astfel că la nevoie să se poată înlătura din zona productivă.

În decursul exploatărilor s-a folosit o rășină în emulsie de apă având 45% solide dispersate numita DRESINOL care a îndeplinit aceste condiții.

Canalizările se pot forma prin stratele cu permeabilități mare sau prin zone cu fisuri. Funcție de acestea, introducerea agentului de blocare se efectuează în moduri diferite:

a) în cazul canalizării apei de injecție prin stratele cu permeabilități mari, introducerea agentului de blocare se face prin contrapresiune tranzitorie. Dacă presiunea dintr-o sondă de injecție se reduce brusc, apa drenează înapoi în sondă, deoarece presiunea din imediata vecinătate a sondei de injecție este mai mare decât presiunea medie de injecție,

b) Canalizării apei de injecție prin stratele fisurate. În unele cazuri, canalizarea prin fisuri apare înainte de a injecta câteva sute de metri cubi de apă, în acest caz se poate compara teoretic zona canalizată ca o conductă prin care apa injectată circulă de la sonda de injecție la cea de reacție, spărgând frontul de apă și nu mai aduce nici o fracție de hidrocarburi. Materialele cu care s-au obținut

rezultate bune, sunt cele fibroase, folosite în noroaiele de foraj. Fibra amestecată în compoziție până la 1% din greutate cu un noroi bentonitic și amestecat cu apă dulce a fost folosit pentru blocarea fisurilor. Acest amestec a fost injectat în sondele de injecție prin care s-au constatat căi de canalizare prin fisuri, până când sonda nu a mai primit acest amestec nici măcar la presiuni mari, după care s-a spălat sonda cu apă.

Formarea conurilor în jurul găurii de sonda sau canalizările care apar datorită fisurilor sau zonelor cu permeabilitate ridicată determină o inundare prematură a sondelor de producție. Fenomenul este cu atât mai accentuat cu cât zăcământul prezintă un grad mai mare de heterogenitate. Are loc în acest caz o curgere preferențială a apei prin zonele de minimă rezistență și o ocolire a zonelor saturate cu țiței, care rămân neafectate de procesul de dezlocuire. Sistemele folosite în industria de petrol pentru blocarea căilor de mare permeabilitate și modificarea profilului de injectivitate sunt de mai multe feluri: geluri, rășini și sisteme microbiene.

O compoziție gelantă trebuie să îndeplinească concomitent următoarele condiții:

- să fie sub formă de soluție cu o vâscozitate care să-i permită să fie ușor pompabilă;
- să fie eficientă la concentrații relativ scăzute în polimeri;
- să fie stabilă la condițiile de presiune și temperatură de zăcământ;
- să gelifice într-un timp determinat și reglabil, pentru a permite amplasarea compoziției gelifiante în zona dorită;
- să fie compatibilă cu fluidele existente în zăcământ;
- să aibă stabilitate față de volume de fluide de dezlocuire injectate ulterior;
- să poată fi degradată chimic, pentru a se putea restabili permeabilitatea inițială a zonei, dacă situația o impune.

Gelurile sunt sisteme multicomponente, alcătuite din: polimer, agent de reticulare și moderatori (acceleratori sau întârziatori ai reacției de gelifiere).

Gradienții mari de presiune din porii mici acționează asupra țițeiului împingându-l afară prin centrul spațiului în timp ce apa este absorbită de-a lungul pereților granulelor, țițeiul fiind deplasat spre zone

Se amplasează un sistem chimic (a cărui bază este un polimer), care gelifică o zonă de permeabilitate mare. În cazul sondelor de injecție, gelul trebuie să reducă permeabilitatea zonei de interes la fluidele de dezlocuire, modificând în felul acesta profilul de curgere și deviind fluidele injectate ulterior pentru recuperarea țițeiului, către zonele nedrenate cu un conținut mai mare în țiței rezidual. Când există diferențe mari de permeabilitate pe verticală, fluidele tind să curgă prin regiunile cu cea mai mare permeabilitate, ocolind porțiunile de zăcământ cu permeabilitate mică.

Pentru îmbunătățirea inundării volumetrice este necesară reducerea permeabilității "zonei de scurtcircuitare" în regiunea din jurul găurii de sonda.

- Reducerea permeabilității unor porțiuni preselecțate din zăcământ se poate realiza cu ajutorul soluțiilor gelifiante de polimeri, respectiv prin formarea de geluri.

De obicei se folosesc sisteme de blocare de tip gel, format cu un polimer tip reticulat cu Crom.

Pentru a asigura pomparea întregului volum de sistem gelifiant în zăcământ, la primul dop injectat se adaugă un întârziator de reacție (de exemplu bicarbonat de sodiu) [7]. Înainte de injectarea propriuzisă se injectează un dop de sacrificiu cu o concentrație mai mică

La începutul injecției debitul este mai mare și scade pe măsura ce se injectează soluțiile cu vâscozitate mai mare. Presiunea medie de injecție variază în sens invers față de volumul injectat. Trebuie să se respecte principiul ca presiunea de injecție să fie mai mică decât presiunea de fisurare, în șantier presiunea de injecție a gelurilor este de 80% din presiunea de fisurare.

Determinarea variațiilor de facies care vor conduce la neuniformitatea frontului de injecție se poate realiza cu o valoare financiară mai mică pe baza investigațiilor geofizice din timpul forajului. Pe baza acestor date se poate concepe un program de blocare a zonelor de canalizare a apei de injecție nu numai pentru realizarea unui front de avansare cât mai uniform dar și pentru evitarea scurtcircuitării procesului de injecție folosind soluțiile gelante.

Datorită dificultăților tehnice ce pot apărea în timpul completării drenelor, acestea se echipează cu lăncere șlițuite fără a mai fi cimentate, însă este necesar ca aceste lăncerele să fie echipate cu pakere de teren, numărul și distanța dintre acestea urmând a fi stabilite pe baza rezultatelor investigațiilor geofizice pentru a putea delimita atât zonele cu porozități și permeabilități mari cât și cele cu porozități și permeabilități mici, astfel încât programele viitoare de blocare a canalizărilor sau de stimulare a altor zone să poată fi realizabile.

Căderea de presiune strat - sondă la intrarea în drenă este mai mare față de căderea de presiune strat - sondă existentă la șitul drenei pentru o sondă orizontală de injecție.

În cazul în care schema de injecție cuprinde sonde orizontale de injecție și producție, săpate paralel, eficiența spălării între cele două sonde este ridicată datorită tendinței apei injectate să dezlocuie preferențial de la intrarea în drenea de injecție spre intrarea în drenea de producție după care apa spală segmentul de zăcământ cuprins între șitul sondei de injecție și cel al sondei de producție crescând aria de drenaj.

4.3 Îmbunătățirea receptivității prin crearea de impulsuri de presiune

Cu cât permeabilitatea zonei alterate din imediata vecinătate a găurii de sondă va fi mai mică decât permeabilitatea zăcământului cu atât factorul skin va avea o valoare pozitivă mai mare. În cazul injectorilor orizontali debitele de injecție fiind mult mai mari în comparație cu cele din sondele verticale, fenomenul de blocare a spațiului poros se va realiza pe zone mult mai mari, deformările frontului de apă vor fi mult mai accentuate.

În momentul în care debitul de injecție scade accelerat iar presiunea crește, se va ajunge la un debit minim economic față de care procesul nu mai este rentabil. Astfel s-a pus problema creșterii debitului de injecție de apă prin impulsuri pentru a forța creșterea cumulativului de apă injectat [33] și [34]. Se creează impulsuri de presiune în perforaturi, undele create vor traversa mediul poros, dilatându-l, evident infinitesimal. Graficul presiunii va avea o creștere în momentul începerii impulsului de presiune, valoarea maximă va fi atinsă la momentul încetării impulsului după care presiunea va scădea, până în momentul inițierii unui alt puls de presiune.

Gradientul de presiune în zona cu permeabilitate mare, este mai mic decât în zona cu permeabilitate mică. Diferența de presiune sondă strat în timpul injecției în impulsuri, forțează apa injectată să patrundă în zăcământ pe o perioadă de timp mai mare decât în cazul injecției clasice de apă, contribuind la creșterea eficienței spălării.

Această metodă se consideră ca fiind necesar a fi introdusă într-un proces de injecție tehnologică de apă în momentul în care presiunea de injecție ajunge la o valoare relativ mare, deci debitul de apă injectat este apropiat de valoarea limită economică.

4.4 Studiu de caz

Pentru studiu de caz s-au folosit date de producție de pe zăcământul Sarmațian al structurii Alpha. Exploatarea zăcământului a început în urmă cu 33 de ani prin sondele P20, P40, P60, P70 și P80, tot în același an s-a început și procesul de injecție de apă tehnologică prin sondele W10, W30 și W40. Conform prevederii de producție, fără procesul de injecție prin sonda orizontală se vor mai extrage 71.1×10^3 tone țiței prin sondele de producție P 50, P110, P 120, P 100 bis și P 90 situate din panoul în care se dorește începerea unui proces de injecție de apă printr-o sondă orizontală. La momentul actual se injectează un debit total de $1592 \text{ m}^3/\text{zi}$ de apă tehnologică cu presiuni între 140 - 235 bar.

Având în vedere că în zona sondelor W 70 – W 90 nu s-a mai efectuat injecție de apă tehnologică de o lungă perioadă de timp, se consideră oportună săparea unei drene de injecție (**WH1**) în zona aceasta. Sonda orizontală se propune să fie săpată cu drenea în dreptul sondelor W70 – W 90, pe aceasta distanță va fi tubat un lyner șlițuit. Sondele de reacție vor fi în primul șir P 50, P110 și P 120, iar în sirul a-II-lea vor fi sondele P 100 bis și P 90, folosindu-se schema unui injector orizontal și a sondelor de reacție verticale situate paralel cu acestea, Injectorul va fi săpat cu curbura drenei în dreptul sondei P 50 și cu șitul spre sonda P 120, știind că frontul de apă avansează mai repede în dreptul curburii sondei de injecție și mai lent în dreptul șitului și având în vedere că sonda P 50 are impurități mari se propune inundarea în prima fază a acestei sonde.

Modelul Buckley-Leverett și Welge

S-a construit graficul variației saturației în apă funcție de fracția de apă.

După ridicarea acestui grafic, dreapta ridicată din punctual $f_a=0$ pentru atingerea punctului de tangentă, întalnesc curba la $S_a=1$, raportul mobilităților $\mu_p/\mu_a < 1$, ($\mu_p/\mu_a=0.8$) indica o dezlocuire de tip piston, $S_{af} = S_{am} = 1 - S_{tr}$. În această situație producția de petrol la inundare este practic egală cu întreaga cantitate de petrol mobil.

Se propune efectuarea unui proces de injecție de apă tehnologică suplimentar prin drenea de injecție ce urmează a fi săpată după cum s-a specificat anterior, cu un debit de injecție zilnic de $600 \text{ m}^3/\text{zi}$, urmând a fi produs un cumulativ de 1051.5 mii tone de țiței în 9 ani, plus de producție față de situația actuală 980.4 mii tone țiței

Cumulativele de producție pentru fiecare șir de sinde de injecție sunt:

$$N_1 = 741.52 \cdot 10^3 \text{ tone țiței,}$$

$$N_2 = 309.98 \cdot 10^3 \text{ tone țiței.}$$

Prin comparație, folosind un proces de injecție de apă prin sonde verticale (care ar cuprinde trei sonde cum ar fi: resăparea sondelor W90 și W70, dar și săparea unei sonde noi de injecție A, situată la jumătatea distanței dintre capetele linerului șlițuit al injectorului orizontal), prin care se vor injecta $360\text{m}^3/\text{zi}$ apă adică câte $120\text{m}^3/\text{zi}/\text{sondă}$, se poate extrage același cumulativ de țiței în 14 ani. Având în vedere că sondele de injecție W70 și W90 sunt accidentate tehnic, iar coloanele de exploatare sunt cimentate în spate până la 300m, se pot considera cele două sonde W70 și W90 ca și sonde noi întrucât trebuie să se resăpare de la această adâncime (300m). Sidetrack-urile se vor iniția de la 300m și vor urmări deviațiile găurilor principale. Deci vor fi trei sonde noi verticale de injecție.

Necesarul de apă injectată este $5,283,148\text{ m}^3$,

Consumul de agent de lucru este 5 tone apă / tonă țiței.

Modelul Borisov este valabil în cazul în care presiunea de zăcământ este mai mare decât presiunea de saturație. Având în vedere ca presiunea actuală de zăcământ este de 250 at, iar presiunea de saturație este de 242at, se poate folosi modelul Borisov, model care ia în calcul cota de țiței deplasabilă, cota de țiței deplasabilă este de 67%, adică 704.4mii tone țiței, plus de producție față de situația actuală 633.3mii tone se vor extrage în 7 ani, aceasta cu condiția menținerii presiunii de zăcământ la o valoare superioară presiunii de saturație.

Prin comparație, folosind un proces de injecție de apă prin sonde verticale (care ar cuprinde 3 sonde cum ar fi: resăparea sondelor W90 și W70, dar și săparea unei sonde noi de injecție A, situată la jumătatea distanței dintre capetele linerului șlițuit al injectorului orizontal) prin care se vor injecta $360\text{m}^3/\text{zi}$ apă adică câte $120\text{m}^3/\text{zi}/\text{sondă}$, se poate extrage același cumulativ de țiței în 11 ani.

Necesarul de apă injectată = $3,522,135\text{ m}^3$,

Consumul de agent de lucru este 5 tone apă / tonă țiței.

S-au determinat presiunile la cele două galerii de extracție: $p_{\text{ext } 1} = p_{\text{ext } 2} = 265\text{at}$.

Cumulativele de producție pentru fiecare șir de sonde de injecție sunt:

$N_1 = 496.74 * 10^3$ tone țiței,

$N_2 = 207.66 * 10^3$ tone țiței.

Întrucât modelul Borisov consideră ca volumul de țiței extras este egal volumul de pori din care s-a dezlocuit țițeiul și știindu-se debitul de injecție al drenei de $600\text{m}^3/\text{zi}$ s-au determinat ca extragerea rezervei de 704.4mii tone țiței se va extrage utilizând modelul cu o sondă orizontală de injecție și două șiruri de sonde de extracție verticale în 7 ani.

Știut fiind că în zona sondelor W 70 – W 90 nu s-a mai efectuat injecție de apă tehnologică de o lungă perioadă de timp, se consideră oportună săparea unei drene de injecție în zona aceasta. Sondele de reacție vor fi sondele în primul șir P 50, P110 și P 120, iar în șirul a-II-lea vor fi sondele P 100 bis și P 90, folosindu-se schema unui injector orizontal și a sondelor de reacție verticale situate paralel cu acestea.

Injectorul va fi săpat cu curbura drenei în dreptul sondei P 50 și cu șitul spre sonda P 120, știind că frontul de apă avansează mai repede în dreptul curburii sondei de injecție și mai lent în dreptul șitului și având în vedere ca sonda P 50 are impurități mari se propune inundarea în prima fază a acestei sonde

Capitolul 5 Contribuții și concluzii

Având în vedere că roca colector nu este omogenă și nici izotropă, trebuie luată în calcul deformarea frontului de dezlocuire ca urmare a variației porozității și permeabilității stratelor în care se inițiază aceste procese. Deci frontul de dezlocuire va suferi deformări, așa cum s-a arătat în capitolul 3. În baza acestor dificultăți se propune o schemă tehnică menită să ajute la efectuarea operațiilor tehnice necesare uniformizării frontului de dezlocuire.

Folosind această schemă se pot aduce contribuții mecanismului de dezlocuire a injecției de apă prin sonde orizontale :

1 Remedierea canalizării fluidelor de injecție în procesele de injecție de apă: fie că este vorba de :

a) canalizării apei de injecție prin strate cu permeabilități mari care în cazul sondelor verticale se realizează prin introducerea agentului de blocare cu ajutorul fenomenului de contrapresiune tranzitorie.

b) canalizarea apei de injecție prin strate fisurate. În unele cazuri, canalizarea prin fisuri apare înainte de a injecta câteva sute de metri cubi de apă, în acest caz se poate compara teoretic zona canalizată ca o conductă prin care apa injectată circulă de la sonda de injecție la cea de reacție, spărgând frontul de apă și nu mai aduce nici o fracție de hidrocarburi.

Aceste dificultăți se pot corecta prin blocarea canalizărilor cu substanțe gelante, însă având în vedere că într-o drenă materialul gelant nu se poate introduce în strat prin fenomenul de contrapresiune tranzitorie întrucât stratele deschise sunt la același nivel izobatic și sunt situate unul în imediata vecinătate celuilalt, cu ajutorul schemei tehnice propuse se pot injecta sistemurile gelante numai în stratele susceptibile a fi creat canalizări ale apei de injecție.

2 Utilizarea modelelor de calcul :

a) Borisov prin folosirea unei drene de injecție în locul galeriei de injecție în puncte, având în vedere că drenea de injecție distribuie liniile de curent pe toată lungimea ei și nu în anumite puncte atunci când se folosesc sonde de injecție verticale, evident cu condiția de bază ca presiunea de zăcământ să fie mai mare decât presiunea de saturație.

b) Modelul Buckley-Leverett și Welge folosindu-se conceptul curgerii fracționare, fracția de apă fiind o funcție de saturația în apă rezultă că permeabilitățile relative pentru faza țitei și pentru faza apă sunt la rândul lor funcții de saturația în apă. În studiul de caz cu ajutorul acestui model s-a determinat extragerea a $1,051.5 \cdot 10^3$ tone țitei în decursul a nouă ani de producție.

3 Îmbunătățirea receptivității prin crearea de impulsurii de presiune, mediul poros fiind heterogen, datorită variațiilor proprietăților fizice, apa injectată nu va avansa uniform în cadrul zăcământului ci în funcție de proprietățile rocii rezervor vor rezulta avansări preferențiale ale apei injectate. Prin crearea impulsurilor de presiune se realizează o îmbunătățire a capacității de curgere în vecinătate a găurii de sondă..

Concluzii

Injectia de apă prin sonde orizontale crește eficiența spălării orizontale și desigur factorul de recuperare.

Eficiențele de dezlocuire sunt:

- 1) Eficiența dezlocuirii orizontale a injectiei de apă prin sonde de injectie orizontale:
- 2) Eficiența dezlocuirii verticale a injectiei de apă prin sonde orizontale, aici trebuie reținut:

Ca în orice proces de injectie primul șir de sonde de producție se inundă firesc înaintea celui de al-II-lea șir însă așa cum s-a arătat frontul de apă avansează mai repede în dreptul curburii sondei de injectie și mai lent în dreptul șifului.

Dacă se folosesc o sondă orizontală de injectie și doua sonde verticale de reacție, deoarece apa injectată este canalizată de la curbura drenei de injectie către sondele verticale de producție, ideea este de a săpa un rând de sonde verticale perpendicular pe drena sondei de injectie în dreptul șifului drenei, pentru a îmbunătăți eficiența spălării pe o suprafață cât mai mare.

În cazul folosirii a două sonde verticale de injectie și a unei sonde orizontale de reacție, funcție de caracteristicile zăcământului frontul de dezlocuire poate avansa mai mult de la o sonda verticală de injectie decât de la alta, existând posibilitatea ca sonda orizontală de producție să se inunde mai repede în dreptul curburii.

Dacă se folosesc panouri tip L cu drene de injectie perpendiculare pe drene de producție, acestea:

- nu necesită perioade mari de așteptare de la începerea proceselor de injectie,
- reduc efectului heterogenității,
- frontul de dezlocuire se deplasează ușor pe direcția naturală ,

În studiul de caz, în cadrul zăcământului Sarmațian de pe structura Alpha se propune continuarea procesului de injectie de apă cu un injector orizontal și două șiruri de sonde de reacție verticale. Sonda se propune să fie săpată cu drena în dreptul sondelor W70 – W90, pe aceasta distanță va fi tubat un lyner șlițuit.

Sondele de reacție vor fi sondele în primul șir P 50, P 110 și P 120, iar în sirul a-II-lea vor fi sondele P 100 bis și P 90, folosindu-se schema unui injector orizontal și a sondelor de reacție verticale situate paralel cu acestea. Injectorul va fi săpat cu intrarea în drenă în dreptul sondei P 50 și cu șiful spre sonda P 120, știind că frontul de apă avansează mai repede în dreptul curburii sondei de injectie și mai lent în dreptul șifului și având în vedere ca sonda P 50 are impurități mari se propune inundarea în prima fază a acestei sonde.

Debitul de injectie zilnic al drenei va fi de $600\text{m}^3/\text{zi}$, urmând a fi produs un cumulativ de 1051.5mii tone țiței, plus de producție față de situația actuală 980.4mii tone țiței, în 9 ani. prin această drenă de injectie, conform modelului Buckley – Leverett și Welge, adică se alege varianta optimistă.

BIBLIOGRAFIE

- 1 Baker R. - *Reservoir management for waterfloods*,
- 2 Cârcoană A. - *Applied enhanced oil recovery*, 1992 by Prentice – Hall Inc,
- 3 Călărașu C. – *Skin factor effects in horizontal wells*, Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No. 2/2016,
- 4 Crețu I: *Hidraulica zăcămintelor de hidrocarburi*, Editura Tehnică 1987,
- 5 Goran N. și Ionescu G. F. - *Creșterea recuperării petrolului*, Editura Universității din Ploiești 2003,
- 6 Dake L. P.: *Fundamentals of reservoir engineering*, The Hague, October 1977,
- 7 Drumeanu M. - *Uniformizarea profilului de injectivitate în scopul măririi eficienței spălării*, Teza de doctorat, Universitatea Bucuresti, 2001,
- 8 El-Khatib N. - *The effect of crossflow on waterflooding of stratified reservoirs*, SPE 126344-PA-P,
- 9 Green D. W. și Willhite G. P. – *Enhanced oil recovery*, 1998 Richardson Texas,
- 10 Hayes A. L. - *Horizontal wells*, November 2003,
- 11 International Journal of Engineering & Technology IJET-IJENS Vol 11 No: 01: *Water Coning in horizontal wells: Prediction of post-breakthrough performanc*, Makinde F. A.,
- 12 Joshi D. S. - *Horizontal well technology*, copiright 1991 by Pennwell Publishing Company,
- 13 Mălureanu I. - *Geofizică de sondă, vol.1*, Editura Universității Petrol-Gaze din Ploiești, 2007,
- 14 Minescu F. - *Fizica zăcămintelor de hidrocarburi, vol.2*, Ed. Univ. Ploiești, 2004,
- 15 Muskat M. - *The physical principle oil production*, New York, 1949,
- 16 Niculescu I. și Pușcoiu N. - *Exploatarea secundară a zăcămintelor de țiței*, Editura Tehnică 1972,
- 17 Nistor I.: *Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi fluide*, Ed. Univ. Ploiești, 1998, dar și articolul *Zăcămintele de hidrocarburi*,
- 18 Petroleum & Coal: *Buckley-Leverett displacement theory for waterflooding performance in stratified reservoirs*, Prince A. Owusu, June 25, 2014,
- 19 Popa C. Constantinescu F. și Marcu G. - *Sweep efficiency in a waterflooding pattern processed by horizontal wells*, 9th European Symposium on Improved Oil Recovery, The Hague – The Netherlands 20-22 October 1997,
- 20 Popa C. și Turtă T. A. - *Waterflooding by horizontal injectors and producers*”, SPE 78989,

- 21 Craft B. C., Hawkins M. F. - *Applied Petroleum Reservoir Engineering (Second Edition)*. New Jersey, ISBN0-13-039884-5:Prentice Hall PTR, 1991,
- 22 Robinowitz S. Dwight D. și June Schmeling: *Enhanced oil recovery by horizontal waterflooding*, 2006 Grand Resources Inc,
- 23 Sădeanu E. I. - *Aplicarea și urmărirea proceselor de creștere a factorului de recuperare a petrolului din zăcăminte*, Editura Didactică și Pedagogică București 1991,
- 24 SPE 37138: *Formation damage and horizontal wells*, D. Brant Bennion, copyright 1996,
- 25 SPE AAPG ID89989: *Analysis and synthesis of horizontal wells in Hassi R'Mel Oil Rim, Algeria*, Recham R și Nennouche Z, AAPG International Conference: October 24-27, 2004; Cancun, Mexico,
- 26 Sangeetha M. Pasala: *CO2 displacement mechanisms: phase equilibria effects and carbon dioxide sequestration studies*, The University of Utah December 2010,
- 27 SPE 89373 Westermark R.V., Dauben D. și Robinowitz S. "Enhanced oil recovery with horizontal waterflooding,
- 28 Taber J.J. Serghat R.H. *Horizontal injection and production wells for EOR or waterflooding*, SPE 23952,
- 29 Tarek A. - *Principles of waterflooding*, Copyright Elsevier Inc. 2006,
- 30 Tarek A. - *Reservoir engineering handbook, second edition*, Copyright © 2001 by Butterworth - Heinemann,
- 31 Vernescu A. - *Mecanica zăcămintelor petrolifere*, Editura Tehnică 1966,
- 32 Willhite G. P. - *Waterflooding*, Third printing, SPE, Richardson TX 1986,
- 33 Wong W. S. – Pulsed water injection during waterflooding, SPE 84856,
- 34 Zschuppe R. P. - *Pulse Flow Enhancement in Two-Phase Media*,
- 35 <http://www.egypetroileum.com/2015/04/reservoir-drive-mechanism.html>,
- 36 Paul Glover - *Formation Evaluation MSc Course Notes, chapter 3*,
- 37 Francesca Verga - *Oil Field characteristics and relevant studies*, Copyright © 2003, by Istituto della Enciclopedia Italiana fondata da Giovanni Treccani,
- 38 Shepherd M. - *Factors Influencing Recovery from Oil and Gas Fields* copyright 2009 by The American Association of Petroleum Geologists,
- 39 Jahn F. Cook M. Graham M. - *Hydrocarbon Exploration and Production 2nd edition*, <https://books.google.ro/books?id=ocUT8hEDu1AC&pg=PA210&lpg=PA210&dq=drive+mechanism+in+oil+reservoirs&source=bl&ots=XPgSCYJ-mF&sig=XIEdDeOoGTnsp6ydZ63Aiwjq45A&hl=ro&sa=X&ved=0ahUKEwj17uHQtfDOAhVI0xoKHfFgAC44HhDoAQgZMAA#v=onepage&q=drive%20mechanism%20in%20oil%20reservoirs&f=false>,

- 40 Welge H. I. - *A simplified Method for Computing Oil Recovery by Gas or Water Drive*, Trans. AIME vol. 159, 1952,
- 41 Loyd R. Kern - *Dysplacement Mechanism in Multi Well Sistem*, Trans. AIME vol. 195 1952
- 42 Dykstra H., Parsons, R. L. - *The Prediction of Oil Reovery by Water Flood*, Second Recovery of Oil in the United States, 2-d Edition, N.Y. 1960;
- 43 Codreanu D., Ioachimciuc R. - *Dezlocuirea țiteiului de către apă în sisteme stratificate continuu (după apariția apei)*, Petrol și Gaze, nr.4/1968 1979,
- 44 Craig F. F., Geffen T. M., Morse, R. A. - *Recovery Performance of Pattern Gas or Water Injection Operations from Model Tests*, Trans. AIME vol. 204, 1955,
- 45 Popa C. Gh. - *Aplicarea metodelor moderne de soluționare a problemelor de inginerie de zăcământ*, Contract 211, I.P.G.G., București, 1971,
- 46 Higgins R. V., Leighton A. J. - *A Computer Method to Calculate Two-Phase Flow in Any Irregularly Bounded Porous Medium*, J.P.T.,
- 47 Higgins R. V., Boley D. W., Leighton A. J. - *Aids to Forecasting the Performance of Waterfloods* J.P.T., 1964
- 48 Wasson A. J., Schridder A. Lee - *Predicting Waterflood Performance for Five Spot Patterns in Stabilitied Reservoirs*, J.P.T.,
- 49 Popa C., Gh., - *"Dezlocuirea amestecului țitei-gaze de către apă într-un strat uniform"*, Petrol și gaze, nr.3/ 1971,
- 50 Vernescu Al., - *"Contribuții în problema perfecționării metodelor de prevedere a evoluției în exploatarea zăcămintelor petrolifere cu împingere completă de apă"*, Teză de doctorat., București, 1971,
- 51 Pârcălăbescu I., D. - *Proiectarea exploatării zăcămintelor de hidrocarburi*, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1983,
- 52 Chiran P., Codreanu D., Hauer R., Giuclea V., Cristea N. - *Noutăți asupra comportării zăcămintelor și principii generale de exploatare*, Curs de perfecționarea inginerilor din industria petrolului, vol. 1, ASIT - Ploiești, 1961,
- 53 Soare Al., Bratu C., - *Cercetarea hidrodinamică a zăcămintelor de hidrocarburi*, Editura Tehnică, București, 1987,
- 54 Crichlow H. B. – *Modern Reservoir Engineering - a Simulation Approach*, Pretince Hall, 1977,
- 55 Aziz K., Settari A. - *Petroleun Reservoir Simulation*, Applied Science Publishers Ltd, London, 1979,

- 56 Beca C., Prodan D. - ,*Geologia zacamintelor de petrol si gaze si geologie de santier*
Editura Didactica si pedagogica, Bucuresti 1983,
- 57 Soare Al., Pârcălăbescu I., Popa, C. Gh. -,*Ingineria zacamintelor de hidrocarburi*, vol. 2,
Editura Tehnică, București 1981,
- 58 Tompang R., Kelkar B. G. - *Prediction of Waterflooding Performance in Stratified Reservoir*,
SPE 17289 presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference,
Midland, Texas, March, 1988
- 59 Ionescu M. E.- *Curs de Metode IOR EOR*, note de curs-MIZ, An I,
- 60 Hashimoto H., Kawamura K., Sueyoshi M. (2013). *Numerical Simulation Method for Damaged Ships under Flooding Condition*, Proceedings of the 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes, OMAE, CD-ROM.
Hashimoto H., Le Touzé D., Grenier N., Sueyoshi M. (2014),
- 61 Noaman A. F., El-Khatib N. A. - *The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir*, SPE 68076, presented at the 2001 SPE Middle East Oil Show held in Bahreain, 17-20 March 2001,
- 62 Dake L. P. - *Fundamentals of Reservoir Engineering*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York City, 1978;
- 63 Kleppe, J., - "*Buckley – Leverett Analysis*", TPG150, Reservoir Recovery Techniques, 2012,
- 64 Ahmed G., Castanier L. M., Brigham W. E. - *An Experimental Study of Waterflooding from a Two- Dimensional Layered Sand Model*, SPERE, feb.1988,
- 65 Beliveau D. - *Waterflooding Viscous Oil Reservoir* , SPE Reservoir Evaluation &Engineering, October 2009,
- 66 El-Khatib N. A. -"*The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir with Log-Normal Permeability Distribution*, SPERE, dec. 1999,
- 67 El-Khatib N. A.- *The Application of Buckley – Leverett Displacement to Waterflooding in Non –Communication Stratified Reservoir*, SPE 68076, presented at the 2001 SPE Middle East Oil Show held in Bahreain, 17-20 March 2001,
- 68 Kumer M., Hoang V., Satik C., Rojas D.H. - *High –Mobility- Ratio Water Flood Performance Prediction : Challenges and New Insights*, SPE Res Eval &Eng (1):, SPE – 97671. (2): 10.2118/97671-PA, 2008,
- 69 Lake L. W. - *Enhanced Oil Recovery*, SPE ATCE. Training Courses. Florence, Italy: Society of Petroleum Engineers, September 23, 2010,
- 70 Lake L. W. - *Enhanced Oil Recovery*, Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989,

- 71 Romero-Zeron L. - *Introduction to Enhanced Oil Recovery (EOR) Processes and Bioremediation of Oil-Contaminated Sites*, © The Author(s). ISBN 978-953-51-0629-6, Published: May 23, 2012 under CC BY 3.0 license. © The Author(s),
- 72 Satter A., Iqbal G. M., Buchwalter J. L. - *Practical Enhanced Reservoir Engineering: Assisted with Simulated Software*, Penn Well Corporation, Tulsa, Oklahoma, 2007,
- 73 Satter A., Iqbal G., Buchwalter J. - *Practical Enhanced Reservoir Engineering*. Tulsa, Oklahoma: PennWell 2008,
- 74 Badea A.-M., Călărașu C.- *Training and prevention possibilities of water coning* – Buletinul Universității Petrol-Gaze din Ploiești Technical Series, No. 2/2016..