

CERCETĂRI PRIVIND OPTIMIZAREA EXPLOATĂRII ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI PRIN METODE TERMICE

Rezumat

Doctorand Ing.Constantin Rădulescu

Volumul mare al resurselor mondiale de țiței greu și vâscos și de bitumene, care depășesc de peste două ori rezervele de țițeiuri convenționale, cât și valoarea redusă a factorului de recuperare obținut prin exploatarea primară a acestor rezerve, au condus la extinderea și perfecționarea metodelor termice de exploatare a zăcămintelor de țiței. Dintre acestea, injecția de apă caldă este cel mai ușor de aplicat și din această cauză s-a mărit considerabil numărul de zăcăminte unde se aplică, obținându-se eficiență mărită nu numai pentru țițeiuri grele.

Prezenta teză de doctorat are ca obiective cunoașterea cât mai exactă a numeroase aspecte privind injecția de apă rece și/sau caldă, cu aplicabilitate teoretică și practică, precum și evidențierea unor idei și soluții noi de îmbunătățire a proiectării, urmăririi și dirijării unui proces de injecție cu apă rece și/sau caldă.

Pentru realizarea acestor obiective lucrarea a fost structurată în 5 capitole incluzând introducerea, bibliografia cu 82 de referințe și concluziile cu contribuțiile personale. Lucrarea are 169 de pagini și conține 57 figuri, 20 tabele și 9 anexe.

Capitolul 1 prezintă locul metodelor termice de recuperare în cadrul metodelor EOR și evoluția aplicării acestora.

Capitolul 2 trece în revistă modalitățile de evaluare a principalelor proprietăți termofizice ale zăcămintelor de hidrocarburi. De asemenea se prezintă mecanismele și factorii de influență pentru difuzivitatea termică și dispersia termică evidențiind diferențele dintre aceste noțiuni.

Capitolul 3 prezintă o viziune a fenomenelor ce se petrec la dezlocuirea țițeiului de către apă la nivel microscopic și macroscopic în condiții izoterme și neizoterme. Se prezintă soluția avansului frontal, Buckley și Leverett, și soluția tuburilor de curent atât în cazul dezlocuirii izoterme cât și în cazul dezlocuirii neizoterme.

Capitolul 4 prezintă cercetările teoretice și eperimentale efectuate de autor. Astfel, se propune o metodă nouă de determinare a difuzivității termice prin investigații termodinamice în sondă și se prezintă testele și rezultatele obținute pe zăcământul Levantin Moreni.

În cazul dezlocuirii izoterme se propune o metodă nouă simplificată, concretizată într-un model și simulator, pentru predicția parametrilor de producție pentru un proces de injecție de apă ce se desfășoară în condiții izoterme. Rezultatele reieșite prin aplicarea softului la zăcământul Șotânga Me UH1 au fost comparate cu datele de producție realizate în primii 12 ani de aplicare a

procesului de injecție de apă, obținându-se o corelare bună. Acest model servește la predicția eficienței recuperării țițeiului, analiza și optimizarea procesului de injecție de apă.

În cazul dezlocuirii neizoterme se propune un model nou pentru managementul injecției de apă caldă, utilizând sonde orizontale, elaborând o nouă metodă de proiectare a unui proces de injecție de apă caldă și un soft de aplicație în Excel și Matlab pentru proiectare și alegerea soluției optime care să asigure eficiența economică maximă. Modelul exprimă matematic fenomenele ce se petrec, în condițiile unor asumări simplificatoare care nu induc erori semnificative, în zăcământ pe toată durata procesului. Acesta poate fi operat în mod obișnuit fără a fi necesar un simulator comercial. La baza modelului propus stă teoria avansului frontal Buckley-Leverett, metoda Welge, metoda de calcul a recuperării prin injecția de apă caldă a lui Fournier și determinarea distribuției de temperatură pentru un fluid aflat în mișcare cu soluția analitică a ecuației diferențiale Fourier-Kirchoff, aplicate într-un algoritm unitar în sistem nodal, parametrii de ieșire al unei părți devin parametrii de intrare în următoarea parte, pentru 4 zone de saturație în apă și 3 domenii de temperatură ce se formează în timpul unui proces de recuperare termică în zăcământ, care algoritm se concretizează în softul de aplicație elaborat. Softul de aplicație realizat pentru injecția de apă caldă, este un program Matlab cuplat cu un program Excel și o interfață unde se efectuează inițializarea cu parametrii zăcământului și ai apei de injecție rezultând, ca date de ieșire, parametrii de producție ai procesului.

Pe baza acestui model s-a analizat influența parametrilor principali ai zăcământului și procesului de injecție apă caldă asupra debitului de țiței, respectiv asupra performanțelor acestuia.

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

1. Analiza difuzivității și dispersiei termice ca fenomene și mecanisme de transfer termic evidențiind parametrii hidrodinamici și termici ai curgerii fluidelor calde prin medii poroase care influențează aceste mecanisme. Este prezentată o sinteză a ultimelor cercetări privind metodele și modelele experimentale de evaluare a difuzivității termice, care au dus la deducerea unor relații semiempirice sau a unor simulatoare de laborator, care să fie aplicate la procesele reale din zăcământ;
2. Perfecționarea metodei de determinare a difuzivității termice prin investigații direct în sondă concepând și realizând o instalație de măsurare și înregistrare a temperaturii din sondă cu posibilitatea transmiterii la distanță a datelor înregistrate;
3. Aplicarea în practică a metodei și utilizarea instalației de măsurare și înregistrare a temperaturii în sonde pentru efectuarea unor teste termodinamice la sonde din zăcământul Levantin Moreni cu metodologia de lucru perfecționată, pentru determinarea difuzivității termice a zonei din jurul găurii de sondă prin cercetare

termodinamică, similară cercetării hidrodinamice a sondelor, prin interpretarea matematică a curbelor de variație a temperaturii;

4. Determinarea, pe baza valorilor difuzivității termice rezultate din cercetarea termodinamică, zonelor cu transmisivitate termică mai mare sau mai mică ce pot fi folosite la configurarea rețelei de sonde și valorile debitelor de injecție și extracție, pe zăcămânul Levantin Moreni, în cazul unui proces termic de recuperare ce se preconizează. De asemenea se pot soluționa problemele ivite în procesul de recuperare termică privind dirijarea propagării frontului termic, zone de înmagazinare termică mărită, zone cu transfer termic micșorat, transferul termic vertical și comunicarea straturilor, ș.a.;
5. Autorul a conceput un algoritm de calcul concretizat într-un soft de aplicație, model și simulator, pentru determinarea performanțelor procesului de injecție cu apă “rece” într-un proces de dezlocuire izotermă, folosind soluția avansului frontal Buckley-Leverett a ecuațiilor diferențiale de conservare a masei pentru apă și țiței. Rezultatele reieșite prin aplicarea softului la zăcămâtul Șotânga Me UH1 au fost comparate cu datele de producție realizate în primii 12 ani de aplicare a procesului de injecție de apă, obținându-se o corelare bună. Acest model servește la predicția eficienței recuperării țițeiului, analiza și optimizarea procesului de injecție de apă;
6. Se prezintă sintetic rolul și modul utilizării sondelor orizontale în scopul creșterii eficienței metodelor termice de recuperare a țițeiului în contextul celor mai noi tehnologii de aplicare în exemple de realizare pe plan mondial;
7. Pentru managementul procesului injecției de apă caldă prin sonde orizontale, când în zăcământ are loc o curgere liniară imiscibilă neizotermă, se deduce „ecuația temperaturii” prin rezolvarea sistemului de ecuații diferențiale compus din ecuațiile de conservare a masei și ecuația energiei. Se prezintă ultimele soluții date acestei ecuații, soluția analitică (2008) și soluția tuburilor de curent (2011);
8. Autorul elaborează un model și simulator pentru pentru determinarea performanțelor procesului de injecție cu apă caldă într-un proces de dezlocuire neizoterm, bazat pe teoria avansului frontal Buckley-Leverett, metoda Welge, metoda de calcul a recuperării prin injecția de apă caldă a lui Fournier și determinarea distribuției de temperatură pentru un fluid aflat în mișcare cu soluția analitică a ecuației diferențiale Fourier-Kirchoff, aplicate într-un algoritm unitar în sistem nodal;

9. Autorul analizează prin prizma modelului propus singurul proces de injecție cu apă caldă din România pe zăcămintul Șotânga UH2, identificând cauzele insușesului acestui proces și îmbunătățirile necesare;
10. Cele două modele elaborate de autor pentru procesele de injecție apă rece și injecție de apă caldă pot fi utilizate pentru predicția eficienței recuperării țiteiului, analiza și optimizarea acestor procese iar în stadiul proiectării, alegerea metodei termice de recuperare optimă în raport cu criteriul de optimizare ales.

CUPRINS

INTRODUCERE	3
1. METODE TERMICE DE RECUPERARE A ȚIȚEIULUI DIN ZĂCĂMINTE	5
1.1. EVOLUȚIA APLICĂRII METODELOR TERMICE DE RECUPERARE	5
1.2. METODE ȘI EXEMPLE DE REALIZARE A RECUPERĂRII PRIN PROCESE TERMICE.....	7
1.3. MODELE ȘI METODE PREDICTIVE DE RECUPERARE A ȚIȚEIULUI PRIN PROCESE TERMICE	13
2. PROPRIETĂȚILE TERMOFIZICE ALE ZĂCĂMINTELE DE ȚIȚEI	17
2.1. PROPRIETĂȚI ALE GAZELOR	17
2.1.1. Densitatea	17
2.1.2. Vâscozitatea	18
2.1.3. Compresibilitatea	19
2.1.4. Capacitatea calorică volumetrică	19
2.1.5. Conductivitatea termică	20
2.1.6. Puterea calorică.....	22
2.2. PROPRIETĂȚI ALE ȚIȚEIULUI.....	22
2.2.1. Densitatea.....	22
2.2.2. Rația de soluție.....	23
2.2.3. Coeficientul de volum.....	23
2.2.4. Vâscozitatea ȚiȚeiului.....	23
2.2.5. Căldura specifică.....	25
2.2.6. Conductivitatea termică.....	25
2.3. PROPRIETĂȚI ALE MEDIULUI SOLID POROS PERMEABIL.....	25
2.3.1. Porozitatea.....	25
2.3.2. Permeabilitatea.....	27
2.3.3. Compresibilitatea.....	28
2.3.4. Saturația în fluide.....	28
2.3.5. Capacitatea calorică masică, volumică, molară.....	29
2.3.6. Conductivitatea termică.....	35
2.4. DIFUZIVITATEA TERMICĂ A ZĂCĂMINTELE DE ȚIȚEI.....	48
2.4.1. Difuzivitatea termică, dispersia termică.....	48
2.4.2. Metode pentru determinarea difuzivității termice.....	49
3. INECȚIA DE APĂ CALDĂ ÎN ZĂCĂMINTELE DE ȚIȚEI	52
3.1. EFICIENȚĂ MICROSCOPICĂ A DEZLOCUIRII NEMISCIBILE IZOTERME.....	52
3.1.1. Umectabilitatea.....	52
3.1.2. Presiunea capilară.....	53
3.1.3. Distribuția saturațiilor în fluide.....	53
3.1.4. Permeabilitățile relative.....	54
3.1.5. Rata mobilității.....	55
3.2. EFICIENȚĂ MACROSCOPICĂ A DEZLOCUIRII NEMISCIBILE IZOTERME.....	56
3.2.1. Relații matematice privind dezlocuiri nemiscibile izoterme în cadrul sistemelor apă/ȚiȚei.....	56
3.2.2. Soluția avansului frontal Buckley-Leverett izoterm.....	58
3.2.3. Soluția tuburilor de curent izoterme.....	64
3.2.4. Rezultate și discuții.....	72
3.3. EFICIENȚĂ MACROSCOPICĂ A DEZLOCUIRII NEMISCIBILE NEIZOTERME.....	77
3.3.1. Soluția avansului frontal Buckley-Leverett neizoterm.....	79
3.3.2. Soluția tuburilor de curent neizoterme.....	88

4. CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE	93
4.1. DETERMINAREA DIFUZIVITĂȚII TERMICE PRIN INVESTIGAȚII TERMODINAMICE ÎN SONDĂ.....	93
4.1.1. Date despre zăcământ pentru Levantin-Moreni.....	99
4.1.2. Descrierea experimentului.....	101
4.1.3. Rezultate și concluzii.....	104
4.2. MODEL ȘI SIMULATOR PENTRU UN PROCES IZOTERM CU INECȚIE DE APĂ.....	107
4.3. UTILIZAREA SONDELOR ORIZONTALE ÎN CAZUL PROCESELOR TERMICE DE EXPLOATARE A ZĂCĂMINTELOR DE ȚIȚEI	119
4.3.1. Aplicații ale sondelor orizontale în procesele termice de recuperare.....	122
4.3.2. Injecția de apă caldă prin sonde orizontale.....	126
4.3.3. Model și simulator pentru un proces neizoterm cu inecție de apă caldă prin sonde orizontale.....	130
4.4. CERCETĂRI ASUPRA UNUI PROCES DE INECȚIE CU APĂ CALDĂ DIN ROMANIA.....	150
4.4.1. Date despre zăcământ.....	150
4.4.2. Desfășurarea procesului.....	151
4.4.3. Observații și concluzii.....	153
5. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	156
OPIS CU FIGURILE UTILIZATE	162
BIBLIOGRAFIE	164
LISTA DE ANEXE	169

RESEARCH ON OPTIMIZATION OF THE EXPLOITATION OIL RESERVOIRS BY THERMAL METHODS

Abstract

Eng.Constantin Rădulescu

The large volume of global resources and viscous heavy oil and bitumen, exceeding more than doubled reserves of conventional crude oils, as well as the low recovery factor obtained by primary exploitation of these reserves, led to the expansion and improvement of thermal methods exploitation of oil deposits. Of these, the injection of hot water is the easiest to implement and therefore increased significantly the number of fields where applicable, resulting in an increased efficiency not only for heavy crude oils.

This PhD thesis aims accurate knowledge of many aspects of the injection of cold water and / or hot, with theoretical and practical application, and highlights some new ideas and solutions to improve the design, monitoring and directing the injection process of cold water and / or hot.

To achieve these objectives the work was divided into 5 chapters including introduction, bibliography with 82 references and the conclusions with personal contributions. The paper has 169 pages and contains 57 figures, 20 tables and 9 annexes

Chapter 1 presents the thermal recovery methods in EOR methods and their application development.

Chapter 2 reviews the modalities of the main thermo-physical properties of hydrocarbon deposits. Also the mechanisms and the influencing factors for the thermal diffusion and thermal dispersion are presented, highlighting the differences between these concepts.

Chapter 3 presents a vision of the phenomena that occurs in oil displacement by water at a microscopic and macroscopic level in isothermal and non-isothermal conditions. The Buckley and Leverett front advance solution and tube current solution are being presented, both for isothermal and non-isothermal displacement.

Chapter 4 presents the theoretical and experimental researches made by the author. Thus, we are proposing a new method for determining the thermal diffusivity by thermodynamic investigations into the well and the tests and the results obtained on the Levantine Moreni deposit.

In the case of isothermal displacement a new method is proposed, a simplified form of a simulation model for predicting production parameters for water injection process that takes place in isothermal conditions arising through the software application. The results from Sotanga Me UH1 oilfield were compared with the production data taken in the first 12 years of water injection process, yielding good correlation. This model is used to predict the efficiency of oil recovery, analysis and optimization of water injection;

In what concerns the non-isothermal displacement a new model is presented for the management of hot water injection using horizontal wells, developing a new method for designing a steam injection process and a software application in Excel and Matlab for projection and to ensure the optimal solution for maximum economic efficiency. The model expresses mathematically the phenomena that occur in terms of simplifying assumptions that do not induce significant errors in the reservoir throughout the process. It can be operated normally without the need for a commercial simulator. The proposed model is based on the Buckley-Leverett frontal advance theory, Welge method, Fourmieri's method of calculating the recovery by steam injection and the determination of temperature distribution for a fluid moving with the analytical solution of Fourier-Kirchoff's differential equation applied in a unitary algorithm nodal system, where the output

parameters of one part become the input parameters in the next part, for 4 parts water saturation and 3 temperature ranges that are formed during thermal recovery process where that algorithm materializes in the developed application software. Software application designed for hot water injection is a program coupled with a Matlab program and Excel interface place where the deposit initialization parameters and the injecting water resulting in exit data represented by the production parameters of the process.

Based on this model it was analyzed the influence of the principal parameters of the deposit and hot water injection process on oil flow and his performances.

1. The main contributions of the author of this work are the following summaries:

The analysis of thermal diffusivity and dispersion phenomena and mechanisms of heat transfer pointing out the thermal stressing hydrodynamic parameters of hot fluid flow through porous media that influence these mechanisms. It also presents an overview of recent research on experimental methods and models to assess the thermal diffusivity, which resulted in the deduction of semi-empirical relations or laboratory simulators ready to be applied to real processes of deposit;

2. Improving the method for determining the thermal diffusivity through direct investigation in conceiving and realizing a plan probe for measuring and recording temperature from the oil well with the probability of remote data transmission of the registered dat;

3. Practical application of the method and system using measuring and recording temperature probes for performing thermodynamic tests to probe the Levantine Moreni deposit. Working with improved methodology for determining the thermal diffusivity of the area around the drill hole through thermodynamic research, similar to the hydrodynamic research of wells and interpreting the mathematical curves of temperature variation;

4. Determination based on the values of thermal diffusivity from thermodynamic research, areas with higher thermal transmission or less that can be used to configure network probes and injection and extraction flow values on Levantine Moreni oilfield in the case of a thermal recovery process which is being expected. You can also solve problems arising in the process of conducting heat recovery heat front propagation, increased heat storage areas, areas with reduced heat transfer, heat transfer and communication vertical layers, etc.;

5. The author has developed a computer algorithm resulted in a software application simulation model to determine the performance of the "cold" water injection process in an isothermal displacement process using Buckley-Leverett frontal advance solution of differential equations of conservation mass of water and oil. The results arising from the application software on Sotanga Me UH1 oilfield were compared with the output data in the first 12 years of the water injection process, yielding a good correlation. This model is used to predict the efficiency of oil recovery, analysis and optimization of water injection;

6. It summarizes the role and how to use horizontal wells to increase the efficiency of thermal oil recovery methods in the context of implementing the latest technologies in the world embodiments;

7. For the steam injection process management through horizontal wells when in the reservoir occurs an immiscible non-isothermal linear flow deduced by "temperature equation" and solving the system of differential equations which consists in the equations of conservation of mass and energy equation. It presents the latest data solutions to this equation: the analytical solution (2008) and the tube current solution (2011);

8. The author developed a simulation model to determine the performance for the hot- water injection process in a process of non-isothermal displacement based on Buckley-Leverett's frontal advance theory, Welge method, the calculation method of recovery by steam injection and Fournier's determination of the temperature

distribution for a fluid moving with analytical solution of Fourier-Kirchhoff's differential equation, applied in a single algorithm in nodal system;

9. The author analyzes through the prism of the proposed model only the hot water injection process in Romania on Sotanga UH2 oilfield, identifying the causes of the failure of this process and the necessary improvements;
10. The two models developed by the author for the processes of cold water injection and steam injection can be used to predict the efficiency of oil recovery, analysis and optimization of these processes in the design stage, choosing the optimal thermal recovery method in relation to the chosen optimization criterion.

Keywords: thermal oil recovery methods, determination of thermal diffusivity, model cold water injection, model hot water injection.

TABLES OF CONTENTS

INTRODUCTION	3
1. THERMAL METHODS OF OIL RECUPERATION FROM RESERVES	5
1.1. THE EVOLUTION OF THE APPLICATION OF THE THERMAL METHODS OF RECUPERATION.....	5
1.2. METHODS AND EXAMPLES OF REALIZATION OF THE THERMAL RECUPERATION.....	7
1.3. PREDICTIVE MODELS AND METHODS OF RECUPERATION OF THE OIL THROUGH THERMAL PROCESSES.....	13
2. THERMOPHYSICAL PROPRITIES OF THE OIL RESERVES	17
2.1. PROPRITIES OF THE GASES.....	17
2.1.1. Density.....	17
2.1.2. The viscosity	18
2.1.3. The comprehensibility	19
2.1.4. The volumetric thermal capacity.....	19
2.1.5. The thermal conductivity.....	20
2.1.6. The thermal power.....	22
2.2. THE OIL PROPRITIES.....	22
2.2.1. The density.....	22
2.2.2. The solution ration.....	23
2.2.3. The volume coefficient.....	23
2.2.4. The oil viscosity.....	23
2.2.5. The specific heat.....	25
2.2.6. The thermal conductivity.....	25
2.3. THE PROPRITIES OF THE SOLID PENETRABLE POROUS ENVIRONMENT.....	25
2.3.1. The porosity.....	25
2.3.2. The permeability.....	27
2.3.3. The comprehensibility.....	28
2.3.4. The saturation of the fluids.....	28
2.3.5. The caloric capacity by volume, mass and molar.....	29
2.3.6. The thermal conductivity.....	35
2.4. THE THERMAL DIFFUSIVITY OF THE OIL RESERVES.....	48
2.4.1. The thermal diffusivity, the thermal distribution.....	48
2.4.2. Methods of determining the thermal diffusivity.....	49
3. THE HOT WATER INJECTION IN OIL RESERVES	52
3.1. THE MICROSCOPIC EFFICIENCY OF THE IZOTHERM UNMIXED DISPLACEMENT.....	52
3.1.1. The watering.....	52
3.1.2. The capillary pressure.....	53
3.1.3. The distribution of the saturations in fluids.....	53
3.1.4. The relative permeability.....	54
3.1.5. The mobility rate.....	55
3.2. THE MACROSCOPICAL EFFICIENCY OF THE UNMISCIBLE ISOTHERM DISPLACEMENT.....	56
3.2.1. The mathematical relations regarding unmixed isotherm displacement within the water/oil system.....	56
3.2.2. The solution of the isotherm frontal advance Buckley-Lever.....	58
3.2.3. The solution of the isotherm power tubes.....	64
3.2.4. Results and discussion.....	72
3.3. THE MACROSCOPICAL EFFICIENCY OF THE UNMISCIBLE NON-ISOTHERM DISPLACEMENT.....	77
3.3.1. The solution of the non-isotherm frontal advance Buckley- Leverett.....	79
3.3.2. The solution of the non-isotherm power tubes.....	88

4. THEORETICAL AND EXPERIMENTAL RESEARCHES.....	93
4.1. THE DETERMINATION OF THE THERMAL DIFFUSIVITY THROUGH TERMODYNAMIC INVESTIGATIONS IN OILFIELDS.....	93
4.1.1. Dates about the deposit for Levantin-Moreni.....	99
4.1.2. The description of the experiment.....	101
4.1.3. Results and conclusions.....	104
4.2. MODEL AND SIMULATOR FOR AN ISOTHERM INJECTION WATER PROCESS.....	107
4.3. THE UTILISATION OF THE HORIZONTAL OILFIELDS IN CASE OF THERMAL PROCESSES OF OIL RESERVES EXPLOTATION.....	119
4.3.1. Application of horizontal oilfields in thermal recuperation processes.....	122
4.3.2. I Hot water injection through horizontal oilfields.....	126
4.3.3. Model and simulator for a non-isotherm hot water injection process through horizontal oilfields.....	130
4.4. RESEACHES ON HOT WATER INJECTION PROCESS FROM ROMANIA.....	150
4.4.1. Dates about reserves.....	150
4.4.2. The deployment of the process.....	151
4.4.3. Observation and conclusion.....	153
5. CONCLUSIONS AND PERSONNEL CONTRIBUTIONS.....	156
A LIST WITH THE USED FIGURES.....	162
BIBLIOGRAPHY.....	164
ANNEXES LIST.....	169

RECHERCHES CONCERNANT L'OPTIMISATION DE L'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE PETROLE BRUTE PAR DES METHODES THERMIQUES

Résumé

Doctorand Ing. Constantin Rădulescu

Le volume important des ressources mondiales de pétrole brute lourd et visqueux et de bitumes, qui dépassent plus de deux fois les réserves de pétroles brutes conventionnelles, ainsi que la valeur réduite du coefficient de récupération obtenu par l'exploitation primaire de ces réserves, ont déterminé le développement et le perfectionnement des méthodes thermique d'exploitation des gisements de pétrole brute. Parmi ces méthodes, l'injection à eau chaude est la rde gisements où cette méthode est appliquée, tout en obtenant une efficacité accrue et cela pas seulement pour les pétroles brutes lourds.

Les objectifs de cette thèse de doctorat sont: la connaissance la plus exacte de nombreux aspects concernant l'injection d'eau froide et/ou chaud, à applicabilité théorique et pratique, ainsi que la mise en évidence de nouvelles idées et solutions d'amélioration de la conception, la surveillance et l'orientation d'un procès d'injection à eau froide et/ou chaude.

Pour réaliser ces objectifs, mon étude a été structurée en 5 chapitres y inclus l'introduction, la bibliographies avec 82 références et les conclusions concernant mes contributions personnelles. La thèse comprend 169 pages et contient 57 figures, 20 tables et 9 annexes.

Le chapitre 1 présente le lieu des thermiques de récupération au cadre des méthodes EOR et l'évolution de leur application.

Le chapitre 2 passe en revue les modalités d'évaluation des principales propriétés thermo- physiques des gisements de hydrocarbures. On est également présenté les mécanismes et les facteurs d' influence pour la diffusivité thermique et pour la dispersion thermique, tout en soulignant les différences entre ces notions.

Le chapitre 3 présente une vision des phénomènes qui se produisent pendant le déplacement du pétrole brute par l'eau niveau microscopique et macroscopique en conditions isothermes et non isothermes. On décrit la solution de l'avance frontale, Buckley et Leverett, et la solution des tubes de courant au cas du déplacement isotherme, ainsi qu pour ce lui déplacement isotherme.

Le chapitre 4 présente le recherches théoriques et expérimentales entreprises par l'auteur. Par ceci, on propose une méthode nouvelle de détermination de la diffusivité thermique par des investigations thermo-dynamique dans le puits et on présente les testes et les résultats obtenus pour le gisement Levantin Moreni.

Au cas du déplacement isotherme, on propose une méthode simplifiée, concrétisée dans un modèle et simulateur, pour la prédiction des paramètres de production pour un procès d'injection d' eau qui de déroule en conditions isothermes. Les résultats obtenus par l' application du logiciel au gisement Sotanga Me UH1 ont été comparés avec les données de production réalisées dans les premiers 12 ans d'application du procès d'injection d'eau, en obtenant une bonne corrélation. Ce modèle sert à la prédiction de l'efficacité de la récupération du pétrole brute, l' analyse et l' optimisation du procès d' injection d'eau.

Au cas du déplacement non isotherme on propose un modèle nouvel pour le mangement de l' injection d'eau chaude, en utilisant des puits horizontaux, en élaborant une nouvelle méthode de conception d'un procès d' injection d' eau chaude et un logiciel d' application en Excel et Matlab pour la conception et le choix de la solution optimale qui assure l'efficacité économique maximale. Le modèle exprime au point de vue mathématique les phénomènes qui se produisent, dans les conditions des hypothèses simplificatrices qui n'induisent pas d'erreurs significatives, dans le gisement, durant toute la durée du processus. Celui-ci peut être opéré d' une manière habituelle, sans avoir besoin d'un simulateur commercial. Le modèle proposé est fondé sur la théorie de l' avance frontale Buckley- Lverett, la méthode Welge, la

méthode de calcul de la récupération par injection d'eau chaude de Fournier et la détermination de la distribution de température pour un fluide en mouvement avec la solution analytique de l'équation différentielle Fourier-Kirchoff, appliquée dans un algorithme unitaire en système nodal, les paramètres de sortie d'une partie deviennent les paramètres d'entrée dans la partie suivante, pour 4 zones de saturation en eau et 3 domaines de température qui se constituent pendant un procès de récupération thermique en gisement, algorithme qui se concrétisent dans le logiciel d'application élaboré. Le logiciel d'application réalisé pour l'injection d'eau chaude est un programme Matlab couplé à un programme Excel et une interface où l'on exécute l'initialisation avec les paramètres de production du procès.

En conformité avec ce modèle, on a analysé l'influence des paramètres principaux du gisement et du procès d'injection d'eau chaude sur le débit de pétrole brute, respectivement sur les performance de celui-ci.

Les contributions principales de l'auteur de cette thèse de doctorat sont, en synthèse, les suivantes:

1. L'analyse de la diffusivité et de la dispersion thermique en tant que phénomènes et mécanismes de transfert thermique, en soulignant les paramètres hydro-dynamiques et thermiques de l'écoulement des fluides chaudes par des milieux poreux qui influencent ces mécanismes. On présente une synthèse des dernières recherches concernant les méthodes et les modèles expérimentales s' d'évaluation de la diffusivité thermique qui ont conduit à la déduction de certaines relations semi-empiriques ou de simulateurs de laboratoire qui soient appliqués aux procès réels du gisement;

2. Le perfectionnement de la méthode de détermination de la diffusivité thermique par des investigations directement dans le puits, en concevant et réalisant une installation de mesure et enregistrement de la température dans le puits avec la possibilité de transmettre à distance les données enregistrées;

3. La mise en pratique de la méthode et l'utilisation de l'installation de mesure et enregistrement de la température dans le puits pour accomplir des testes thermo-dynamiques aux puits du gisement Levantin Moreni avec la méthodologie de travail perfectionné, pour déterminer la diffusivité thermique de la zone autour de la trou de sonde par recherche thermo-dynamique, similaire à la recherche hydro-dynamique des sondes, par l'interprétation mathématique des courbes de variation de la température;

4. La détermination, en conformité avec les valeurs de la diffusivité thermique résultée de la recherche thermo-dynamique, des zones avec transmissivité thermique plus grande ou moindre, qui peuvent être utilisées à configurer le réseaux de puits et les valeurs des débits d'injection et extraction, pour le gisement Levantin Moreni, au cas d'un procès thermique de récupération qui est prévu. A la fois, on peut résoudre les problèmes apparus pendant le procès de récupération thermique concernant la conduite de la propagation du front thermique, zones d'emmagasiner thermique accru, zones de transfert réduit, le transfert thermique vertical et la communication des couches, etc;

5. L'auteur a conçu un algorithme de calcul concrétisé dans un logiciel d'application, modèle et simulateur, pour la détermination des performances du procès d'injection d'eau « froide » dans un procès de déplacement isotherme, en utilisant l'avance frontal Buckley-Leverett des équations différentielles de conservation de la masse pour eau et pétrole brute. Les résultats obtenus après l'application du logiciel au gisement Sotanga Me UH1 ont été comparés avec les données de production réalisées dans les premiers 12 ans d'application du procès d'injection d'eau, en obtenant une bonne corrélation. Ce modèle sert à la prédiction de l'efficacité de la récupération du pétrole brute, l'analyse et l'optimisation du procès d'injection d'eau;

6. On présente synthétiquement le rôle et le mode d'utilisation des sondes horizontales dans le but de l'accroissement de l'efficacité des méthodes thermiques de récupération du pétrole brute au cadre des technologies les plus nouvelles d'application en exemples de réalisation au monde;

7. Pour la gestion du procès de l'injection d'eau chaude par des puits horizontaux, quand dans le gisement il y a un écoulement linéaire non miscible non isotherme, on déduit « l'équation de la température » par la résolution du système d'équations différentielles qui inclut les

équations de conservation des masses et l'équation de l'énergie. On présente les dernières solutions données à cette équation, la solution analytique (2008) et la solution des tubes de courant (2011);

8. L'auteur élabore un modèle et simulateur pour la détermination des performances du processus d'injection à eau chaude dans un processus de déplacement non isotherme, basé sur la théorie de l'avance frontale Buckley-Leverett, la méthode Welge, la méthode de calcul de la récupération par injection d'eau chaude de Fournier et la détermination de la distribution de température pour un fluide en mouvement avec la solution analytique de l'équation différentielle Fournier-Kirchoff, appliquée dans un algorithme unitaire en système nodal;

9. L'auteur analyse, du point de vue du modèle proposé, le seul processus d'injection à eau chaude de la Roumanie, c'est le cas du gisement de Sotanga UH2, en identifiant les causes de l'échec de ce processus et les améliorations nécessaires;

10. Les deux modèles élaborés par l'auteur pour les processus d'injection à eau froide et injection à eau chaude peuvent être utilisés pour la prédiction de l'efficacité de la récupération du pétrole brut, analyse et optimisation de ces processus et, dans l'étape de conception, le choix de la méthode thermique de récupération optimale par rapport au critère d'optimisation choisi.

TABLES DES MATIÈRES

INTRODUCTION	3
1. METHODES THERMIQUES DE RECUPERATION DE PETROLE DES GISEMENTS	5
1.1. EVOLUTION DE L'APPLICATION DES METHODES THERMIQUES DE RECUPERATION.....	5
1.2. METHODES ET EXEMPLES DE REALISATION DE LA RECUPERATION THERMIQUE.....	7
1.3. MODELES ET METHODES PREDICTIVES DE RECUPERATION DE PETROLE PAR DES PROCES THERMIQUES.....	13
2. LES PROPRIETES THERMO-PHYSIQUE DES GISEMENTS DE PETROLE	17
2.1. LES PROPRIETES DES GAZ.....	17
2.1.1. La densité	17
2.1.2. La viscosité.....	18
2.1.3. La compressibilité	19
2.1.4. La capacité calorique volumétrique.....	19
2.1.5. La conductivité thermoque	20
2.1.6. Le pouvoir calorique.....	22
2.2. LES PROPRIETES DU PETROLE.....	22
2.2.1. Le densité.....	22
2.2.2. Le rapport de dissolution.....	23
2.2.3. Le coefficient de volume.....	22
2.2.4. La viscosité de pétrole.....	23
2.2.5. La chaleur spécifique.....	25
2.2.6. La conductivité thermique.....	25
2.3. LES PROPRIETES DU MILIEU SOLIDE POREUX PERMEABLE.....	25
2.3.1. Porosité.....	25
2.3.2. Perméabilité.....	27
2.3.3. Compressibilité.....	28
2.3.4. La saturation en fluides.....	28
2.3.5. La capacité calorique de masse, de volume, molaire.....	29
2.3.6. La conductivité thermique.....	35
2.4. LA DIFFUSIVITE THERMOQUE DES GISEMENTS DE PETROLE.....	48
2.4.1. La diffusivité thermique, la dispersion thermique.....	48
2.4.2. Méthodes pour déterminer la diffusivité thermique.....	49
3. INJECTION D'EAU CHAUDE DANS LES GISEMENTS DE PETROLE	52
3.1. L'EFFICACITE MICROSCOPIQUE DU DEPLACEMENT NON MISCIBLE ISOTHERME.....	52
3.1.1. Pouvoir mouillant.....	52
3.1.2. La pression capillaire.....	53
3.1.3. La distribution des saturation en fluides.....	53
3.1.4. La perméabilité relative.....	54
3.1.5. Le rapport de la mobilité.....	55
3.2. L'EFFICACITE MACROSCOPIQUE DU DEPLACEMENT NON MISCIBLE ISOTHERME.....	56
3.2.1. Relations mathématiques concernant le déplacement non miscible isotherme au cadres des systèmes eau/pétrole.....	56
3.2.2. La solution de l'avance frontale Buckley-Leverett isotherme.....	58
3.2.3. La solution des tubes de courant isothermes.....	64
3.2.4. Résultats et discussions.....	72

3.3. L'EFFICACITE MACROSCOPIQUE DE DEPLACEMENT NON MISCIBLE NON ISOTHERME.....	77
3.3.1. La solution de l'avance frontale Buckley-Leverett non-isotherme.....	79
3.3.2. La solution des tubes de courant non-isothermes.....	88
4. RECHERCHES THEORIQUES ET EXPERIMENTALES.....	93
4.1. DETERMINATION DE LA DIFFUSIVITE THERMIQUE PAR DES INVESTIGATIONS THERMODYNAMIQUES DANS LE PUIT.....	93
4.1.1. Le modèle de gisement pour Levantin Moreni.....	99
4.1.2. Description de l'expérimentation réalisé.....	101
4.1.3. Résultats et conclusions.....	104
4.2. MODÈLE ET SIMULATEUR POUR UN PROCÈS ISOTHERME À INJECTION D'EAU.....	107
4.3. UTILISATION DES PUITES HORIZONTAUX AU CAS DES PROCES THERMIQUES D'EXPLOITATION DES GISEMENTS DE PETROLE.....	119
4.3.1. Utilisation des puits horizontaux dans les processus de récupération thermique.....	122
4.3.2. L'injection d'eau chaude par des puits horizontaux.....	126
4.3.3. Modèle et simulateur pour un processus non isotherme à injection d'eau chaude par des puits horizontaux.....	130
4.4. RECHERCHES SUR UN PROCES D'INJECTION D'EAU CHAUDE EN ROUMANIE.....	150
4.4.1. Le modèle de gisement.....	150
4.4.2. Le déroulement du processus.....	151
4.4.3. Observations et conclusions.....	153
5. CONCLUSIONS ET CONTRIBUTIONS PERSONELLES.....	156
DESCRIPTION DES FIGURES UTILISEES.....	162
BIBLIOGRAPHIE.....	164
LISTE DES ANNEXES.....	169