



MINISTERUL EDUCAȚIEI
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI

B-dul. București nr. 39, 100680 Ploiești - România
www.upg-ploiesti.ro
Telefon +40 244 573 171 Fax +40 244 575 847



INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT– MINE, PETROL ȘI GAZE

TEZĂ DE DOCTORAT
CONTRIBUȚII PRIVIND OPTIMIZAREA
FORAJELOR REALIZATE ÎN CONDIȚII DE
PRESIUNI SI TEMPERATURI MARI SI FOARTE
MARI (HPHT)

Autor: Drd. Ing. Radu Ivan

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. AVRAM LAZĂR

Ploiești 2022

INSTITUȚIA ORGANIZATOARE DE STUDII UNIVERSITARE DE DOCTORAT
UNIVERSITATEA PETROL-GAZE DIN PLOIEȘTI
DOMENIUL FUNDAMENTAL – ȘTIINȚE INGINEREȘTI
DOMENIUL DE DOCTORAT– MINE, PETROL ȘI GAZE

TEZĂ DE DOCTORAT
CONTRIBUȚII PRIVIND OPTIMIZAREA
FORAJELOR REALIZATE ÎN CONDIȚII DE
PRESIUNI SI TEMPERATURI MARI SI FOARTE
MARI (HPHT)

CONTRIBUTIONS REGARDING THE DRILLING
OF HIGH PRESSURE AND HIGH
TEMPERATURE WELLS (HPHT)

Autor: Drd. Ing. RADU IVAN

Conducător științific: Prof. Dr. Ing. AVRAM LAZĂR

Nr. Decizie 953/15.12.2021

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf. univ. dr. ing. mat. PANĂ Ion	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător doctorat	Prof.univ.dr.ing. AVRAM Lazăr	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.habil. dr.ing. DINU Florinel	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. RADU Sorin	de la	Universitatea din Petroșani
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. ROBESCU Diana Lăcrămioara	de la	Universitatea Politehnica din București

Ploiești 2022

CUPRINS

FISA DE PREZENTARE A DOCTORANDULUI	3
LISTA FIGURILOR ȘI A TABELELOR	6
NOMENCLATURI	10
REZUMAT	13
CAPITOLUL I INTRODUCERE	14
1.1. Definierea conceptului HPHT	14
1.2. Distribuția geografică a condițiilor HPHT	17
CAPITOL II REVIZUIREA LITERATURII PENTRU SONDELE HPHT	17
2.1. Generalități privind sondele HPHT	17
2.2. Estimarea presiunilor în gaura de sondă HPHT	21
2.2.1. Presiunea litostatică și hidrostatică	22
2.2.2. Presiunea de confinare (sau de împingere laterală)	24
2.2.3. Presiunea din pori și de fracturare	24
2.2.4. Presiuni hidrodinamice	28
2.2.5. Anomaliile de presiune	29
2.2.6. Identificarea anomaliilor de presiune	30
2.3. Estimarea temperaturilor în gaura de sondă HPHT	31
2.3.1. Gradient geotermic și temperaturi în gaura de sondă	31
2.3.2. Efectul temperaturii asupra alungirii garniturii de foraj	35
2.3.3. Abordarea balanței energetice în studiul efectelor temperaturilor în cadrul sondelor HPHT	35
2.4. Selectarea de fluide de foraj	39
2.5. Estimarea densității fluidului de foraj într-o sondă HPHT	47
2.6. Implicațiile condițiilor HPHT pentru forajul sondelor	51
CAPITOLUL III SIMULAREA, PROIECTAREA, ȘI OPTIMIZAREA SONDELOR HPHT DIN ȘANTIERUL GHAWAR	53
3.1. Descrierea șantierului Ghawar	53
3.2. Analiza datelor <i>offset</i> pentru HPHT	58
3.2.1. Riscuri potențiale și informații de la sonde învecinate sau similare	58
3.3. Program de fluide de foraj aferent secțiunii de 5 ⁷ / ₈ inch gaură de sondă	59
3.4. Secvență operațională pentru forajul găurii de sondă de 5 ⁷ / ₈ inch	62
3.5. Simularea și proiectarea sondei HPHT cu software-ul Landmark (Halliburton)	64
3.5.1. Simularea și proiectarea temperaturii cu <i>software</i> -ul Landmark	67
3.5.2. Simularea și optimizarea hidraulicii noroiului de foraj cu <i>software</i> -ul Landmark (curățarea găurii de sondă/ <i>Hole cleaning plots</i>)	68
3.5.3. Simularea și optimizarea presiunii și ECD cu Landmark (Pressure and ECD Plots)	70
3.5.4. Simularea și optimizarea dinamicii BHA și a vibrațiilor garniturii de foraj cu <i>software</i> -ul Landmark (<i>Drillstring vibration analysis</i>)	79

3.5.5. Simularea și optimizarea cuplului și tracțiunii garniturii de foraj cu <i>software</i> -ul Landmark (<i>Torque and Drag</i>)	85
---	----

CAPITOLUL IV SIMULAREA ȘI MODELAREA UNEI SONDE CU O SCEȚIUNE HP	90
4.1. Descrierea șantierului și sondei A14	90
4.2. Simulare și proiectare sonda - A14	93
4.3. Studiu de simulare a parametrilor de foraj și amplasarea gealelor în sonda A14	98
4.3.1. Introducere	98
4.3.2. Geale de foraj	100
4.3.3. Matematica gealei	101
4.3.4. Rezultate simulare	103

CAPITOLUL V ANALIZĂ STATISTICĂ ȘI <i>BENCHMARKING</i> PENTRU SONDELE HPHT	113
5.1. Obiectivele studiului	113
5.2. Analiza NPT a operațiunilor sondelor HPHT	114
5.3. O comparație de performanță sondelor HPHT (<i>benchmarking</i> – HPHT)	119
5.4. Tehnologie HPHT necesară	122

CAPITOLUL VI CONTROLUL MANIFESTĂRIILOR ERUPTIVE ÎN SONDA REALA HPHT	124
6.1. Aspecte tehnice din câmpul marginal	124
6.1.1. Prezentare generală	124
6.1.2. Activități post-revocare	124
6.2. Narative tehnice din 2014	125
6.2.1. Puțul -1	125
6.3. Evaluarea subterană și planul noțional de dezvoltare a câmpului (FDP)	125
6.4. Arhitectură de finalizare a puțurilor	129
6.5. Ghid de reglementare privind programul de reintrare în puț 2014	130
6.6. Reintrarea în funcțiune în 2019	130
6.6.1. Sonda-1 - propunere de reintrare	130
6.6.2. Evaluare și aprobare DPR	130
6.7. OPȚIUNI DE CONTROL	131

CAPITOL VII CONCLUZII ȘI RECOMANDĂRI	133
BIBLIOGRAFIE	135
ANEXE	143

REZUMAT

Modul în care sunt traversate stratele de petrol sau gaze, ca și construcția sondelor în dreptul lor au un rol decisiv în reușita forajelor: obținerea unor producții maxime, în concordanță cu potențialul stratelor și exploatarea sondelor o lungă perioadă de timp fără probleme majore. Obiectivele respective pot fi atinse prin aplicarea tehnicilor și a tehnologiilor adecvate specificului sondelor, prin utilizarea unor fluide de traversare și completare specializate, prin stabilirea celei mai bune configurații a sondelor în zona productivă, prin utilizarea unor procedee optime de tubare și cimentare etc.

În acest context, sondele cu condiții de temperaturi și presiuni ridicate (HPHT) urmăresc obținerea de noi producții de petrol sau gaze, de obicei la adâncimi mai mari. În aceste puțuri, presiunile și temperaturile sunt foarte crescute, ceea ce face ca proiectarea, forarea și extracția hidrocarburilor să devină o provocare inginerească mai mare. Astfel, companiile sunt nevoite să investească în tehnologii și produse inovatoare pentru forajul HPHT, menținând în același timp proiecte fezabile din punct de vedere economic.

Prin urmare, obiectivul principal al tezei este acela de a revizui, analiza, proiecta, dezvolta, optimiza și simula sondele HPHT din diferite locații, din întreaga lume. Sunt dezvoltate noi modele pentru prezicerea performanțelor acestor puțuri. În plus, studiile de caz reale din diferite locații sunt folosite pentru a desăvârși studiile și simulările noastre. De asemenea, sunt propuse noi tehnologii și metode pentru studii de caz efective, astfel încât problemele de foraj să poată fi evitate și depășite.

Teza este împărțită în șase capitole. După prealabila Introducere (capitolul I), a fost realizată o largă revizuire a literaturii de specialitate (capitolul II), pentru a stabili distribuția sondelor HPHT la nivel mondial, a prezenta cercetările științifice anterioare cu privire la aceste puțuri și a prezenta ecuațiile, metodele, tehnicile și tehnologiile utile pentru studiul nostru. Metodele tradiționale de proiectare eșuează în cazul sondelor HPHT, deoarece presiunile și temperaturile ridicate influențează aproape toate aspectele, inclusiv proiectarea garniturilor, echipamentelor, fluidelor de foraj, cimenturilor, controlul puțurilor, conexiunile, materialele, completările ș.c.l..

Proiectarea, simularea și optimizarea au fost implementate pentru câmpul Ghawar cu sonde HPHT, de așa manieră încât să se revizuiască, să se analizeze și să se prezică performanța acestor sonde (capitolul III). În paranteză spus, Ghawar este cel mai mare câmp petrolifer convențional din lume și este esențial pentru strategia de producție a petrolului din Arabia Saudită și, de asemenea, a trecut cu mult de faza sa de vârf de producție. Mai exact spus, cei mai eficienți parametri de foraj și cele mai bune practici de foraj sunt astfel selectate încât să se poată optimiza forarea viitoarelor sonde.

Apoi s-a realizat un studiu de modelare și simulare pentru o sondă cu secțiune geologică de înaltă presiune. În acest studiu, momentele și rezistențele aferente materialului tubular, în speță garniturii de foraj, au fost atent modelate. În plus, parametrii regimului de foraj sunt optimizați astfel încât să poată fi selectate, între altele, cele mai bune practici pentru curățarea tălpilor găurilor de sondă. De asemenea, a fost realizat și un studiu de simulare pentru a studia amplasarea gealelor de foraj în puțurile cu devieri mari.

Factorii importanți de care am ținut seama au fost tipul de formare, tipul de noroi, curbura găurii, severitatea *dogleg-ului*, înclinarea BHA și numărul stabilizatorilor. Studiul a scos în evidență faptul că, la amplasarea gealelor, trebuie să se aibă în vedere ca punctul neutru, de egală întindere și compresiune, să nu cadă în dreptul gealei. În același timp, selectarea celei mai bune poziții pentru geală trebuie să se facă în condițiile în care eforturile maxime care apar să nu afecteze integritatea garniturii de foraj. În cadrul studiului sunt incluse și varii echipamente de deviere, iar dimensiunile gealelor reprezintă elemente cheie pentru selectarea poziției acestora în garnitură.

În capitolul IV - *Simularea și modelarea unei sonde cu o secțiune HP* - s-a realizat analiza unei sonde cu o secțiune care are presiunea mare (HP), folosindu-se datele de la sondele vecine (*offset*). În plus, proprietățile fluidului de foraj au fi modelate la fiecare secțiune cu ajutorul *software*-ului Landmark al fimei Halliburton. Simularea și studiul de analiză s-au realizat pentru a selecta și a optima poziționarea și performanța gealei în sonda A14.

În capitolul V, așa cum sugerează și titlul, *Analiză statistică și benchmarking pentru sondele HPHT*, a fost implementată o analiză statistică și un studiu de *benchmarking* pentru mai multe sonde HPHT, pentru a analiza timpul neproductiv (NPT) pentru toate operațiunile efectuate în aceste sonde. În plus, studiul de evaluare comparativă arată performanța sondelor HPHT în raport cu cea mai bună sondă reper. Apoi, noile tehnologii au fost propuse pentru a fi utilizate în aceste sonde. S-au trasat tendințele de performanță și factorii determinanți de la an la an. S-a realizat analiza tipurilor de joc la nivel global pentru sondele HPHT (D/10k vs. tip de platformă, tip de noroi, profil direcțional, coloane de tubare etc.). Mai mult, s-au stabilit tendințele NPT în raport cu tipul de joc, tipul platformei, tipul noroiului, profilul direcțional etc.

În ultima parte a tezei s-a realizat și un control al manifestărilor eruptive în sonda reală HPHT (capitolul VI). Aceasta sondă avea o problemă stringentă de manifestare eruptivă. Aceasta s-a întâmplat în anul 2020, când o companie a vrut să foreze o altă sondă din primul puț, realizat cu câțiva ani mai înainte. Din păcate, procesul de foraj s-a realizat fără precauții și măsuri de siguranță... În aceste condiții, s-au recomandat trei soluții pentru a controla această sondă. În plus, studiul de cost s-a stabilit pentru fiecare soluție în parte.