

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 MODELAREA CURGERII FLUIDELOR PRIN CONDUCTE ÎN CONDIȚII DE SIGURANȚĂ

Autor: Mirela Ancuța NEAGA (RADU)

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Lazăr AVRAM

Ploiești 2024

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 MODELAREA CURGERII FLUIDELOR PRIN CONDUCTE ÎN CONDIȚII DE SIGURANȚĂ

CONTRIBUTIONS TO THE MODELING OF FLUID FLOW THROUGH PIPES UNDER CONDITIONS FOR SAFETY

Autor: Mirela Ancuța NEAGA (RADU)

Conducător științific: Prof.univ.dr.ing. Lazăr AVRAM

Nr. Decizie 647 din 04.09.2024

Comisia de doctorat:

Președinte	Conf.univ.dr.ing. Alin DINIȚĂ	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Conducător științific	Prof.univ.dr.ing. Lazăr AVRAM	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești
Referent oficial	Prof.univ.habil.dr.ing. Florin Dumitru POPESCU	de la	Universitatea din Petroșani
Referent oficial	Prof.univ.dr.ing. Dan Valentin PETRESCU	de la	Universitatea Lucian Blaga din Sibiu
Referent oficial	Prof.univ.habil.dr.ing. Mihai Adrian ALBULESCU	de la	Universitatea Petrol-Gaze din Ploiești

Ploiești 2024

CUPRINS

ABSTRACT

I. CALCULUL TERMIC ȘI HIDRAULIC AL CONDUCTELOR

1.1. Variația temperaturii în lungul unei conducte

1.2. Calculul hidraulic al conductelor pentru transportul la cald

II. MODELAREA IZOLAȚIEI UNEI SECȚIUNI DE CONDUCTĂ DESTINATĂ TRANSPORTULUI PRODUSELOR PETROLIERE

2.1. Considerații teoretice

2.2. Construcția modelului

III. MODELAREA MATEMATICĂ A TRANSPORTULUI FLUIDELOR BIFAZICE

3.1. Metoda Beggs și Brill

3.2. Alte metode de calcul a căderii de presiune în curgerea bifazică

IV. APARATUL MATEMATIC UTILIZAT PENTRU CALCULUL TRAIECTORIEI PARTICULELOR DINTR-UN LICHID

4.1. Ipoteza de calcul Newton

4.2. Ipoteza de calcul Lagrange

4.3. Urmărirea particulelor în secvențe rotative

4.4. Condiții inițiale

4.5. Variabile dependente auxiliare

4.6. Condiții la limita suprafețelor pereților

4.7. Condiții la intrarea și ieșirea particulelor

4.8. Re-emisia termică

4.9. Teoria acumulatorilor: Domenii

4.10. Teoria acumulatorilor: limite

4.11. Teoria acumulatorului: Reinițializarea vitezei

V. COMBATEREA EROZIUNII CONDUCTELOR DE TRANSPORT A HIDROCARBURILOR SUB ACȚIUNEA PARTICULELOR CONTAMINANTE

5.1. Considerații teoretice

5.2. Modelul de eroziunea Finnie

5.3. Modelul de eroziune E/CRC

5.4. Modelul de eroziune OKA

5.5. Modelul de eroziune DNV

5.6. Construcția modelului

5.7. Construcția modelului

VI. STUDIU DE CAZ: PROIECTAREA CONDUCTEI DE TRANSPORT A GAZELOR NATURALE DE LA ESCRAVOS LA LAGOS (NIGERIA)

6.1. Introducere

6.2. Date inițiale și modelare

6.3. Scenariul 1: se adaugă 300 MMSCFD, folosindu-se compresoare

6.4. Scenariul 2: se adaugă 600 MMSCFD, folosindu-se compresoare

6.5. Calculul costurilor pentru compresoare

6.6. Calculul costurilor pentru armare

6.7. Evaluare economică și limitări pentru compresor și armătură

6.8. Concluzii parțiale

VII. EVALUAREA RISCULUI GENERAT DE ELECTRICITATEA STATICA LA VEHICULARA PRODUSELOR PETROLIERE PRIN CONDUCTE

7.1. Mecanismul de formare, acumulare și descarcare a sarcinilor electrostatice în medii cu atmosferă potențial explozivă

7.2. Electrostatica în lichide și implicațiile sale periculoase

7.3. Studiu de caz. Analiza cauzelor care au dus la producerea unei explozii urmată de incendiu la încărcarea unei cisterne cu motorină

8. ELEMENTE DE COMBATERE A UNOR DEFECTE ȘI A DEGRADĂRII CONDUCTELOR DE TRANSPORT A ȚITEIULUI

8.1. Generalități

8.2. Factori de influență a acțiunilor distructive ale oleoductelor petroliere

8.3. Degradarea sistemelor de conducte utilizate la transportul fluidelor petroliere

8.4. Imperfecțiuni și defecte caracteristice conductelor de transport a fluidelor petroliere

8.5. Evaluarea integrității conductelor cu defecte de tip pierdere de material în urma coroziunii

IX. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Bibliografie

În ciuda multor preocupări, de-a lungul timpului, privitoare la *modelarea curgerii fluidelor prin conducte*, interesul rămâne mereu și mereu acut, odată cu evoluția tehnică și tehnologică, fără precedent, al domeniului industriei, în general, al industriei petrolului și gazelor, în special.

În primul capitol, intitulat *Calculul termic și hidraulic al conductelor*, am făcut referiri privitoare la variația temperaturii în lungul unei conducte (calculul coeficientului global de schimb de căldură, determinarea numărului și amplasarea stațiilor de încălzire, calculul termic în cazul opririi pompării) și am efectuat calculul hidraulic al conductelor pentru transportul la cald. Între altele, oprirea pompării are ca efect răcirea lichidului aflat în conductă. Dacă durata opririi este prea mare, pot apare dificultăți la reluarea pompării din cauza creșterii vâscozității sau producerii fenomenului congelare. Cunoașterea variației în timp a temperaturii într-o secțiune a conductei, după oprirea pompării este absolut necesară.

În capitolul II – *Modelarea izolației unei secțiuni de conductă destinată transportului produselor petroliere* –, se utilizează interfața *Nonisothermal Pipe Flow* a aplicației *Comsol Multiphysics* pentru configurarea și determinarea fluxului de energie, precum și pentru rezolvarea ecuațiilor care descriu transportul țiteiului într-o secțiune oarecare de conductă. Modelul supus simulării se referă la o conductă de transport a țiteiului cu lungimea de 150 km, un debit de 2500 m³/h la o temperatură a admisiei de 25 °C. În cadrul aplicației *Comsol*, interfețele care modelează curgerea prin conducte au înglobat și ecuația Haaland precum și alte modele de frecare predefinite destinate calculului automat al coeficientului de frecare pe baza proprietăților locale ale conductelor, proprietăților fizice ale fluidului și vitezei acestuia. Pentru construcția geometriei modelului, care este o conductă virtuală de transport a țiteiului, am utilizat din meniul *Geometry* primitiva *Polygon* (curba este deschisă (*Open curve*) fiind trasată pe baza coordonatelor implementate tabelar (*Table*). Finalmente, am realizat simularea prin intermediul a trei studii cu numele: *Fără izolație*, *Izolat perfect* și *Optimizarea grosimii izolației*. Pentru a avea o imagine cât mai clară asupra variației temperaturii pentru cele trei studii abordate, am trasat pe un grafic, comparativ, rezultatele obținute.

În schelele de extracție, petrolul brut este transportat, cel mai adesea, prin conducte de la sonde la parcurile de separatoare, iar apoi la depozitul central. De la sonde până la punctele de separare, prin conducte circulă un lichid bifazic constituit din faza lichidă reprezentată de petrolul brut și apă, și faza gazoasă reprezentată de gazele libere care au ieșit din soluție ca urmare a scăderii presiunii. În acest sens, în capitolul III am realizat *Modelarea matematică a transportului fluidelor bifazice*. Capitolul debutează cu *Metoda Beggs și Brill*, plecându-se de la bilanțul energetic al unui kilogram de fluid care curge între două puncte. Elementul cheie din cadrul ecuației este căderea de presiune totală a fluidului, datorată variației energiei cinetice și potențiale ale acestuia, și din cauza frecării cu pereții canalului de curgere. Termenul cel mai problematic este căderea de presiune prin frecare, care poate fi exprimată ca o funcție a factorului de frecare a celor două faze, iar factorul de frecare poate fi exprimat în funcție de numărul Reynolds prin formula lui Blasius. Căderea de presiune a celor două faze datorită frecării este estimată, de obicei, folosindu-se modele de curgere separată. Relațiile propuse în lucrare sunt variate, dar consonante cu rezultatul final. E vorba de: • metoda de corelare a lui Fridel, care folosește un multiplicator de două faze; • metoda Lockhart și Martinelli de estimare a căderii de presiune de frecare a celor două faze pe baza multiplicatorului de două faze pentru faza de lichid sau de vapori respective; • relația Chisholm, o metodă empirică aplicabilă unei largi benzi de condiții de operare; • metoda lui Bankoff, o extensie a modelului omogen; •

relația Chawla, bazată pe gradientul presiunii de vapori; • relația Müller-Steinhagen și Heck, care este, în esență, o interpolare empirică între toate curgerile pentru lichide și vapori.

În capitolul IV am prezentat *Aparatul matematic utilizat pentru calculul traiectoriei particulelor dintr-un lichid*. În cazul ipotezei de calcul Newton, interfața matematică de trasare a traiectoriei particulelor face posibilă rezolvarea ecuațiilor diferențiale obișnuite pentru pozițiile particulelor. Când este selectată formularea newtoniană, poziția particulelor este calculată folosindu-se a doua lege a lui Newton. Avantajul utilizării formulării newtoniene de ordinul întâi este acela că permite evitarea combinării și rezolvarea simultană a ecuațiilor de ordinul întâi și a celor de ordinul doi (acest aspect apare atunci când sunt rezolvate și ecuațiile corespunzătoare variabilelor dependente auxiliare, deoarece ecuațiile corespunzătoare sunt întotdeauna de ordinul întâi). Atunci când se utilizează ipotezele de calcul Newton, Lagrange sau în cazul particulelor fără masă, există grade de libertate doar pentru pozițiile particulelor. Când se folosește formularea newtoniană, de ordinul întâi, există grade de libertate pentru poziția și viteza particulelor. Când se folosește formularea de tip Hamilton există grade de libertate pentru poziția și impulsul particulelor.

Secvențele de rotație ale particulelor exercită forțe cu caracter fictiv asupra acestora. În mod opțional apare și un decalaj la viteza inițială a particulelor eliberate. Acesta depinde de faptul că viteza particulei este inițializată neaccelerat în raport secvență inerțială sau cu secvență rotativă neinerțială. Componentele care pot defini caracterul fictiv al forțelor se referă la: forța centrifugă, forța Coriolis, forța Euler și forța dată de accelerația liniară. Condițiile inițiale pentru poziția particulelor sunt bazate fie pe rețeaua de elemente finite distribuită uniform, fie pe baza unei expresii analitice. Spre exemplu, când este selectată o distribuție a vitezei inițiale de tip Maxwell, se creează o matrice de valori inițiale ale vitezei pentru fiecare particulă și pentru fiecare direcție a vitezei. Uneori este de dorit să se elibereze în spațiul vitezelor particule izotropice cu aceeași viteză. Opțiunea vitezei constante conice este aceeași ca și opțiunea vitezei constante sferice, cu excepția faptului că în spațiul bidimensional 2D unghiul θ variază de la 0 la α , iar în spațiul tridimensional 3D unghiul ϕ variază de la 0 la α . În cazul opțiunii vitezei constante de tip Lambert, particulele sunt eliberate într-o emisferă în spațiul 3D al vitezei. Funcția de distribuție a probabilității este diferită de cea a opțiunii cu viteză constantă emisferică. Interacțiunea Lennard-Jones este folosită adesea ca funcție potențială intermoleculară pentru a estima proprietățile de transport ale unui gaz.

În anumite cazuri se dorește să se adauge grade suplimentare de libertate pentru a putea calcula masa particulelor, temperatura, dimensiunea sau alte mărimi. Gradul suplimentar de libertate este rezolvat pentru fiecare particulă în parte. Legat de condițiile la limita suprafețelor pereților, sunt utilizate următoarele denumiri: valoarea variabilei w pentru un precontact; valoarea variabilei w_c corespunzătoare momentului contactului; valoarea variabilei w' referitoare la postcontact.

Pentru intrarea particulelor se specifică *numărul* acestora, *poziția*, *viteza inițială* și *distribuția de lansare*. Un nod de intrare poate adăuga un nod de tip perete sau unul de ieșire, astfel încât este posibil să se specifice comportamentul particulelor care se întorc la intrare la un moment de timp ulterior. În cazul *teoriei acumulatorului (reinițializarea vitezei)*, caracteristica pentru reinițializarea vitezei transferă informații de la particule la domeniul pe care îl ocupă. Pentru domeniile din selecția nodului-părinte de reinițializare a vitezei, fiecare acumulator definește o variabilă numită variabilă acumulată. Variabila acumulată este discretizată folosindu-se funcții de formă constantă, astfel încât valoarea acesteia este uniformă pe fiecare element din rețeaua de discretizare și poate fi discontinuă între elementele de rețea de discretizare.

Cel mai adesea, fluidele precum sunt petrolul și gazele sunt transportate prin conducte. Materialul transportat conține particule solide contaminante cum este nisipul, particule care sunt transportate împreună cu fluidul. Acest fenomen poate afecta pereții conductelor

determinând deformarea sau îndepărtarea materialului de pe suprafața interioară printr-un proces de eroziune. Este motivul pentru care, în capitolul V am analizat *Eroziunea conductelor de transport a hidrocarburilor sub acțiunea particulelor contaminante*. Simularea eroziunii conductelor poate fi un instrument puternic și eficient utilizat în proiectare, optimizare și diagnosticare. În exemplul prezentat în lucrare, rata de uzură erozivă într-un cot de conductă de 90° este calculată și comparată pentru trei modele diferite de eroziune. Modelele de eroziune care sunt implementate în aplicația *Comsol* privesc: • modelul Finnie (definește volumul eliminat de pe o suprafață oarecare); • modelul E/CRC (definește rata de eroziune în funcție de raportul dintre masa pierdută de suprafață și masa particulelor incidente); • modelul OKA (definește volumul de material îndepărtat de pe suprafață pe unitatea de masă a particulelor incidente, în mm³/kg); modelul DNV (definește rata de eroziune în termenii raportului între masa pierdută de suprafață și masa particulelor incidente).

Modelul adoptat în vederea simulării este unul tridimensional 3D, calea de acces în fereastra *Physics* fiind *Fluid Flow* → *Single-Phase Flow* → *TurbulentFlow* → *Turbulent Flow*, $k-\omega$ (spf). Studiul efectuat este unul staționar (*stationary*). Pentru eficientizarea procesului de simulare am utilizat opțiunea de simetrie modelând doar fluxul de fluid și mișcarea particulelor în jumătate din geometrie. Pentru aceasta am construit încă un plan de lucru care, de această dată, este definit a fi identic cu planul yz al sistemului de coordonate.

Într-o primă fază a studiului am determinat viteza țiteiului, presiunea acestuia și rezistența peretelui conductei în absența particulelor contaminante. Simulării adoptate i-am adăugat un nou model fizic (*Add Physics*) pe calea *Fluid Flow* → *Particle Tracing* → *Particle Tracing for Fluid Flow* (fpt). În nodul *Particle Tracing for Fluid Flow* pentru *Particle Release* și *Propagation* se selectează opțiunea *Specify mass flow rate*. În distribuția vitezei rezultate, prezentată cadrul a două figuri, am observat că există o zonă de separare după cotul conductei care este în concordanță cu rezultatele obținute anterior. Rezolvarea acestei regiuni a fost motivul pentru care lungimea tronsonului conductei de evacuare a fost construită mai lungă decât lungimea tronsonului conductei de intrare. Pentru a calcula rata de uzură erozivă pe suprafața cotului conductei au fost abordate trei modele diferite de eroziune: Finnie, DNV și E / CRC, modele de eroziune încorporate în nodul specific eroziunii.

În capitolul VI am prezentat un studiu de caz privitor la *Proiectarea conductei de transport a gazelor naturale de la Escravos la Lagos, Nigeria*. Scopul acestui studiu, așa cum rezultă și din titlu, este acela de a proiecta un sistem de transport al gazelor naturale, cu ajutorul programului de simulare *Promax*, de la uzina de gaze Escravos până la un orașul Lagos din Nigeria, cu o lungime totală a traseului de 342 km. S-a estimat că va fi pompat un volum de gaze naturale de 633 MMSCFD (MMSCFD: million standard cubic feet per day = 1180 m³/h). În acest sens au fost dezvoltate două scenarii, constând din câte două modele fiecare, luându-se în considerare compresoarele și țevile de armare, în timp ce a avut loc cererea, în orașul Lagos, de 300, respectiv, 600 MMSCFD. Pentru fiecare scenariu, am comparat ambele metode prin estimarea costului fiecăreia dintre ele. În ambele cazuri, proiectarea compresoarelor tinde să fie mai convenabilă din punct de vedere al cheltuielilor. Desigur, chiar dacă este aleasă *metoda compresorului* pentru ambele scenarii, pentru o decizie mai bună trebuie realizat un studiu economic mai *profund* pentru ambele metode, ținându-se cont de durata de viață a proiectului, întrucât compresoarele necesită o sursă de energie continuă și o întreținere mai acută pentru a funcționa la cote maxime.

În capitolul VII am prezentat *Evaluarea riscului generat de electricitatea statică la vehicularea produselor petroliere prin conducte*, în care am analizat încărcarea electrostatică în medii potențial explozive, cu referire la circulația produselor petroliere prin conducte sau în cisterne. Am analizat cazul din noiembrie 2020 când s-a produs o explozie urmată de incendiu la o rampă de încărcare în timpul încărcării motorinei cu o conductivitate de 9,1 pS/m și cu un conținut scăzut de sulf (< 50 ppm sulf) într-o autocisternă și am prezentat

ipotezele privind mecanismul de inițiere a atmosferei explosive și factorii care au favorizat producerea evenimentului. De asemenea am prezentat măsurile care trebuie luate pentru prevenirea unor asemenea situații în viitor.

Tot pentru prevenirea acestor evenimente un factor important îl reprezintă instruirea persoanelor implicate în proiectarea, montarea, întreținerea și exploatarea instalațiilor. În acest sens mi-am propus să elaborez un suport de curs care va fi implementat în tematica de instruire a personalului din cadrul INCD INSEMEX și o procedură de evaluare a riscului de explozii - Un Instrument de verificare a instalațiilor de transport și depozitare a combustibililor lichizi. Atât suportul de curs cât și Procedura sunt în faza de finalizare și validare în vederea implementării lor în activitatea de instruire a personalului și respectiv de evaluare a instalațiilor care se desfășoară la INSEMEX Petrosani.

În capitolul IX sunt prezentate, sintetic, elementele de bază privitoare la combaterea unor defecte și a degradării conductelor de transport a țițeiului. După identificarea principalelor cauze în generarea accidentelor din perioada premergătoare dării în funcțiune a conductelor de transport a țițeiului, am prezentat ponderile modalităților de identificare a scurgerilor petroliere din perioada de exploatare a sistemelor de transport a țițeiului. Siguranța în exploatare a sistemelor de transport a lichidelor prin conducte metalice este asigurată de rezistența mecanică reziduală a acestora. În acest sens am stabilit categoriile de factori pot determina, considerabil, reducerea siguranței în exploatare. Apoi, verificarea experimentală a comportamentului la solicitări mecanice a conductelor cu diverse tipuri de defecte înseamnă, în fapt, o metodă sigură de determinare a rezistenței remanente a acestora.