

REZUMAT

CERCETĂRI PRIVIND EFECTUL MIȘCĂRII GAZELOR ASUPRA TEHNICILOR DE USCARE A ACESTORA

În contextul creșterii îngrijorărilor privind amplificarea efectelor termice ale schimbărilor climatice, Consiliul Uniunii Europene a propus reducerea (până la eliminare) a utilizării combustibililor fosili.

În acest scop se analizează implementarea noilor combustibili ecologici (regenerabili) cu scopul de reducere a amprente de dioxid de carbon, gazul natural fiind combustibilul de tranziție.

De asemenea în următoarea perioadă de timp se prevede creșterea cererii de metan, exploatarea zăcămintelor cu condensat, a celor cu gaze naturale amestecate cu gaze acide (care conțin hidrogen sulfurat, dioxid de carbon și/sau azot) precum și a zăcămintelor de petrol cu gaze naturale asociate, fapt care va necesita tratarea acestora (în vederea eliminării apei salină sau fără conținut salin, a impurităților mecanice, a condensatului și a gazelor acide).

Totodată se va accentua exploatarea zăcămintelor Offshore din apele adânci, acest fapt ducând la necesitatea amplasării echipamentelor de tratare a fluidelor petroliere extrase în zona extracție și anume pe fundul mării sau pe platforma marină.

Lucrarea de față aduce în discuție simularea proceselor de tratare, (în câmp supersonic), a gazelor naturale, accentul punându-se pe:

- a. Separarea din metan a apei,
- b. Separarea dioxidului de carbon din gazele naturale,
- c. Separarea fracțiilor grele din gazele naturale.

Astfel în primul capitol se analizează tehnicile de tratare în câmp supersonic în scopul separării impurităților din gazele naturale extrase.

Dezvoltarea tehnicilor de tratare (uscare, condiționare, separare fracționară) a gazelor naturale contaminate se datorează implementării unor procese necesare pentru eliminarea apei (provenită din acviferul salin), a detritusului (nisipul) și a impurităților asociate procesului extractiv (parafină, cerezină, argilă).

De asemeni sunt necesare procese de îndepărtare a urmelor de substanțe chimice utilizate în etapa de tratare a straturilor productive.

În cazul exploatării zăcămintelor de gaze cu condensat (gaze naturale care conțin fracții superioare de hidrocarburi), precum și a structurilor gazeifere complexe (gaze naturale cu conținut de hidrogen sulfurat, dioxid de carbon, azot, mercur și alte impurități), apare necesitatea de tratare a acestora (prin eliminarea impurităților și a fracțiilor chimice asociate), scopul acestor operații fiind acela de a nu afecta procesul de transport, prelucrare și transformare, în energie sau produse chimice cu vandabilitate mare, a gazelor naturale extrase.

Analizele efectuate pe un set de eşantioane prelevate din gazele naturale extrase din România, în perioada 2020-2025 au indicat prezența unor cantități de impurități și componente grele ce depind de:

- natura rezervei de gaz (asociată zăcămintelor de țiței, neasociată sau stocată în sisturi argiloase),
- locația geografică și petrografică a câmpului productiv,
- modul de formare a formațiunilor productive,
- compoziția sistemului hidrocarbură-apă-impurități.

În mod obișnuit, compoziția chimică a gazului natural ne indică că acesta este format în principal din metan, etan și propan.

Dar gazul natural este saturat și cu impurități care necesită operațiunii complexe de tratare și condiționare a acestuia (gazul natural trebuie să fie uscat și decontaminat) înainte de a fi livrat spre utilizare sau transformare chimică.

Prezența acestor impurități poate duce la coroziunea interioară a instalațiilor de transport și de prelucrare (ca urmare a depunerii particulelor de apă și/ sau a lovirii pereților acestora de către particulele de nisip), la blocarea instalațiilor (ca urmare a formării de criohidrați) precum și a scăderii valorii comerciale a gazului natural.

Vaporii de apă și hidrogenul sulfurat sunt impuritățile care trebuie eliminate din cauza consecințelor acțiunii acestora asupra sistemelor de transport și depozitare (coroziunea instalațiilor tehnologice și/sau formarea de acid sulfuric cu efecte catastrofale asupra securității instalației și a angajaților care le operează).

Deshidratarea este un proces de importanță extremă, necesar asigurării unei livrări în siguranță pe conducte, apa liberă inițiind formarea de gaz-hidrați.

Hidrații pot duce la o reducere a diametrului conductei de transport și ulterior a blocării capacității de transport a gazelor naturale pe conductă.

Apa contribuie, de asemenea, la coroziunea conductelor (prin formare de pile galvanice) și la reducerea valorii termice a capacității calorice a gazelor naturale.

De asemenea, este esențial ca gazul natural să fie deshidratat și decontaminat pentru procesele finale catalitice și criogenice aplicate în tehnologiile de separare a fracțiilor C3+ sau de utilizare a gazului natural ca și combustibil auto (GNL).

Majoritatea proceselor industriale și a instalațiilor de utilizare a gazelor naturale impun o puritate ridicată a metanului.

Prin urmare, condensatul (NGL) sau hidrocarburile mai grele (fracțiile C5+) trebuie separate sub punctul de rouă (de condensare) al metanului.

Metodele tradiționale de condiționare a gazului natural și de extragere a condensatului (NGL) constau în facilități cu costuri mari de capital și de operare.

Proiectarea și funcționarea acestor facilități depind în mare măsură de calitatea gazului natural și de productivitatea sondei de extracție.

Unitățile tradiționale de deshidratare și decontaminare conțin dispozitive și piese în mișcare (rotative) și necesită operațiuni complexe de mentenanță (cu personal de specialitate angajat).

De asemenea sunt necesare și programe frecvente de întreținere și de control a instalațiilor, activități care duc la producții de gaz non-conform la pornirea acestora.

Una din tehnicile cele mai noi utilizate în separarea apei din gazele naturale o reprezintă tratarea acestora în flux (câmp de curgere) supersonic, prin utilizarea unui dispozitiv (a separatorului supersonic).

Această tehnică de separare a apei (procesul de deshidratare) și a condensului (procesul de degazolinare) este utilizată din ce în ce mai mult (mai ales în spațiile reduse ale platformelor offshore).

Separatorul supersonic este o tehnologie nouă pentru separarea gazelor, proiectarea conceptuală a acestui sistem de separare, combinând în mod unic concepte din aerodinamică, termodinamică, separare fizică și fluido-dinamică, rezultând astfel o condiționare inovatoare (din punct de vedere a tehnicilor de separare a apei și a condensatului) a gazului natural extras.

Tehnicile de separare a fluidelor în câmp supersonic au fost brevetate pentru prima dată de Alferov împreună cu colaboratorii săi în 2002 și Betting împreună cu un grup de cercetare avansată în industria petrolieră, în anul 2003.

Dar prima aplicație industrială de utilizare a acestei tehnici de separare s-a realizat în anul 2003, când o echipă de ingineri de la compania Twister BV a patentat și prezentat un separator industrial (atât pentru apa din gazele naturale cât și ulterior a condensatului din gazele naturale).

Aceste dispozitive au fost instalate în câmpurile petroliere Offshore a companiilor Petronas și Sarawak Shell Berhad (SSB).

Alferov și colaboratorii săi au dezvoltat și ei un separator supersonic, pe care l-au numit Supersonic Separator Technologies ("3S").

Separatorul supersonic asigură condensarea apei și a condensatului de sondă, prevenind ulterior hidratarea gazului în procesul de tratare.

Este un dispozitiv static, necesitând puține intervenții de mentenanță și putând fi amplasat în zone de producție unde activitatea umană este redusă.

Totodată:

- nu are nevoie de inhibitori de umiditate,
- nu are piese în mișcare,
- este prietenos cu mediul,
- asigură o conservare a energie,
- nu produce deșeuri industriale.

Tehnologia realizează simultan decontaminarea gazului (extracția de CO₂, sulf, etc.), deshidratarea (eliminarea apei) și extragerea condensatului într-o singură unitate de procesare.

Un separator supersonic este de obicei compus dintr-o Duză Laval, un ciclon și un difuzor.

De astfel primul capitol analizează separarea supersonică a gazului natural, studiile publicate și studiate în cadrul acestei teze de doctorat, abordând transformările termodinamice ale gazelor naturale amestecate cu apă, impurități și condensat de sondă, studiind comportarea sistemului cu ajutorul analizei computaționale dinamice (CFD), descriind comportarea gazelor naturale (amestecate cu apă, impurități și condensat de sondă) în timpul curgerii supersonice prin diverse sisteme mecanice construite, precum și asigurând prezentarea unor modele computaționale ale unor experimente realizate în cadrul studiului curgerii supersonice a gazelor naturale amestecate cu apă, impurități și condensat de sondă prin diverse ajutaje.

În capitolul al II s-a analizat curgerea gazelor umede prin ajutaje, rolul acestuia fiind de a identifica mărimea pierderilor de presiune în urma acestor procese tehnologice.

Pentru curgerea gazelor cu apă în stare de vapori s-au determinat experimental ecuațiile de predicție a valorilor umidității specifice $\phi(y)$ la diverse presiuni ale sistemului $p_1(x)$.

Totodată am analizat și comportarea gazelor umede (gaze naturale în amestec cu apa) la curgerea prin conducte și ajutaje, creând în acest scop un model numeric necesar pentru determinarea tipului de curgere (model bazat pe inteligența artificială).

În capitolul al III-lea am analizat ecuațiile de curgere a fluidelor multifazice prin separatoarele supersonice.

Procesul fizic de separare constă în prima fază în compresia gazelor prin ajutorul inițial (duza Laval), unde viteza supersonică se obține prin accelerarea fluxului de gaze subsonice.

În cadrul acestui proces gazul umed poate fi accelerat până la viteza critică (în zona redusă viteza gazului poate să depășească viteza sunetului), apoi va trece în partea expansivă a sistemului și deci la scăderea presiunii și menținerea vitezei (chiar creșterea ei).

În a doua etapă are loc dispersia gazelor umede în particule (gaz, apă, condensat) cu viteze diferite, funcție de greutatea acestora. Urmează o etapă de separare a particulelor de apă și apoi coalescența acestora .

Această etapă se încheie cu separarea gazelor umede în particule și bule de gaz natural.

Plecând de la ideea că separatoarele supersonice combină proprietățile de răcire ale unui gaz umed la trecerea printr-un sistem format dintr-o duză convergentă-divergentă, cu principiile separării centrifuge am analizat tipurile de separatoare supersonice.

Analiza dispozitivelor Twister Mark, au demonstrat eficiența acestora față de instalațiile clasice de separare a apei și condensatului din fluxul bifazic al gazelor prelucrate, având costuri de capital mai mari dar costuri de operare mai mici.

În cadrul acestui capitol s-a analizat și separatorul integrat utilizat pentru separarea apei în câmp supersonic, care se bazează pe utilizarea tehnologiei 3S.

Ca o noutate a studiilor realizate în acest domeniu s-au prezentat datele oferite de simulările pe echipamentele de separare supersonică a lichidelor din gazele asociate extrase din structurile petroliere, instalații create de Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL și Beijing University of Technology .

Concluziile parțiale ale acestui capitol se bazează pe faptul că aplicarea separatoarelor supersonice în tratarea gazelor naturale a fost studiată și pusă în practică în ultimile trei decenii.

Mai multe aspecte ale tehnologiei, inclusiv designul fizic, sensibilitatea la curgerea fluxului de fluid petrolier și diverse caracteristici de proiectare, cum ar fi generarea de vârtaj și proprietățile difuzorului, au fost studiate folosind tehnici analitice, numerice și experimentale.

Dinamica fluxului de gaz în fază unică și pură, precum și sensibilitatea la curgerea fluxului la intrare, caracteristicile geometrice și modelele termodinamice ale gazului au fost abordate.

De asemenea, s-au analizat studiile termodinamice privind condensarea și comportamentul de fază a fluidelor bifazice.

Studiile curgerii și separării fluidelor multifazice includ și analize efectelor fiecărei faze asupra instalației cercetate.

Dar caracterul unic al acestei separării fazelor componente (particule cu dimensiuni între 10^{-9} și 10^{-6} m,) necesită o atenție specială atât în modelare, cât și în studiile experimentale.

Efectele filmului lichid pe perete a fost studiat deoarece se poate asigura creșterea cantității de apă care staționează și deci posibilitatea formării de hidrați.

Dispozitivele de generare a vârtejului sunt, de asemenea, o parte importantă a proiectării acestor separatoare, iar cercetările ulterioare vor îmbunătăți semnificativ eficiența generării acestora.

În capitolul IV am studiat separarea dioxidului de carbon din gazele naturale.

Creșterea temperaturilor mediului ambiant și trecerea naturii la două anotimpuri, impune luarea unor decizii cruciale pentru asigurarea sustenabilității în viitor.

Tocmai de aceea Uniunea Europeană prin Directiva Net-Zero, a propus accelerarea tranziției spre o neutralitate climatică, prin impunerea eliminării utilizării combustibililor fosili.

Dar trecerea la utilizarea de combustibili energetici cu emisii de CO₂ reduse spre zero duce în prima fază la acceptarea gazului natural ca și combustibil de tranziție.

În aceste condiții, consumul de gaze naturale va crește în viitor, fiind necesare tehnologii de exploatare a zăcămintelor de condensat și de gaze impurificate.

În prezent metodele de eliminare a CO₂ din gazele naturale cuprind procese de adsorbție chimică, adsorbție fizică, condensare și utilizare de membrane de separare.

Necesitatea eliminării dioxidului de carbon din gazele naturale se datorează:

- a. Posibilității formării de gaz hidrați (gheață carbonică) în conductele de transport,
- b. Reducerii capacității calorice a acestora,
- c. Riscului în exploatarea și utilizarea gazelor naturale în instalații chimice și de producție a energiei electrice.

Metodele clasice de îndepărtare a dioxidului de carbon sunt consumatoare de energie și de asemeni necesită produse chimice ce trebuiesc ulterior reprocessate.

Datorită necesității îmbunătățirii eficienței energetice și de conservare (protecție) a mediului ambiant, s-a propus utilizarea separatoarelor supersonice.

Prin analiza efectuată în acest capitol, am studiat modul de utilizare a tehnologiei supersonice în eliminarea dioxidului de carbon din gazele naturale extrase și de asemeni am prezentat un model numeric complex, care să se bazeze pe utilizarea inteligenței artificiale în

ceea ce privește etapele de separare a acestui gaz (dioxidul de carbon), în vederea captării și stocării acestuia.

În prima parte am studiat tehnologiile de absorbție chimică folosind un solvent (pe bază de amină) necesar pentru captarea dioxidului de carbon în sistemul de captare post-combustie.

În urma analizării literaturii de specialitate și a modelării experimentale am constatat că aminele sunt substanțe puternic absorbante în intervalul 0-500 kPa, apoi curba de absorbție fiind aplatizată.

De asemenea am mai constatat următoarele aspecte:

- a. între 0 și 10 kPa, absorbția este mai bine descrisă de relația lui Jones,
- b. în intervalul 0-10 kPa absorbția cea mai bună o au soluțiile de MEA,
- c. între 10 și 2873 kPa cea mai bună absorbție a prezintă soluțiile de MEA, dar relația cea mai apropiată de realitate este cea ce descrie experimentul lui Lee,
- d. soluțiile de DEA 2 M sunt mai absorbante decât soluțiile de DEA 4 M,
- e. soluțiile MDEA sunt mai puțin absorbante dar sunt cele mai ieftine,
- f. de menționat că toate experimentele s-au efectuat la 40 °C, deci rezultatele sunt comparabile,
- g. de asemenea se observă că la presiunea parțială de 2873 kPa se reușește ca absorbția să fie 1/1 mol CO₂/mol amină.

Totodată în acest capitol am analizat separarea dioxidului de carbon și a azotului cu ajutorul separatorului supersonic.

Acesta se poate proiecta prin asigurarea condițiilor de trecere a celor două gaze în fază lichidă, urmată de preluarea acestora în picături, colectate în zona de condensare.

Curgerea bifazică prin sistemul convergent-divergent este un domeniu de cercetare provocator datorită fenomenelor complexe de separare și curgere.

Primul proces de curgere este fluxul de sufocare (gâtuire) a amestecului în duza convergentă.

Urmează expansiunea rapidă și depresurizarea fluxului bifazic ce duce la subrăcirea vaporilor uscații.

Apoi condensarea și fenomenul de nucleație (aglomerare/coalescență) spontană va fi declanșată din cauza suprasaturării picăturilor.

În unele situații lichidul poate fi supraîncălzit din cauza reducerii drastice de presiune și apoi va avea loc procesul de alipire sub forma unui film pe suprafața metalică a dispozitivului.

În ciuda validării recente la scară largă a captării CO₂ pe bază de amine, obstacolul tratării acestora a dus la dezvoltarea de alte tehnologii de separare a dioxidului de carbon.

Printre aceste tehnologii sunt celulele de combustibil cu carbonat topit, separarea pe membrane, captare cu combustie sub presiune, separarea supersonică și anti-sublimare de flux.

În acest capitol am demonstrat că cea mai simplă alternativă la tratarea cu amine este utilizarea expansiunii supersonice.

Capacitatea de separare supersonică poate duce la o gestionare a unei game largi de impurități și condițiile de funcționare pot fi avantajoase.

Flexibilitate în adaptarea la diferite compoziții ale gazului de alimentare, iar nivelurile de impurități ce pot fi separate pot oferi beneficii de cost în comparație cu alte tehnici de purificare mai utilizate în prezent.

În urma analizei unui separator supersonic de CO_2 am putut trage următoarele concluzii:

a. După formarea picăturilor, îndepărtarea CO_2 se realizează numai dacă peretele separator captează pelicula lichidă și o lasă să curgă către colector.

b. Prin urmare, pe lângă eficiența de lichefiere, eficiența separării este, de asemenea, un indice important de luat în considerare.

c. În timpul procesului de separare, o parte din picăturile de CO_2 lichefiat intră în rezervorul de colectare. În schimb, partea rămasă curge din gazul uscat apoi se regazeifică.

d. Se poate observa că eficiența de separare crește odată cu creșterea presiunii de intrare.

Ultimul capitol analizează separarea apei și a fracțiilor grele (condensatului de sondă) în sistem supersonic, descriind ecuațiile de curgere în fiecare parte constructivă a duzei Laval.

Pe baza analizei literaturii de specialitate prezentate în capitolul I, II, III, modelele numerice create în cadrul acestei teze dezvoltă un potențial mare de lucru ca și instrument rapid și precis și permite simularea și proiectarea instalațiilor de separare supersonică a apei din gazele naturale.

Deși modelele numerice sunt mai puțin cuprinzătoare și detaliate decât modelele CFD, s-a dovedit că pot produce rezultate precise, comparabile cu cele ale modelelor CFD și a datelor experimentale obținute în timpul simulărilor.

Astfel, aceste modele servesc ca un instrument excelent pentru proiectele preliminare care necesită încărcări computaționale mai mici.

Obiectivul acestui ultim capitol este de a prezenta un model termodinamic unidimensional riguros care să simuleze separatorul supersonic.

Scopul este ca modelul creat să introducă îmbunătățiri în anumite aspecte ale lucrărilor din literatură și să ofere o tehnică de determinare a poziției fluxului lateral și a unde de șoc.

Dezavantajele notabile ale lucrărilor existente din literatură includ:

- neluarea în calcul a fluxului multifazic,
- modelarea duzelor este realizată fără a proiecta concret fluxurile laterale,
- utilizarea fluidelor de lucru în mod simplificat (maxim 2 faze și 2 compuși),
- nu se simulează în totalitate calculul vitezei termodinamice a sunetului, care este un parametru esențial pentru găsirea numărului Mach,
- nu este luat în calcul fluxul turbionar,
- sunt necesare încărcări computaționale mari,
- nu s-a modelat în totalitate perioada timpului de simulare, pe întreg proces de separare.

Unele dintre aceste aspecte sunt tratate în acest capitol oferind un model mai riguros, mai rapid și mai precis pentru separarea supersonică.

Contribuțiile personale și direcțiile de cercetare în viitor a separării supersonice sunt descrise la finalul acestei lucrări.

În realizarea acestei teze de doctorat s-a studiat o bogată literatură de specialitate (120 de referințe bibliografice).

De asemeni părți din teză au fost diseminate în cele 10 articole publicate în reviste de specialitate și 16 articole prezentate la diverse conferințe internaționale și publicate în rezumat în lucrările acestora.

BIBLIOGRAFIE

1. R.F. Aguilera, (2014). The role of natural gas in a low carbon Asia Pacific, Appl. Energy 113, 1795–1800.
2. W.S. Lin, N. Zhang, A.Z. Gu, (2010). LNG (liquefied natural gas): a necessary part in China's future energy infrastructure, Energy 35, 4383–4391.
3. <https://www.contributors.ro/colapsul-energetic-al-romaniei/>, accesat 1.5.2024.
4. <https://www.transgaz.ro/ro/clienti/servicii-de-transport/calitatea-gazelor> accesat 1.5.2024.
5. T. Chis, R. Radulescu, (2021). Prelucrarea și transportul gazelor, Editura Universitatii Petrol-Gaze , ISBN 9878-973-719-822-8.
6. T.Chis, (2019). Cercetari privind optimizarea proceselor din transportul si depozitarea titeiului, produselor petroliere si a gazolinei, Editura Estfalia, I.S.B.N. 978-606-757-026-7.
7. R. S. Mohammad, D. Barsan, T. Chis, D. Stoianovici , (2023). Numerical Modeling of Ground Water Treatment through Ceramic Membranes, Engineering and Technology Journal e-ISSN: 2456- 3358, Volume 08, Issue 08, August, Page No.2635-2643, DOI: 10.47191/etj/v8i8.21, <http://everant.org/index.php/etj/article/view/1003/701>.
8. R. S. Mohammad, D.Stoianovici, T. Chis, D. Iancu, (2023). Neuronal Modeling of Water Properties on Oil Field, **International Journal of Engineering Research and Reviews**, ISSN 2348-697X (Online), Vol. 11, Issue 3, July 2023 - September 2023, Page No: 48-58, <https://www.researchpublish.com/papers/neuronal-modeling-of-water-properties-on-oil-field>.
9. W. Ye, J. Lin, H.T. Madsen, E.G. Søgaaard, C. Hélix-Nielsen, P. Luis, B. Van der Bruggen, (2016). Enhanced performance of a biomimetic membrane for Na₂CO₃ crystallization in the scenario of CO₂ capture, J. Membr. Sci. 498, 75–85.
10. M. Betting, T. Van Holten, C.A. Tjeenk Willink, (2003). US Patent, 6,513,345, April 2.
11. J. Brouwer, H. Epsom, (2003). Twister supersonic gas conditioning for unmanned platforms and subsea gas processing, Offshore Europe Conference.
12. <https://www.twisterbv.com/about/> accesat 5.5.2024.
13. V.I. Alferov, L.A. Baguirov, V. Feygin, A. Arbatov, S. Imaev, L. Dmitriev, V.I. Rezenenko, (2003).US Patent, 6,372,019, April 16.
14. A. Karimi, M.A. Abdi, (2009). Selective dehydration of high-pressure natural gas using supersonic nozzles, Chem. Eng. Process. Process Intensif. 48, 560–568.

15. C. Wen, X. Cao, Y. Yang, K. Zhang, (2011). Swirling effects on the performance of supersonic separators for natural gas separation, *Chem. Eng. Technol.* 34 1575–1580.
16. W. Parrish, A. Kidnay, (2006). *Fundamentals of Natural Gas Processing*, CRC Press Taylor & Francis Group, Florida.
17. S.H.R. Shooshtari, A. Shahsavand, (2013). Reliable prediction of condensation rates for purification of natural gas via supersonic separators, *Sep. Purif. Technol.* 116, 458–470
18. P.B. Machado, J.G.M. Monteiro, J.L. Medeiros, H.D. Epsom, O.Q.F. Araujo, (2012). Supersonic separation in onshore natural gas dew point plant, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 6, 43–49.
19. J. Zhao, P. Liu, D. Hu, (2014). Flow and separation performance of supersonic gas separator, *Appl. Mech. Mater.* 552, 3–7.
20. R. Secchi, G. Innocenti, D. Fiaschi, (2016). Supersonic swirling separator for natural gas heavy fractions extraction : 1D model with real gas EOS for preliminary design, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 34, 197–215.
21. O. Kunz, W. Wagner, (2012). The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: An expansion of GERG-2004, *J. Chem. Eng. Data.* 57, 3032–3091.
22. O. Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, M. Jaeschke (2007). The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixtures GERG TM15, <https://www.gerg.eu/wp-content/uploads/2019/10/TM15.pdf>.
23. M. Castier, (2014). Modeling and simulation of supersonic gas separations, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 18, 304–311.
24. C. Wen, X. Cao, Y. Yang, J. Zhang, (2012). Evaluation of natural gas dehydration in supersonic swirling separators applying the Discrete Particle Method, *Adv. Powder Technol.* 23, 228–233.
25. M. Castier, (2016). Effect of side streams on supersonic gas separations, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 35, 299–308.
26. W. Chuang, C. Xuwen, Y. Yan, Z. Jing, (2011). Supersonic swirling characteristics of natural gas in convergent-divergent nozzles, *Pet. Sci.* 8, 114–119.
27. W. Sun, X. Cao, W. Yang, X. Jin, (2017). Numerical simulation of CO₂ condensation process from CH₄-CO₂ binary gas mixture in supersonic nozzles, *Sep. Purif. Technol.* 188, 238–249.
28. J. Bian, W. Jiang, L. Teng, Y. Liu, S. Wang, Z. Deng, (2016). Structure improvements and numerical simulation of supersonic separators, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.* 110, 214–219.
29. D.A. Salikaev, O.A. Gumerov, (2016). Study of supersonic separation of associated petroleum gas using UNISIM DESIGN R400, *Oil Gas Bus.* 2, 151–189.
30. F.M. Mohd Hashim, M.F.A. Ahmad, (2014). Numerical simulation of supersonic subsea compact wet gas separator for gas transmission pipeline, *Appl. Mech. Mater.* 607, 298–302

31. L. de O. Arinelli, T.A.F. Trotta, A.M. Teixeira, J.L. de Medeiros, O. de Q.F. Araujo, (2017). Offshore processing of CO₂ rich natural gas with supersonic separator versus conventional routes, *J. Nat. Gas Sci. Eng.* 46, 199–221.
32. W. Chuang, C. Xuwen, Y. Yan, F. Yuqing, (2015). Prediction of mass flow rate in supersonic natural gas processing, *Oil Gas Sci. Technol.* 70, 1101–1109.
33. M. Qingfen, H. Dapeng, H. Gaohong, H. Shijun, L. Wenwei, X. Qiaolian, W. Yuxin, (2009). Performance of inner-core supersonic gas separation device with Droplet Enlargement Method, *Chinese J. Chem. Eng.* 17, 925–933.
34. B. Lingling, L. Zhongliang, L. Hengwei, J. Wenming, Z. Ming, Z. Jian, (2010). Phase equilibrium calculation of multi-component gas separation of supersonic separator, *Sci. China Technol. Sci.* 53, 435–443.
35. S.H.R. Shooshtari, A. Shahsavand, (2017). Maximization of energy recovery inside supersonic separator in the presence of condensation and normal shock wave, *Energy.* 120, 153–163.
36. K. Wark, (1995). *Advanced Thermodynamics for Engineers*, McGraw-Hill, New York.
37. I.Dutu, D.Barsan, T Chis., (2023). Modelarea câmpurilor de presiune și saturație, AL XX - lea SIMPOZION NAȚIONAL STUDENȚESC „GEOECOLOGIA” PETROȘANI, 12-13 mai 2023 <http://www.upet.ro/geoeco/>, ISSN 2559-2106 ISSN-L 1842-4430.
38. I.Oprea, D.Barsan, T.Chis, (2023). Nucleația criohidraților, AL XX - lea SIMPOZION NAȚIONAL STUDENȚESC „GEOECOLOGIA” PETROȘANI, 12-13 mai 2023 <http://www.upet.ro/geoeco/>, ISSN 2559-2106 ISSN-L 1842-4430.
39. I.Dutu, D.Stoianovici, T.Chis, D.Bârsan, D.Sulaiman (2023). Transition zone analysis in petroleum formations with mixed or preferential water wettability, *Journal of Energy Research and Reviews*, 13(3), <https://doi.org/10.9734/JENRR/2023/v13i4269>.
40. I.Oprea, , D.Stoianovici , T.Chis , D.Bârsan , (2023). A New Relationship for the Prediction of the Formation of Gas Hydrate in Fluids Petroleum. *Journal of Energy Research and Reviews*, 13(3), 41–60. <https://doi.org/10.9734/jenrr/2023/v13i3264>.
41. D. Bârsan, T. Chis, (2024). Separation of water from natural gases , CHIMIA 2024, 30th of May – 1st of June 2024, Constanta, Romania, OVIDIUS UNIVERSITY PRESS, CONSTANȚA 2024 , ISSN 2360-3941,
42. M.J. McCarthy, N.A. Molloy, (1974). Review of stability of liquid jets and the influence of nozzle design, *Chem. Eng. J.* 7, 1–20.
43. D.Bârsan, T.Sandu, M. Helstern, T.Chiș, (2022). Use of composite materials to reduce the water content of extracted natural gas, *EmergeMAT*, 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN MATERIALS ENGINEERING 27-28 October 2022, Bucharest, Romania ISSN 2602-0424 ISSN-L 2602-0416.

44. D.Bârsan, M. Helstern, T.Sandu, T.Chiş, (2022). Drying of gases in droplet separators, 22nd Romanian International Conference on Chemistry and Chemical Engineering, Sinaia, ROMANIA - September 7 – 9, 2022.
45. B. Monachan, R. J. Thomas, D. Steaphen, M. Skaria, K.A. Shafi. (2019). Simulation of Stratified Two-phase Flow Regime using Air-. Water Model in ANSYS Fluent® , International Conference on Aerospace and Mechanical Engineering, ICAME'18, Journal of Physics: Conference Series 1355 , 012014 IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1355/1/012014.
46. De Schepper, C K Sandra, G J Heynderickx and G B Marin,(2008). CFD modeling of all gas liquid and vapor–liquid flow regimes predicted by the Baker chart Chemical Engineering Journal Vol 138(1-3) 349–357.
47. I Lun, R K Calay and A E Holdo, (1996). Modelling two-phase flows using CFD Applied Energy Vol 53 299–314.
48. S Ghorai and K D P Nigam, (2006). CFD modeling of flow profiles and interfacial phenomena in two-phase flow in pipes Chemical Engineering and Processing Vol 45 55–65.
49. J N Al-Sheikh, D E Saunders and R S Brodkey, (1970). Prediction of flow patterns in horizontal two-phase pipe flow Canadian Journal of Chemical Engineering Vol 48 21-29.
50. J M Mandhane, G A Gregory and K Aziz, (1974). A flow pattern map for gas liquid flow in horizontal pipes Int. Journal of Multiphase Flow Vol 1(4) 537–553.
51. H A Johnson and A H Abou-Sabe, (1952). Heat Transfer and Pressure drop in a Horizontal Pipe Trans. ASME, Vol 74 977–987.
52. G E Alves, (1954). Co-current liquid-gas flow in a pipe-line contactor Chemical Engineering Progress Vol 50 449–456.
53. R F Barron, (1999). Cryogenic heat transfer Louisiana Tech University Ruston Louisiana.
54. M Guilizzoni, (2013). Flow pattern identification in gas liquid flows by means of phase density imaging Int. Journal of Multiphase Flow Vol 51 1–10.
55. S B Kumar, D Moslemian, M P Dudukovic, (1995). A γ -ray tomographic scanner for imaging voidage distribution in two-phase flow systems Flow Measurement and Instrumentation Vol 6 (1) 61–73.
56. V. Piemonte, M. Maschietti, F. Gironi , A Triethylene Glycol–Water System: A Study of the TEG Regeneration Processes in Natural Gas Dehydration Plants , Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects <http://www.tandfonline.com/loi/ueso20>.
57. I.P. Jones, P.W.Guilblert, M.P. Owens, I.S.Hamill, C.A. Montavon, J.M. Penrose, B. Prast, (1992). The Use of Coupled Solvers for Complex Multi-phase and Reacting Flows. Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries. CSIRO, Melbourne, Australia.

58. R. Garret, W. Oehlschlager, J. Tomich, (1968). Vapor-liquid separation at supersonic velocities. J. Eng. Ind. 90 (4), <https://doi.org/10.1115/1.3604696>.
59. Garret, R.L., McDonald, W.J.J., (1970). Supersonic Flow Separator With Admixing. U. S. Patent 3528218.
60. Garret, R.L., McDonald, W.J.J., (1970). Triangular Supersonic Flow Separator. U. S. Patent 3528221.
61. Garret, R.L., 2 February, (1971). Supersonic Flow Separator. U. S. Patent 3559373.
62. Garret, R. L., 15 September, (1970). Supersonic Flow Separator with Film Flow Collector. U. S. Patent 3528217.
63. Linhardt, H. D., Beveridge, J. H., (1981). Curved Duct Separator for Removing Particulate Matter from a Carrier Gas. U. S. Patent 4292050.
64. Nasikas, A., (1994). Method and Mechanism for the Supersonic Separation of Droplets from a Gas Stream. U. S. Patent 5306330.
65. A. A. Nassikas, C. B. Akritidis, (1991). Dryino heat pump with supersonic SEPARAMR. Drying Technology, 9(4), 1105–1114. <https://doi.org/10.1080/07373939108916736>.
66. B. Prast, , R. Van Dam, J.F.H. Willems, M. Van Dongen , (1996). Formation of nanosized water droplets in a supersonic expansion flow. J. Aerosol Sci. 27 (Suppl. 1), <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0021850296001462> .
67. P. Schinkelshoek , H.D. Epsom, (2006). Supersonic Gas Conditioning Introduction of the Low Pressure Drop Twister. Grapevine, TX.
68. Fred T. Okimoto, Job M. Brouwer, (2003). Twister supersonic gas conditioning-studies, applications and results." GPA Annual Convention Proceedings..
69. V.Kalikmanov , M.Betting, D.Smeulders , (2007). New developments in nucleation theory and their impact on natural gas separation. In: SPE Annual Technical-Conference and Exhibition, Anaheim, CA, USA.
70. Genesis Oil & Gas Consultants Ltd, (2008). Twister NGL Recovery Study – Technical Note. Genesis Oil & Gas Consultants Ltd, London, UK,
71. V.Feygin , S.Imayev, V. Alfeyorov , L.Bagirov, L. Mitriev, J. Lacey, (2006). Supersonic gas technologies. In: International Gas Union World Gas Conference, Amsterdam, The Netherlands.
72. A.Karimi, (2006). Selective Dehydration of High Pressure Natural Gas Using Supersonic Nozzle. Masters Thesis. Memorial University of Newfoundland, St. John's, NL.
73. H. Liu , Z. Liu, Y.Feng, K.Gu, T. Yan, (2005). Characteristics of a supersonic swirling dehydration system of natural gas. Chin. J. Chem. Eng. 13 (1).
74. H. Liu, , Z.Liu, J. Zhang, K. Gu, T. Yan, , (2005). A new type of dehydration unit of natural gas and its design considerations. Prog. Nat. Sci. 15 (12).
75. Z. Liu, J. Ding, W. Jiang, J. Zhang, Y.Feng, (2008). Numerical simulation of highly swirling supersonic flow inside a laval nozzle. Prog. Comput. Fluid Dyn. 8.

76. X. Liu, Z. Liu, Y. Li, (2014). Investigation on separation efficiency in supersonic separator with gas-droplet flow based on DPM approach. *Sep. Sci. Technol.* 49 (17).
77. C.Wen, X.Cao, Y.Yang, J.Zhang, (2011). Swirling effects on the performance of supersonic separators for natural gas separation. *Chem. Eng. Technol.* 34 (9).
78. E.Eslamian, H.Shirvani, A.Shirvani, (2012). Numerical investigation of swirl flow inside a supersonic nozzle. In: Rahman, E., Brebbia, C. (Eds.), *Advances in Fluid Mechanics IX*. WIT Press.
79. D.Bârsan , T.Chiș, L. Prodea,(2024). Water separation in natural gas pipelines, SICHEM 2024, Bucharest, 11-12.04.2024, ISSN 2537-2254, 80-81.
80. D.Bârsan, D.O. Cirjan, , M Stoicescu, (2024). Treatment of hydrocarbon-polluted waters through oxygen and ozone nanobubble technology , CHIMIA 2024, 30th of May – 1st of June 2024, Constanta, Romania, OVIDIUS UNIVERSITY PRESS, CONSTANȚA 2024 , ISSN 2360-3941.
81. D.Bârsan, T.Sandu, M.Helstern, Chis T., (2022). Mathematical modeling by water recovery to natural gas extraction to artificial neural networks, SICHEM 2022, Book of Abstract, ISSN 2537-2254, 17-18 November 2022.
82. R.S.Mohammad, D.Bârsan, D.Stoianovici, T.Chis, (2022). Numerical modeling of ground water treatment through ceramic membranes, SICHEM 2022, Book of Abstract, ISSN 2537-2254, 17-18 November, 2022,
83. M. Betting, H.D. Epsom, (2007) Supersonic separator gains market acceptance. *World Oil* 254 , 197–200.
84. https://single-market-economy.ec.europa.eu/industry/sustainability/net-zero-industry-act_en, accesat 1.6.2024.
85. C. A. Scholes, G. W. Stevens, S. E. Kentish, (2012). Membrane gas separation applications in natural gas, processing. *Fuel*, 96, 15–28. DOI 10.1016/j.fuel.2011.12.074.
86. Sandu T., Helstern M, Bârsan D, Chiș T. (2022). Numerical modeling of CO₂ adsorption in aqueous-alkanolamine solutions- EmergeMAT, 5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN MATERIALS ENGINEERING 27-28 October 2022, Bucharest, Romania ISSN 2602-0424 ISSN-L 2602-0416,
87. O.Koku, S., Perry, J. K. Kim, (2014). Techno-economic evaluation for the heat integration of vaporisation cold energy in natural gas processing. *Applied Energy*, 114, 250–261. DOI 10.1016/j.apenergy.2013.09.066.
88. X.W. Cao, J.Bian, (2019). Supersonic separation technology for natural gas processing:A review. *Chemical Engineering and Processing-Process Intensification*, 136, 138–151. DOI 10.1016/j.cep.2019.01.007.
89. W. Zhanga, D.Wanga, A.Renganathana, H. Zhangb, (2020). Modeling and assessment of two-phase transonic steam flow with condensation through the convergent-divergent

nozzle, [Nuclear Engineering and Design, Volume 364](#), 1 August 2020, 110632, <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2020.110632>.

90. E. Lakzian, Shi. Yazdani, F. Salmani, O. Mahian, H. D. Kim, M. Ghalambaz, H. Ding, Y. Yang, B. Li, C. Wen, (2024). Supersonic separation towards sustainable gas removal and carbon capture Progress in Energy and Combustion Science 103 (2024) 101158,
91. T. Ahmed, (2018). Reservoir engineering handbook. Gulf professional publishing; 2018.
92. H. Fatoorehchi, H. Abolghasemi, R. Rach, (2014). An accurate explicit form of the Hankinson–Thomas–Phillips correlation for prediction of the natural gas compressibility factor. J Petrol Sci Eng 2014;117:46–53.
93. R. Arina (2004). Numerical simulation of near-critical fluids. Appl Numer Math 2004;51 (4):409–26. <https://doi.org/10.1016/j.apnum.2004.06.002>.
94. G.V. Molleson, Al. Stasenko (2005). An axisymmetric flow of a mixture of real gases with a condensing component. High Temp 2005;43(3):419–28. <https://doi.org/10.1007/s10740-005-0080-x>.
95. D.V. Nichita, P. Khalid, D. Broseta, (2010). Calculation of isentropic compressibility and sound velocity in two-phase fluids. Fluid Phase Equil 2010;291(1):95–102. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2009.12.022>.
96. Firoozabadi A, Pan H. Two-phase isentropic compressibility and two-phase sonic velocity for multicomponent-hydrocarbon mixtures. SPE Reservoir Eval Eng 2000;3(4):335–41. <https://doi.org/10.2118/65403-pa>.
97. M. Castier, (2011). Thermodynamic speed of sound in multiphase systems. Fluid Phase Equil 2011;306(2):204–11. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.04.002>.
98. P.H. Niknam, H.R. Mortaheb, B. Mokhtarani, (2017). Optimization of dehydration process to improve stability and efficiency of supersonic separation, J. Nat. Gas Sci. Eng. 43 (2017) 90–95.
99. O. Kunz, W. Wagner, (2004). The GERG-2008 wide-range equation of state for natural gases and other mixtures: an expansion of GERG-2004. J Chem Eng Data 2012;57 (11):3032–91. [110] Starling KE, Savidge JL. Compressibility factors of natural gas and other related hydrocarbon gases. AGA, American Gas Association 1992.
100. D.A. Salikaev, O.A. Gumerov (2016). Study of supersonic separation of associated petroleum gas using unisim design R400. Oil and Gas Business 2016;(2):151–89. <https://doi.org/10.17122/ogbus-2016-2-151-189>.
101. D.A. Simpson, A.J. White, (2005). Viscous and unsteady flow calculations of condensing steam in nozzles. Int J Heat Fluid Flow 2005;26(1):71–9. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.04.002>.
102. H. Vijayakumaran, T.A. Lemma. CFD modelling of non-equilibrium condensation of CO₂ within a supersonic nozzle using metastability approach. J Nat Gas Sci Eng 2021;85. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103715>.

103. H. Fatoorehchi, H. Abolghasemi, R. Rach, M. Assar, (2014). An improved algorithm for calculation of the natural gas compressibility factor via the Hall-Yarborough equation of state. *Can J Chem Eng* 2014;92(12):2211–7.
104. O.F. Hagen, W. Obert, Cluster formation in expanding supersonic jets: effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas, *J. Chem. Phys.* 56 (1972) 1793–1802.
105. X. Xuwen Cao, J. Jiang Bian, Supersonic separation technology for natural gas processing: A review, *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification* Volume 136, February (2019), Pages 138–151, <https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.01.007>.
106. T. Sandu, M. Helstern, D. Bârsan, T. Chis, (2022). Use of artificial neural network to oil recovery by CO₂ injection, *SICHEM 2022*, Book of Abstract, ISSN 2537-2254, 17–18 November, 2022,
107. Y. Wang, D. Hu, (2018). Structure improvements and numerical simulation of supersonic separators with diversion cone for separation and purification. *RSC Advances*, 8(19), 10228–10236. DOI 10.1039/C7RA13198D.
108. X. W. Liu, Z. L. Liu, (2017). Numerical investigation and improvement strategy of flow characteristics inside supersonic separator. *Separation Science and Technology*, 53(4), 940–952. DOI 10.1080/01496395.2017.1388256.
109. W. J. O. A. Alnoush, (2018). Shortcut modeling of natural gas supersonic separation, Thesis, Texas A&M University,
110. C. Wen, X. Cao, Y. Yang, K. Zhang, (2011). Swirling effects on the performance of supersonic separators for natural gas separation. *Chemical Engineering Technology*. 34. 1575–1580. Copyright Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Reproduced with permission.
111. E. Jassim, M.A. Abdi, Y. Muzychka, (2008). Computational fluid dynamics study for flow of natural gas through high-pressure supersonic nozzles: Part 1. real gas effects and shockwave, *Pet. Sci. Technol.* 26 , 1757–1772
112. A. Firoozabadi, H. Pan, (2000). Two-phase isentropic compressibility and two-phase sonic velocity for multicomponent-hydrocarbon mixtures, *SPE Reserv. Eval. Eng.* 3 , 5–8.
113. A.B. Wood, (1930). A textbook of sound: being an account of the physics of vibrations with special reference to recent theoretical and technical developments, The Macmillan Company, New York.
114. M.L. Michelsen, (1982). The isothermal flash problem. Part I. Stability, *Fluid Phase Equilib.* 9, 1–19
115. M.L. Michelsen, (1982). The isothermal flash problem. Part II. Phase-split calculation, *Fluid Phase Equilib.* 9, 21–40.
116. Y. Yang, C. Wen, S. Wang, Y. Feng, (2014). Effect of inlet and outlet flow conditions on natural gas parameters in supersonic separation process, *PLoS One*. 9.

117. C. Wen, A. Li, J. Honore, Y. Yang, (2016). Effect of swirling device on flow behavior in a supersonic separator for natural gas dehydration, Sep. Purif. Technol. 168, 68–73.
118. D.Y. Peng, D.B. Robinson, (1976). A new two-constant equation of state, Ind. Eng. Chem. Fundam. 15 59–64.
119. T.Y. Kwak, G.A. Mansoori, (1986) . Rules for Cubic Equations, Chem. Eng. Sci. 41 1303–1986.
120. C. H. Twu, V.Tassone, W. D. Sim, S.Watanasiri, (2005). Advanced equation of state method for modelling TEG–water for glycol gas dehydration. Fluid Phase Equilibria 228–229:213–221.