

Modelowanie numeryczne zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągach transportujących zanieczyszczone CO₂

Numerical modeling of hydraulic shock phenomena in pipelines transporting contaminated CO₂

Ferdinand Uilhoorn, Maciej Chaczykowski, Andrzej J. Osiadacz, Tomasz Bleschke, Łukasz Kotyński ^{*}

Słowa kluczowe: uderzenie hydrauliczne, transport CO₂ rurociągiem, zanieczyszczenia, równanie stanu, rurociąg podmorski

Streszczenie

Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla (CCS) odgrywa kluczową rolę w ograniczaniu emisji CO₂ z elektrowni opalanych paliwami kopalnymi oraz z przemysłu wysokoemisyjnego. W łańcuchu CCS istotne znaczenie ma projektowanie i bezpieczna eksploatacja rurociągów transportujących CO₂. Rurociągi te są wyposażone w systemy zabezpieczające, które monitorują warunki transportu oraz skład mieszaniny CO₂. Automatycznie przerywają pracę w przypadku przekroczenia dopuszczalnych limitów zanieczyszczeń. Nagłe zamknięcie zaworu, często określane jako uderzenie hydrauliczne, powoduje powstanie fali ciśnienia, która może prowadzić do poważnych uszkodzeń systemu. Scenariusze związane z uderzeniami hydraulicznymi, szczególnie w rurociągach o dużych średnicach transportujących zanieczyszczone CO₂, zostały dotychczas słabo przebadane. W niniejszym artykule opracowano model jednorodnego przepływu, w celu analizy ryzyka wystąpienia przemiany fazowej podczas uderzenia hydraulicznego. Wymianę ciepła między strumieniem CO₂ a otoczeniem modelowano przy użyciu okresowych warunków brzegowych. Uwzględniono zanieczyszczenia pochodzące z technologii wychwytywania dwutlenku węgla przed i po spalaniu oraz ich mieszanki.

Keywords: hydraulic shock, CO₂ pipeline transport, contamination, equation of state, offshore pipeline

Abstract

Carbon capture and storage (CCS) plays a key role in reducing CO₂ emissions from fossil fuel-fired power plants and high-emission industries. The design and safe operation of CO₂ transport pipelines are crucial in the CCS chain. These pipelines are equipped with safety systems that monitor transport conditions and the composition of CO₂ streams. They automatically shut down if permissible contamination limits are exceeded. Sudden valve closure, often referred to as water hammer, causes a pressure wave that can lead to serious damage to the system. Scenarios involving water hammer, especially in large-diameter pipelines transporting contaminated CO₂, have been poorly studied to date. In this article, a homogeneous flow model was developed to analyze the risk of phase transition during water hammer. Heat exchange between the CO₂ stream and the environment was modeled using periodic boundary conditions. Contaminants from pre- and post-combustion carbon capture technologies and mixtures thereof were considered.

1. Wprowadzenie

W ramach wychwytywania i składowania dwutlenku węgla – Carbon Capture and Storage (CCS) kluczową rolę odgrywa transport rurociągowy zanieczyszczonego CO₂. Rodzaje i stężenia tych zanieczyszczeń zależą od technologii wychwyty, a mianowicie od procesów przed spalaniem, po spalaniu i procesów tlenowych. Rurociągi są wyposażone w systemy zabezpieczające, które monitorują warunki pracy i skład zanieczyszczonego CO₂ oraz zatrzymują przepływ, jeśli określone warunki graniczne zostaną przekroczone. Typowy skład CO₂ z zanieczyszczeniami dla rurociągów można znaleźć w [4].

W przypadku gwałtownego zatrzymania przepływu dochodzi do uderzenia hydraulicznego, co może prowadzić do przemiany fazowej oraz skoków ciśnienia, mogących wywołać kawitację. Znanych jest jedynie kilka prac dotyczących zjawiska uderzenia hydraulicznego w rurociągach transportujących zanieczyszczone CO₂. Większość prac [9, 13, 16, 23, 24, 25] dotyczy jednofazowego przepływu czystego CO₂ w krótkich rurociągach o małych średnicach wewnętrznych.

Niniejsza praca ma na celu ocenę ryzyka wystąpienia przemiany fazowej ciecz-para podczas uderzenia hydraulicznego, przy użyciu jednorodnego modelu przepływu dwufazowego. Ponadto uwzględniono wpływ wybranego równania stanu – Equation of State (EOS) i zanieczyszczeń.

Do numerycznego rozwiązania modelu przepływu zastosowano metodę WENO w wersji objętości skończonych. Dokładny opis algorytmu można znaleźć w [3, 10, 14, 20, 21]. Całkowanie przeprowadzono wykorzystując metodę Rungego-Kutty [19]. Badania przeprowadzono dla podmorskiego rurociągu transportującego czyste CO₂ lub jego zanieczyszczoną mieszaninę.

2. Równania wyjściowe

Jednowymiarowy model dla przepływu dwufazowego jest opisany poniższymi równaniami zachowania odpowiednio masy, pędu i energii:

^{*} Ferdinand Uilhoorn, Maciej Chaczykowski, Andrzej J. Osiadacz, Tomasz Bleschke, Łukasz Kotyński – Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Warszawa, Polska, adres e-mail autora korespondencyjnego: ferdinand.uilhoorn@pw.edu.pl

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_k \alpha_k \rho_k \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\sum_k \alpha_k \rho_k w \right) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(w \sum_k \alpha_k \rho_k \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(w^2 \sum_k \alpha_k \rho_k \right) + \frac{\partial p}{\partial x} = -F, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\sum_k \left(\alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} w^2 \right) \right) \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\sum_k \left(\alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} w^2 \right) \right) + p \right) w \right) = Q, \quad (3)$$

gdzie: indeks dolny k oznacza fazę gazową albo ciekłą, α – udział objętościowy danej fazy, ρ – gęstość danej fazy, p – ciśnienie, e – energia wewnętrzna, w – prędkość, F – tarcie oraz Q – strumień ciepła wymieniany pomiędzy otoczeniem a płynem. W modelu tym zakłada się, że fazy przemieszczają się z tą samą prędkością, zachowując równowagę mechaniczną, termiczną i chemiczną.

Do rozwiązania modelu przepływu wymagana jest prędkość dźwięku opisaną poniższym równaniem [7]:

$$c^2 = \frac{\frac{p}{\rho} - \rho \left(\frac{\partial e}{\partial \rho} \right)_p}{\rho \left(\frac{\partial e}{\partial p} \right)_\rho}. \quad (4)$$

Wpływ modułu sprężystości płynu i elastyczności rury na wartość prędkości fali opisuje następujące równanie [12, 22]:

$$v_w = \sqrt{\frac{\mathcal{K}}{\rho} \left(1 + \psi \frac{\mathcal{K} d}{\delta E} \right)^{-1}}, \quad (5)$$

gdzie: d – średnica wewnętrzna, δ – grubość ścianki i E – moduł Younga. Współczynnik ψ zależy od sposobu zamocowania rury i można go znaleźć w [22]. W równaniu pędu (2) tarcie oblicza się za pomocą korelacji Friedela [8], ponieważ jest ona uważana za jedną z najbardziej dokładnych [6]. Zastosowano model wymiany ciepła o okresowo zmieniających się warunkach brzegowych [1]:

$$\dot{Q} = k_{\text{soil}} (T_{w,o} - T_m) \Lambda (1 + \Xi (A \sin(\omega t) + B \cos(\omega t))), \quad (6)$$

gdzie: T_m – średnia roczna temperatura dna morskiego, Λ – bezwymiarowy współczynnik przenikania ciepła, ω – częstotliwość kątowna, k_{soil} – przewodność cieplna dna morskiego i $T_{w,o}$ – temperatura zewnętrznej ścianki rurociągu. Parametr Ξ jest funkcją amplitudy oscylacji temperatury, temperatury ścianki i średniej rocznej temperatury dna morskiego. Wartości współczynników A i B zależą od głębokości posadowienia, promienia rurociągu oraz dyfuzyjności cieplnej gruntu i można je znaleźć w [6].

3. Schemat numeryczny

Układ równań (1) – (3) przedstawiono w postaci wektorowej:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_t + \mathbf{g}(\mathbf{u})_x &= \mathbf{s}(\mathbf{u}), \quad x \in R, t > 0, \\ \mathbf{u}(x, 0) &= \mathbf{u}_0(x), \\ \mathbf{u}(0, t) &= \mathbf{u}_L(t), \quad \mathbf{u}(L, t) = \mathbf{u}_R(t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \sum_k \alpha_k \rho_k \\ \sum_k \alpha_k \rho_k w \\ \sum_k \left(\alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} w^2 \right) \right) \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \sum_k \alpha_k \rho_k w \\ \sum_k \alpha_k \rho_k w^2 + p \\ \left(\sum_k \left(\alpha_k \rho_k \left(e_k + \frac{1}{2} w^2 \right) \right) + p \right) w \end{bmatrix}, \mathbf{s} = \begin{bmatrix} 0 \\ -F \\ Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Przedział $[0, L]$ na N komórek, $J_i = [x_{i-\frac{1}{2}}, x_{i+\frac{1}{2}}]$, $i = 1, \dots, N$. Niech u_1 będzie średnią komórkową na J_i , czyli $u_1(t) = \frac{1}{\Delta x} \int_{J_i} u_1(x, t) dx$.

Całkując równanie (7) otrzymujemy:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{u}_i(t) &= \frac{1}{\Delta x} \left(\mathbf{g}(\mathbf{u}_{i+\frac{1}{2}}, t) - \mathbf{g}(\mathbf{u}_{i-\frac{1}{2}}, t) \right) \\ &= \frac{1}{\Delta x} \int_{J_i} \mathbf{s}(\mathbf{u}(x, t)) dx, \end{aligned} \quad (9)$$

gdzie $x_i = \frac{1}{2}(x_{i+\frac{1}{2}} + x_{i-\frac{1}{2}})$ – środek komórki, $\Delta x_i = x_{i+\frac{1}{2}} - x_{i-\frac{1}{2}}$ – długości komórki, $\mathbf{u}_{i+\frac{1}{2}} = \mathbf{u}(x_{i+\frac{1}{2}}, t)$ oraz $\mathbf{u}_{i-\frac{1}{2}} = \mathbf{u}(x_{i-\frac{1}{2}}, t)$.

Po przekształceniu równanie (8) przyjmuje postać:

$$\frac{d}{dt} \mathbf{u}_i(t) = -\frac{1}{\Delta x} \left(\hat{\mathbf{g}}_{i+\frac{1}{2}} - \hat{\mathbf{g}}_{i-\frac{1}{2}} \right) + \mathbf{s}_i, \quad (10)$$

z warunkiem początkowym:

$$\mathbf{u}_i(0) = \frac{1}{\Delta x} \int_{J_i} \mathbf{u}(x, 0) dx, \quad i = 1, \dots, N, \quad (11)$$

gdzie $\hat{\mathbf{g}}_{i+\frac{1}{2}}$ i $\hat{\mathbf{g}}_{i-\frac{1}{2}}$ są obliczane za pomocą metody WENO. Dokładny opis metody znaleźć można w [19].

Do rozwiązania równania (8) wykorzystano metodę Rungego-Kutty trzeciego rzędu. Krok czasowy jest kontrolowany przez warunek Couranta:

$$\Delta t = C \frac{\Delta x}{\lambda}, \quad (12)$$

gdzie C – liczba Couranta z przedziału $[0, 1]$, λ – wartość maksymalna z $(w, w + c, w - c)$.

4. Rezultaty obliczeń

Przeprowadzono badania, których celem było ocena wrażliwości rozwiązania modelu przepływu na wybór równania stanu (Peng-Robinson (PR) i GERG-2008), oraz na obecność zanieczyszczeń w warunkach uderzenia hydraulicznego. CO_2 jest transportowany w fazie ciekłej rurociągiem podmorskim, w celu magazynowania w wyeksploatowanych złożach gazu. Rurociąg ma długość 20 km, średnicę 377,8 mm o głębokości posadowienia 0,6 m.¹ Zakładamy, że rurociąg jest ułożony poziomo. Struktura ścianek i właściwości gruntu dla odcinka morskiego podano w tab. 1 (δ – grubość ścianki, λ – przewodność cieplna, ρ – gęstość, c_p – ciepło właściwe, PP – polipropylen). Średnią temperaturę i amplitudę oscylacji temperatury na dnie morskim ustalono odpowiednio na 5 °C i 3 °C. Chropowatość wewnętrzna rury wynosi 0,045 mm. Moduł Younga i współczynnik Poissona dla stali wynoszą odpowiednio 200 GPa i 0,3. Czas zamykania i otwierania zaworu wynosi 15 s.

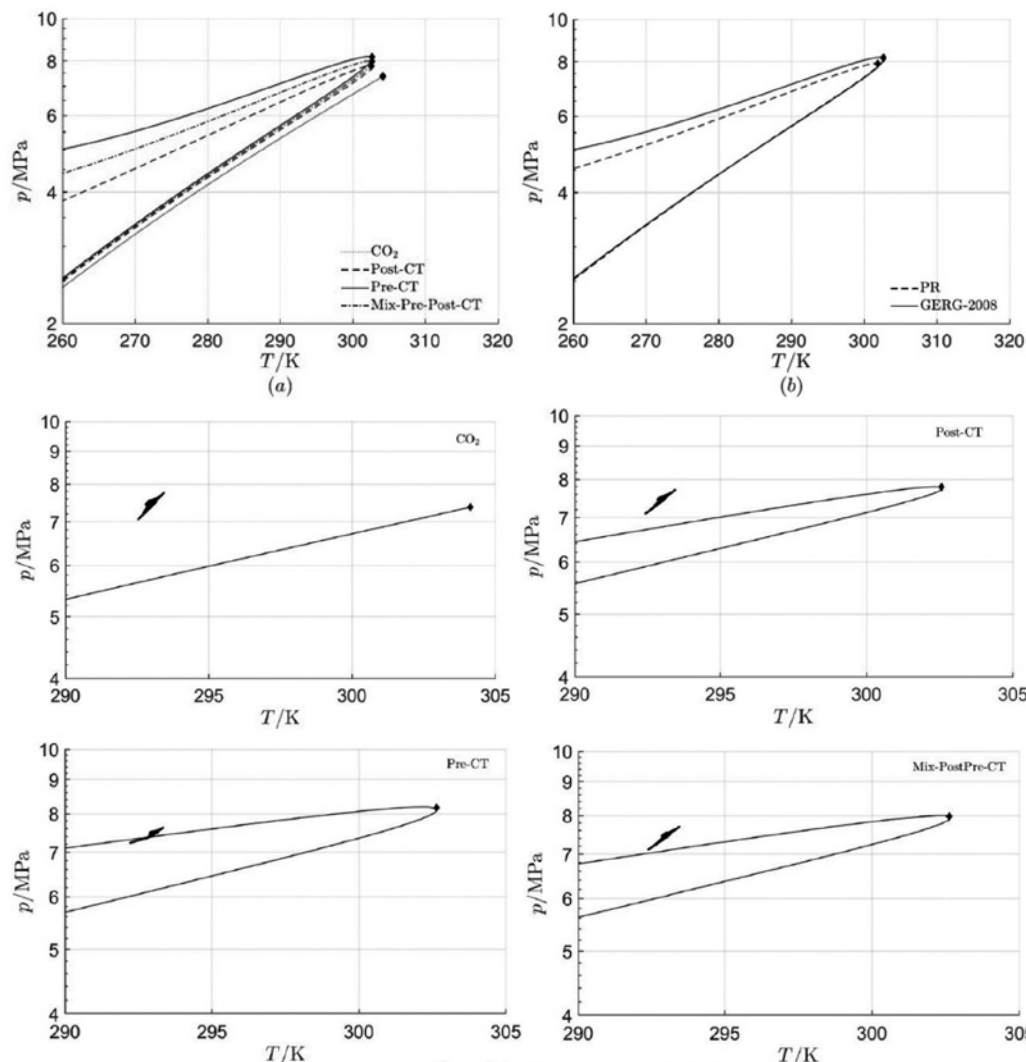
Tabela 1 Właściwości ścianek rur i gleby [15, 17]

Table 1 Pipe wall and soil properties [15, 17]

Warstwa	δ , mm	λ , W K ⁻¹ m ⁻¹	ρ , kg m ⁻³	c_p , J kg ⁻¹ K ⁻¹
stal węglowa	14,3	45	7850	490
powłoka epoksydowa	0,3	0,3	1400	1000
klej	0,3	0,22	900	2182
powłoka PP	5	0,22	900	2153
pianka PP	27	0,175	750	1744
powłoka PP	5	0,22	900	2153
beton	110	2	3040	980
gleba	600	1	2400	938

Bierzemy pod uwagę zanieczyszczenia pochodzące z technologii wychwytywania dwutlenku węgla przed spalaniem (Pre-CT) i po spalaniu (Post-CT). Skład tych zanieczyszczeń odpowiada wymaganiom

¹ Parametry rurociągu przyjęto z projektu Porthos [5].



Rys. 1. Wykres fazowy ciśnienia i temperatury dla czystego CO₂, Post-CT, Pre-CT i Mix-PrePost-CT przy użyciu GERG-2008 EoS (a). Wykres fazowy dla mieszaniny Pre-CT przy użyciu równań PR i GERG-2008(b)

Rys. 2. Warunki pracy w rurociągu i wykres fazowy dla czystego CO₂ i CO₂ z zanieczyszczeniami, dla równania GERG-2008 z CFL=0,9 i N=50

zdefiniowanym w [4]. Ponieważ CO₂ jest wychwytywane z różnych źródeł emisji, rozważa się mieszanie obu technologii, oznaczoną jako Mix-PrePost-CT. Badane strumienie zanieczyszczonego CO₂ przedstawiono w tab. 2. Na podstawie wykresów fazowych czystego CO₂ i wybranych mieszanin, przedstawionych na rys. 1(a) można zauważyć, że nawet niewielkie ilości zanieczyszczeń mają znaczący wpływ, zwiększając ryzyko wystąpienia przepływu dwufazowego. Wybrane równanie stanu również wpływa na wykres fazowy, jak pokazano na rys. 1(b).

Tabela 2 Badane mieszaniny CO₂, %mol
Table 2 Tested CO₂ mixtures, %mol

	Post-CT	Pre-CT	Mix-PrePost-CT
CO ₂	97,6	96,45	97,025
Ar	-	0,40	0,200
H ₂	-	0,75	0,375
N ₂	2,4	2,40	2,400

W symulacji numerycznej warunki brzegowe oparto na scenariuszu przedstawionym w [11], w którym zawór na wylocie jest najpierw otwierany, a po pewnym czasie szybko zamykany. Warunki początkowe w pobliżu linii nasycenia definiujemy w następujący sposób:

$$p(x, 0) = 7.5 \text{ MPa}, \quad T(x, 0) = 293.15 \text{ K}, \quad (13)$$

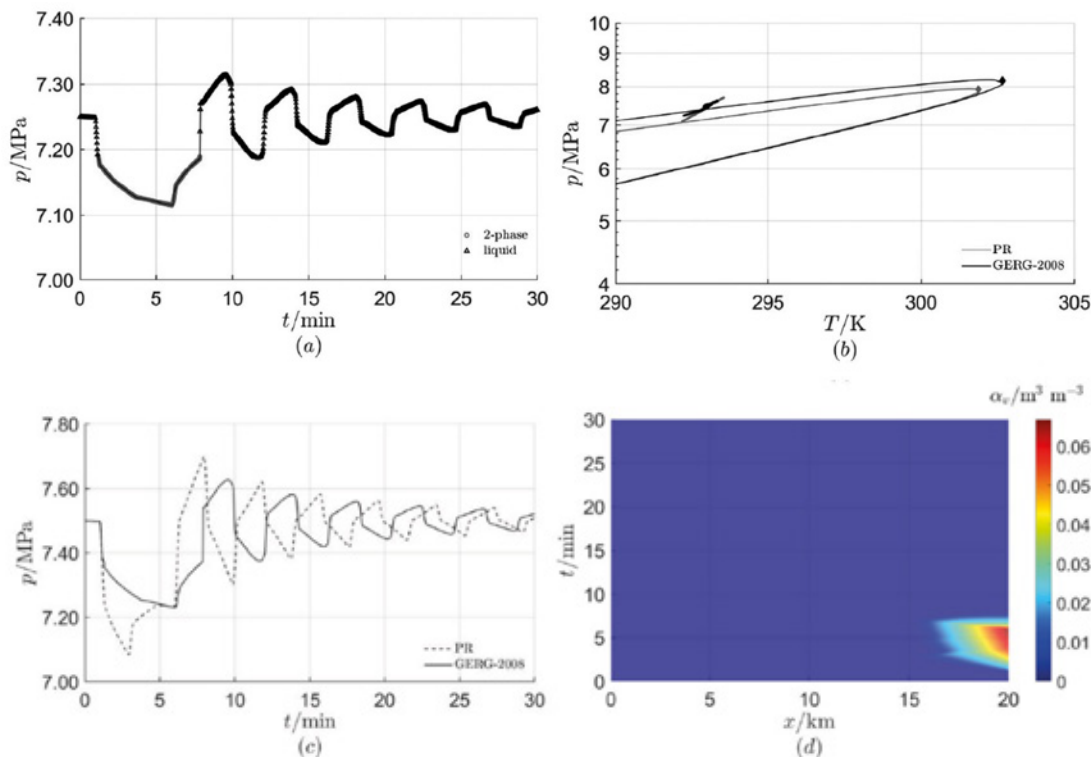
a warunki brzegowe jako:

$$p(0, t) = 7.5 \text{ MPa}, \quad (14)$$

$$\dot{m}(L, t)/\text{kg}\cdot\text{s}^{-1} = \begin{cases} 0, & \text{dla } t \leq 60, \\ \dot{m}_{vo}(t), & \text{dla } 60 < t \leq 60 + \tau, \\ 80, & \text{dla } 60 + \tau < t \leq 360, \\ \dot{m}_{vc}(t), & \text{dla } 360 < t < 360 + \tau, \\ 0, & \text{poza.} \end{cases} \quad (15)$$

Na podstawie rys. 2, który przedstawia ciśnienie i temperaturę w każdym przedziale czasowym i w każdym punkcie dyskretyzacji wzdłuż rurociągu, wnioskujemy, że warunki pracy wchodzą w obszar dwufazowy przy mieszaniu Pre-CT, podczas gdy pozostałe mieszaniny pozostają w fazie ciekłej.

Przemiana fazowa następuje pomiędzy 70 a 470 sekundą. Maksymalnym udział objętościowy fazy gazowej wynosi 0,068 m³m⁻³, jak przedstawiono na rys. 3(a) i 3(d). Przemiana cieczy w parę została zaobserwowana podczas stosowania równania GERG-2008, w przypadku równania PR zjawisko to nie zostało zaobserwowane, jak pokazano na rys. 3(b). Różnice ciśnienia tuż przed zaworem przedstawiono na rys. 3(c). Ścisłość fazy gazowej w przepływie dwufazowym ogranicza amplitudę zmian ciśnienia, tym samym osłabiając ich wielkość w porównaniu z cieczą.



Rys. 3. Warunki ciśnienia i przemiana fazowa (czerwony) przy $x = L$ przy użyciu GERG-2008 (a), wszystkie warunki pracy i diagram fazowy (b), warunki ciśnienia przy $x = L$ (c) i frakcja pary przy użyciu GERG-2008 (d). Wyniki dla mieszaniny Pre-CT z CFL=0,9 i $N = 50$

Fig. 3. Pressure conditions and phase transition (red) at $x = L$ using GERG-2008 (a), all operating conditions and phase diagram (b), pressure conditions at $x = L$ (c) and void fraction using GERG-2008 (d). Results for Pre-CT mixture with CFL=0,9 and $N = 50$

5. Wnioski

W niniejszej pracy wykorzystano model jednorodnego przepływu dwufazowego, w celu zbadania możliwości wystąpienia przepływu dwufazowego w rurociągu podmorskim, podczas szybkiego otwierania i zamykania zaworu. Wyniki wykazały, że niewielkie ilości zanieczyszczeń mogą mieć znaczący wpływ na granice faz, a tym samym na ryzyko wystąpienia przepływu dwufazowego. Zaobserwowano to w przypadku mieszaniny wychwyconej przed spalaniem, podczas gdy inne mieszaniny pozostały w fazie ciekłej. Symulacje wykazały również, że dobór równania stanu ma duże znaczenie.

LITERATURA

- [1] Barletta, A., Zanchini, E., Lazzari, S., & Terenzi, A. 2008. „Numerical study of heat transfer from an offshore buried pipeline under steady-periodic thermal boundary conditions”. *Applied Thermal Engineering*, 28(10), 1168–1176.
- [2] Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* 7th Edition. John Wiley & Sons.
- [3] Borges, R., Carmona, M., Costa, B., & Don, W. S. 2008. “An improved weighted essentially non-oscillatory scheme for hyperbolic conservation laws”. *Journal of Computational Physics*, 227(6), 3191–3211.
- [4] Chinello, G., Arellano, Y., Span, R., van Putten, D., Abdulrahman, A., Jonaki, E., Arrhenius, K., & Murugan, A. 2024. “Toward standardized measurement of CO₂ transfer in the CCS chain”. *Nexus Netw. J.*, 1(2), 100013.
- [5] CO₂ reduction through storage under the North Sea. Available: <https://www.porthosco2.nl/en/>. [Accessed: 16-Oct-2024].
- [6] Collier, J. G., & Thome, J. R. 1994. *Convective Boiling and Condensation*. Clarendon Press.
- [7] Fang, Y., De Lorenzo, M., Lafon, P., Poncet, S., & Bartosiewicz, Y. 2018. “An Accurate and Efficient Look-up Table Equation of State for Two-Phase Compressible Flow Simulations of Carbon Dioxide”. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 57(22), 7676–7691.
- [8] Friedel, L. 1979. Improved friction pressure drop correlation for horizontal and vertical two-phase pipe flow. European Two-Phase Group Meeting, Ispra, Italy.
- [9] Hu, H., Xu, R., Ho, M., Wiley, D., & Jiang, P. 2018. Investigation of Dynamic Phase Changes in High-Pressure Pipelines During Flexible CO₂ Transport. 14th Greenhouse Gas Control Technologies Conference Melbourne 21-26 October 2018 (GHGT-14).
- [10] Jiang, G.-S., & Shu, C.-W. 1996. “Efficient implementation of weighted ENO schemes”. *Journal of Computational Physics*, 126(1), 202–228.
- [11] Kiuchi, T. 1994. “An implicit method for transient gas flows in pipe networks”. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 15(5), 378–383.
- [12] Korteweg, V. D. 1878. «Ueber die Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Schalles in elastischen Röhren». *Annalen Der Physik*, 241(12), 525–542.
- [13] Kumar, P., Sanderse, B., Esquivel, R., & Henkes, R. A. W. M. 2024. Numerical modelling of two-phase CO₂ flow in pipes. *Proceedings of the 12th North American Conference on Multiphase Production Technology*, MPNA 2024, 387–402.
- [14] Liu, X.-D., Osher, S., & Chan, T. 1994. “Weighted essentially non-oscillatory schemes”. *Journal of Computational Physics*, 115(1), 200–212.
- [15] Makogon, T. Y. 2019. *Handbook of Multiphase Flow Assurance*. Gulf Professional Publishing.
- [16] Nazeri, M., Maroto-Valer, M. M., & Jukes, E. 2016. “Performance of Coriolis flowmeters in CO₂ pipelines with pre-combustion, post-combustion and oxyfuel gas mixtures in carbon capture and storage”. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 54, 297–308.
- [17] Royal HaskoningDHV. (2020). *Aanvraag Mijnbouwvergunning pijpleiding op zee. Porthos CO₂ transport en opslag* (No. BF8260).
- [18] Rp, A. 2001. *Recommended Practice for Analysis, Design, Installation, and Testing of Basic Surface Safety Systems for Offshore Production Platforms*. American Petroleum Institute.
- [19] Shu, C.-W., & Osher, S. 1988. “Efficient implementation of essentially non-oscillatory shock-capturing schemes”. *Journal of Computational Physics*, 77(2), 439–471.
- [20] Toro, E. F. 2009. *Riemann Solvers Numerical Methods Fluid Dynamics: Practical Introduction*. Springer.
- [21] Toro, E. F., Spruce, M., & Speares, W. 1994. “Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver”. *Shock Waves*, 4(1), 25–34.
- [22] Watters, G. Z. 1979. *Modern analysis and control of unsteady flow in pipelines*. Butterworth-Heinemann.
- [23] Yang, Z., Fahmi, A., Drescher, M., Teberikler, L., Merat, C., Solvang, S., Rinde, O. J., Norström, J. G., Dijkhuizen, W., Haugset, T., Brigadeau, A., Langsholt, M., & Liu, L. 2021, March 24). Improved Understanding of Flow Assurance for CO₂ Transport and Injection. *Proceedings of the 15th Greenhouse Gas Control Technologies Conference* 15-18 March 2021.
- [24] Zhang, W., Shao, D., Yan, Y., Liu, S., & Wang, T. 2018. “Experimental investigations into the transient behaviours of CO₂ in a horizontal pipeline during flexible CCS operations”. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 79, 193–199.
- [25] Zhu, J., Wu, J., Xie, N., Li, Z., Hu, Q., & Li, Y. 2024. “Study on water hammer phase transition characteristics of dense/liquid phase CO₂ pipeline”. *Energy*, 311(133470), 133470.