

ENGINEERING AND DESIGN CHALLENGES IN THE PIPELINE TRANSPORTATION OF CARBON DIOXIDE: INFLUENCE OF IMPURITIES AND PHASE PROPERTIES

Lyudmila Bojkova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: l.bojkova@mgu.bg

ABSTRACT. This report presents an analysis of the transportation of carbon dioxide (CO₂) through pipelines, which imposes specific engineering requirements arising from the phase behaviour of the fluid and the influence of impurities in the CO₂ stream. These factors have a significant impact on the critical thermodynamic properties of the fluid, as well as on the hydraulic design of pipelines, corrosion processes, and the structural integrity of the system. Maintaining CO₂ in a dense or supercritical phase requires precise control of operating parameters, including pressure, temperature, and fluid composition, as well as the implementation of specialised engineering solutions in the design and operation of pipeline infrastructure. The effective and safe design of such systems is based on reliable preliminary studies, analysis of phase properties, and the adaptation of engineering solutions to the specific characteristics of the transported CO₂.

Key words: carbon dioxide (CO₂), pipelines, state, impurities, design.

ИНЖЕНЕРНИТЕ И ПРОЕКТАНТСКИ ПРЕДИЗВИКАТЕЛСТВА ПРИ ТРАНСПОРТИРАНЕТО НА ВЪГЛЕРОДЕН ДИОКСИД ПО ТРЪБОПРОВОДИ: ВЛИЯНИЕ НА ПРИМЕСИТЕ И ФАЗОВИТЕ СВОЙСТВА

Людмила Божкова

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. В настоящия доклад е извършен анализ на транспортирането на въглероден диоксид (CO₂) по тръбопроводи, което поставя специфични инженерни изисквания, произтичащи от особеностите на фазовото поведение на флуида и влиянието на примесите в CO₂ потока. Тези фактори оказват съществено въздействие върху критичните термодинамични свойства на флуида, както и върху хидравличното оразмеряване на тръбопроводите, корозионните процеси и структурната надеждност на системата. Поддържането на CO₂ в плътна или свръхкритична фаза изисква прецизен контрол на работните параметри, включително налягане, температура и състав на флуида, както и прилагането на специализирани инженерни решения при проектирането и експлоатацията на тръбопроводната инфраструктура. Ефективното и безопасно проектиране на такива системи се основава на надеждни предварителни изследвания, анализ на фазовите свойства и адаптиране на инженерните решения към специфичните характеристики на транспортирания CO₂.

Ключови думи: въглероден диоксид (CO₂), тръбопроводи, състояние, примеси, проектиране.

Въведение

Европа е установила водеща роля към глобална икономика с нулеви нетни емисии на парникови газове до 2050 г. За да стане това реално, европейската индустрия се стреми да постигне тази цел чрез широкомащабно приемане на нисковъглеродни технологии.

Значително инженерно предизвикателство на XXI век е намаляването на емисиите, съставени предимно от въглероден диоксид (CO₂) – продукт от горенето на изкопаеми горива (петрол, природен газ, въглища) и други промишлени и енергийни приложения. CO₂ е един от шестте парникови газа (ПГ), които допринасят за глобалното затопляне.

Един от ключовите начини за постигане на целта е чрез улавянето, транспортирането и съхранението на CO₂ (Carbon Capture and Storage - CCS). Тръбопроводите имат изключително важна роля за доставянето на уловения CO₂ до далечни хранилища.

Текст

Специфични изисквания при транспорт на CO₂

Транспортът на CO₂ по тръбопроводи става все по-важна тема, тъй като проектите за улавяне и съхранение преминават от пилотни към демонстрационни фази. Въпреки че се очаква транспортирането на CO₂ да се възползва от натрупания опит при транспортирането на природен газ, трябва да бъдат преодоляни и някои нови предизвикателства.

Основно предизвикателство пред инженерно-проектантската практика е свеждането до минимум на ограниченията, породени от състава на CO₂ върху тръбопроводите.

В идеалния случай тръбопроводът трябва да поддържа експлоатация при широк диапазон на параметрите на CO₂ потока, съобразен с изискванията за здраве, безопасност и околна среда.

Влияние на примесите върху проектирането и съхранението

Хидравличните и механичните конструкции на тръбопроводите са много чувствителни към нивото на примесите, съдържащи се в потока на CO₂ продукта.

През последните четири десетилетия съхранението на CO₂ се фокусира върху инжектирането на чист CO₂ в изчерпани газови и нефтени хранилища. Наличието на отпадъчни газове като CO, O₂, H₂, SO_x и NO_x може да бъде неподходящо за резервоара и е предмет на задълбочено проучване.

По-специално, примесите могат да:

- доведат до инжектиране на газ с ниска плътност или двуфазова смес от газ и течност в подземните пластове;
- значително да променят „екосистемата“ на резервоара;
- ограничат скоростта, с която CO₂ може да бъде инжектиран поради образуването на множество фази.

Влияние на примесите върху критичните свойства на CO₂ потока

Примесите в CO₂ потока изискват по-високо работно налягане спрямо чист CO₂ с цел поддържане на еднофазен свръхкритичен режим (таблица 1).

Таблица 1. Влияние на примесите върху термодинамичните свойства и критичните параметри на CO₂ потока

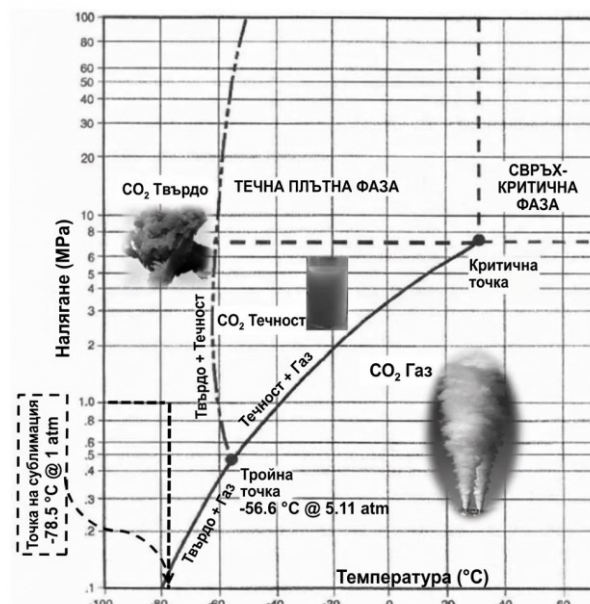
Компонент	Въздействие	Коментар
CH ₄	Умерено	Метанът леко повишава свиваемостта на сместа. Въпреки това, определено количество метан в потока на CO ₂ може да помогне за изгарянето на сместа при необходимост от изпускане.
C ₂₊	Минимално	Етанът и по-тежките въглеводороди обикновено не са проблем. Те леко намаляват критичната температура и налягане, но нямат съществено влияние върху свиваемостта.
H ₂ S	Много минимално	Поради изразената токсичност на сероводорода (H ₂ S), концентрацията му в CO ₂ потока трябва да бъде строго ограничена. От термодинамична гледна точка обаче неговото въздействие върху критичните параметри и свиваемостта на сместа е минимално.
N ₂	Умерено	Наличието на азот в CO ₂ потока оказва измеримо въздействие върху критичните свойства на сместа, като обикновено води до повишаване на критичното налягане и понижаване на критичната температура.
H ₂	Драстично	Водородът увеличава свиваемостта на CO ₂ сместа и води до значително понижаване на критичната температура, както и до съществено повишаване на критичното налягане, което може да повлияе на капацитета на тръбопровода.

Физически параметри и транспортни режими на CO₂

За да разберем проблемите, свързани с транспортирането на CO₂, е необходимо да сме наясно с неговите физически параметри. Чистият въглероден диоксид е безцветен, без миризма и негоримо вещество, което може да се транспортира в твърдо, течно и газообразно състояние или в свръхкритично състояние (фиг.1).

Най-ефективното състояние за транспортиране по тръбопровода е като течност или свръхкритична течност. В този „свръхкритичен“ режим флуидът има плътността на течност, но вискозитета на газ. За ефективен транспорт CO₂

трябва да бъде компресиран до налягане над критичното (Ркритично > 7.38 MPa).



Фиг. 1. Фази на CO₂

Основни свойства на чист CO₂ (таблица 2)

Условия:

- Газообразно състояние: 0°C и 101.325 kPa (стандартни условия)
- Течно състояние: приблизително 20°C и ~6 MPa

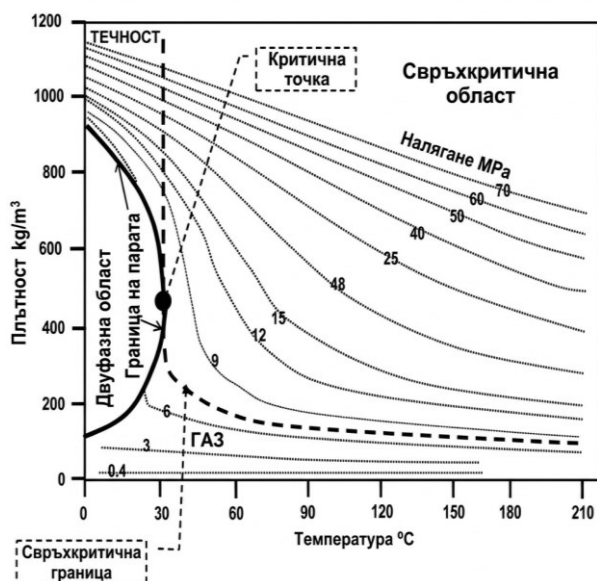
Таблица 2. Основни термодинамични свойства и параметри на състоянието на CO₂

Свойство	Обозначение	Газ (0°C, 1 atm)	Течност (~20°C, ~6 MPa)
Молярна маса	M	44.01 g/mol	44.01 g/mol
Плътност	ρ	1.98 kg/m ³	770–900 kg/m ³
Газова константа	R	188.9 J/(kg·K)	–
Коефициент на свиваемост	Z	≈ 1.0	< 1
Специфична топлина Cp	Cp	≈ 844 J/(kg·K)	≈ 2000 J/(kg·K) (прибл.)
Адиабатен показател	k	≈ 1.29	–
Динамичен вискозитет	μ	1.37×10 ⁻⁵ Pa·s	≈ 0.07 mPa·s
Обем спрямо газ	–	1	≈ 1/400 до 1/500
Критична температура	Tc	31.1°C	31.1°C
Критично налягане	Pc	7.38 MPa	7.38 MPa

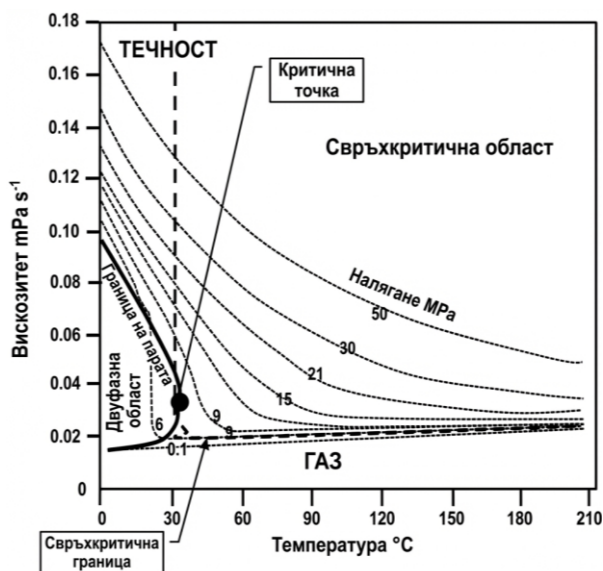
Въглеродният диоксид не съществува в течно състояние при налягане под 5.11 атмосфери. При

атмосферно налягане, твърдият CO_2 (сух лед) сублимира директно в газ над -78°C .

Фигурите по-долу (фиг. 2 и фиг. 3) показват плътността и вискозитета на CO_2 при променящи се налягания и температури.



Фиг. 2. Плътност на чист CO_2



Фиг. 3. Вискозитет на чист CO_2

Цели при проектирането на тръбопроводи за CO_2

Основната цел на проекта, свързан с успешното транспортиране на CO_2 , е да изясни следните ключови показатели:

- Оптималният коридор за преминаване на тръбопровода, базиран на:
 - техническа възможност и удобство за изграждане;
 - опазване на околната среда;
 - разходи за изграждане;
 - геоложка характеристика на трасето.
- Обща концепция за конфигурация на тръбопроводната система:

- диаметър и материал на тръбата;
- основни технически параметри и качествено оразмеряване.

- Технологични схеми на основните съоръжения и инфраструктура.
- Данни за ситуационното разположение и регистър на препятствията.
- Хидравлични изчисления на предложените варианти.

Резултатите от тези предварителни проучвания са решаващи за вземането на правилни инвестиционни решения и формулирането на последващите фази за реализация.

Заклучение

Транспортирането на CO_2 по тръбопроводи е ключов елемент в постигането на европейските цели за декарбонизация. Успехът зависи от задълбочено инженерно планиране, което отчита както уникалните физически свойства на CO_2 (особено във свръхкритичната фаза), така и критичното влияние на примесите върху безопасността, целостта и хидравликата на системата.

Литература

- Георгиев, Л., Бояджиев, М. (12/2020). Принципи и подходи за хидравлично оразмеряване на събирателни тръбопроводи при многофазно движение на флуиди. *Минно дело и геология*, ISSN 2603-4549, стр. 44-47.
- Георгиев, Л., Николова, Н. (2012). Съвременни методи и подходи за мониторинг на обектите за съхраняване на въглероден диоксид в земните недра.
- Fayard, D., Bénézech, T. (2016). CO_2 pipeline design standards and operational practices. *Oil & Gas Science and Technology*, 71, 33.
- Gopal, A. и Singh, P. (2018). The effect of pressure and temperature on the density and viscosity of CO_2 in pipeline transportation. *Journal of CO_2 Utilization*, 26, pp. 248–259.
- Kjær, J. S. (2019). Phase equilibrium and stability of CO_2 mixtures: A review. *Fluid Phase Equilibria*, 477, pp. 1-13.
- Rohde, S. и Eimer, T. (2020). CO_2 pipeline design: Challenges and solutions for operation and integrity management. *Energy Procedia*, 114, pp. 7181-7188.
- Skovholt, K. (2018). Pipeline Transport of CO_2 : A comparison with natural gas pipelines. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 68, pp. 110-120.
- Tavakkoli, A., Hilliard, T. (2017). Effects of Impurities on the Phase Envelope and Critical Point of CO_2 Mixtures for Transportation and Storage. *Energy Procedia*, 114, pp. 2969–2975.
- White, D. (2021). The importance of CO_2 phase behaviour in pipeline design. *SPE Projects, Facilities & Construction*, 16(04), pp. 883-894.
- Zhou, Z., Ghassemi, A. (2019). Modeling of CO_2 pipeline decompression and fracture. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 80, pp. 19-30.