

## АНОТАЦІЯ

**Бурачок О.В.** Підвищення ефективності вилучення вуглеводнів на різних стадіях розробки газоконденсатних родовищ. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 185 – Нафтогазова інженерія та технології. – Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ, 2021.

Дисертація присвячена вирішенню проблем розробки газоконденсатних родовищ на різних стадіях шляхом вдосконалення методів створення якісних геолого-технологічних моделей та вибору оптимального методу дії на газоконденсатний поклад з метою підвищення вуглеводневилучення.

**Мета дослідження** – вдосконалення технологій розробки та підвищення вуглеводневилучення із газоконденсатних покладів на різних стадіях розробки.

Для досягнення поставленої мети було визначено наступні основні завдання:

1. Аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду і технологій розробки газоконденсатних покладів та методів підвищення кінцевого вуглеводневилучення.

2. Дослідження проблем побудови гідродинамічних моделей покладів вуглеводнів.

3. Розроблення методики побудови PVT-моделі газоконденсатних сумішей для використання в гідродинамічних розрахунках за умови обмеженої вхідної інформації.

4. Дослідження можливості і межі застосування PVT-моделі «чорної нафти» для моделювання розробки газоконденсатних покладів на виснаження.

5. Обґрунтування оптимальної технології підвищення вуглеводневилучення залежно від потенційного вмісту вуглеводнів  $C_{5+}$  у газі і початкового ступеня виснаження газоконденсатного покладу.

6. Дослідження впливу мольної частки азоту і діоксиду вуглецю у видобувній продукції на момент зупинки видобувних свердловин на технологічні та економічні показники розробки газоконденсатного покладу.

7. Вибір рекомендованого хімічного агента для витіснення сконденсованих вуглеводнів з порового простору за відсутності та наявності геологічних невизначеностей.

**Об'єкт дослідження** – процеси підтримування пластового тиску і витіснення сконденсованих рідких вуглеводнів із пористого середовища газоконденсатного покладу.

**Предмет дослідження** – технології підвищення вуглеводневилучення з газоконденсатних покладів за різних ступенів виснаження.

Значна кількість газових і газоконденсатних родовищ України характеризуються суттєвим ступенем виснаження. Наприклад, по ПАТ «Укргазвидобування», 80% видобутку забезпечується з родовищ із виснаженням 75%. Особливістю газоконденсатних родовищ є те, що через зниження пластового тиску відбувається конденсація із газу рідких вуглеводнів з утворенням окремої рідкої вуглеводневої фази, яка досягає критичних значень насичення і стає рухливою тільки у привибійній зоні свердловин, негативно впливаючи на продуктивність свердловин і розробку родовищ загалом. Для того, щоб запобігти конденсації із газу важких вуглеводнів, такі родовища повинні розроблятися з підтримуванням пластового тиску. Нажаль, тільки на 4 об'єктах розробки в Україні було впроваджено сайклінг процес або внутрішньо-свердловинний перепуск газу. Через неоднорідність розповсюдження фільтраційно-ємнісних властивостей за об'ємом покладів, відбувається вибіркоче дренавання, а у випадку активної водонапірної зони також вибіркоче важкоконтрольоване обводнення, що значно ускладнює проектування подальшої розробки, особливо проектування геолого-технологічних заходів із інтенсифікації припливу газу до вибою свердловин, гідророзривів, забурювання бокових стовбурів та місця закладання нових свердловин.

Виконано детальний огляд і критичний аналіз досліджень з проблем підвищення вуглеводневилучення із газоконденсатних покладів на різних стадіях розробки.

Одним із пріоритетних завдань для оптимізації подальшої розробки родовищ і нарощування власного видобутку є побудова чисельних тривимірних постійно-діючих моделей родовищ вуглеводнів, які забезпечують прийняття технологічних рішень на основі оптимізаційних розрахунків. Розглянуто постановку математичної задачі та методів чисельного розв'язку. Запропоновано альтернативну математичну модель багатофазної фільтрації газоконденсатної суміші.

Наведено порівняння та обґрунтовано переваги багато-варіантного стохастичного підходу до побудови геологічних моделей. Запропоновано метод вибору репрезентативної стохастичної реалізації моделі газового родовища, що базується на використанні фільтраційних розрахунків за методом ліній течії та перевірці виконання умови відповідності дренажних запасів запасам, підрахованих об'ємним методом, для варіанту із 50% вірогідністю. За рахунок цього, досягається швидке відтворення історії розробки родовища. Методику апробовано і впроваджено для одного з родовищ Дніпровсько-Донецької западини.

Гідродинамічні розрахунки ґрунтуються на трьох основних рівняннях, які описують фундаментальні закони збереження маси, руху та енергії, а вхідною інформацією для них є дані про фізико-хімічні властивості пластових флюїдів. Побудова моделі флюїдів і налаштування трипараметричного рівняння стану ґрунтується на даних про детальний початковий компонентний склад та стандартних експериментів (CVD, SSE, DL) фазової рівноваги. Нажаль, для більшості родовищ України компонентний склад відомо тільки до фракції  $C_{5+}$ , а фазові перетворення досліджувалися за нерівноважним експериментом – диференціальною конденсацією вуглеводневої суміші, пряме використання яких в сучасних PVT-симуляторах неможливе. Розроблено та впроваджено методику побудови PVT-моделей, що ґрунтується на групуванні псевдо-

компонентів за результатами фракційної дистиляції, використанні синтетичної кривої втрат та результатів промислових досліджень свердловин на газоконденсатність. Розроблено методику швидкої перевірки та коригування PVT-моделі за допомогою однокоміркової моделі по відтворенню матеріального балансу.

Шляхом порівняння результатів розрахунків між композиційною і спрощеною PVT моделлю чорної нафти, яка задає зміну PVT властивостей в табличній формі залежно від тиску, досліджено і підтверджено можливість використання спрощеної моделі для коректного опису фазових перетворень під час розробки газоконденсатних покладів на виснаження за різного потенційного вмісту важких вуглеводнів від 50 до 500 г/м<sup>3</sup>.

За результатами досліджень на гідродинамічній моделі типового неоднорідного газоконденсатного покладу ДДЗ виконано комплексне порівняння різних методів підвищення вуглеводневилучення для трьох різних потенційних вмістів вуглеводнів C<sub>5+</sub> (100, 300 і 500 г/м<sup>3</sup>) за умови компенсації відборів нагнітанням за пластових умов 50 і 100% для чотирьох різних ступенів початкового виснаження – середньозваженого пластового тиску рівного 25, 50 і 75% від тиску початку конденсації та за тиску максимальної конденсації. За технологічною ефективністю (додатковим видобутком конденсату відносно базового варіанту на виснаження) методи розподіляються у такому порядку: 1) CO<sub>2</sub> 100%; 2) C<sub>1</sub> 90%, C<sub>2</sub> 5%, C<sub>3</sub> 5%; 3) C<sub>1</sub> 98%, C<sub>2</sub> 1%, C<sub>3</sub> 1%; 4) C<sub>1</sub> 100%; 5) C<sub>1</sub> 50%, N<sub>2</sub> 50%; 6) N<sub>2</sub> 100%; 7) заводнення. За економічною ефективністю (максимальний накопичений NPV) методи розподіляються так: 1) C<sub>1</sub> 100%; 2) C<sub>1</sub> 98%, C<sub>2</sub> 1%, C<sub>3</sub> 1%; 3) заводнення; 4) C<sub>1</sub> 50%, N<sub>2</sub> 50%; 5) C<sub>1</sub> 90%, C<sub>2</sub> 5%, C<sub>3</sub> 5%; 6) N<sub>2</sub> 100%; 7) CO<sub>2</sub> 100%.

Дослідження впливу мольної частки (70, 80 і 90%) азоту і діоксиду вуглецю в продукції свердловин в момент їх зупинки на ефективність вилучення конденсату показало, що доцільно зупиняти свердловини при 90% через вищі додаткові видобутки, економічно – зупинку доцільно проводити за 70%.

На підставі розрахунків з нагнітання  $\text{CO}_2$  у виснажений газоконденсатний поклад із потенційним вмістом конденсату  $500 \text{ г/м}^3$  розраховано синергетичний ефект у вигляді додаткового видобутку газу і конденсату та геологічного захоронення діоксиду вуглецю. Сприятливим є низький темп нагнітання  $\text{CO}_2$  ( $750 \text{ тис. м}^3/\text{д}$ ), що дозволяє додатково видобути до  $5,50\%$  газу і  $5,18\%$  конденсату і при цьому захоронити до  $3,6 \text{ Мт}$  діоксиду вуглецю за  $20\text{-}30$  років нагнітання, що дорівнює  $1,35\%$  від річного обсягу викидів  $2020$  р. в Україні за умови впровадження заходів з енергоефективності.

Згідно з результатами досліджень витіснення сконденсованих вуглеводнів за наявності геологічної невизначеності за допомогою нагнітання хімічних агентів (лугів (A), ПАР (S), полімерів (P), лугів з ПАР (AS), ПАР з полімерами (SP), лугів з ПАР і полімерами (ASP)) встановлено, що за середнім значенням NPV, усі методи мають подібний результат, із приростом  $(6\text{--}8)\%$  відносно ASP. Для коефіцієнтів вилучення максимальний приріст понад  $40\%$  отримано для AS, за яким слідує SP із  $20\%$  відносно полімерного заводнення (P). Через наявність геологічної невизначеності (розподіл фацій, пористості, проникності) та прийнятих обмежень по контролю за свердловинами, які не забезпечили доброї приймальності, виснаження було домінуючим порівнянно з підтриманням пластового тиску, а подібні значення NPV для більшості методів не дають змогу однозначно вибрати оптимальний метод.

Аналіз результатів заводнення із використанням хімічних агентів на одній геологічній реалізації показав, що полімери єдині забезпечують позитивний економічний ефект (NPV). Для решти методів відносно висока вартість агентів та необхідні високі концентрації роблять їх неефективними. Високі коефіцієнти газовилучення (близько  $92\%$ ), пов'язані з виснаженням за рахунок щільної сітки свердловин і низьким пластовим тиском, за якого увесь газ розчиняється у сконденсованій рідкій фазі. Водночас додатковий видобуток конденсату не перевищує  $0,33\%$ , що загалом використання хімічних агентів є економічно недоцільним.

**Ключові слова:** родовище, геологічна будова, порода-колектор, пісковик, обводнення продуктивних порід, фільтраційно-ємнісні параметри, пористість, моделювання, витіснення, свердловина, видобуток, продуктивні товщі, газоводяний контакт, структура порового простору, газоносність.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Статті, в яких опубліковані основні результати дисертації

1. Бойчук Т.Р., Бурачок О.В., Заболотний Р.В. Перспективи розширення ресурсної бази Дніпровсько-Донецької западини за рахунок покладів турнею // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. №4 (25), 2007. – С. 111-115.
2. Бурачок О.В. Аналіз стану та результатів сучасних досліджень із проблем підвищення конденсатовилучення. *Modern Engineering and Innovative Technologies*, Issue 13, Part 1, 2020, 41-57.
3. Бурачок О.В. Дослідження фільтрації багатокomпонентної суміші у газоконденсатному покладі // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. №1(14), 2005. – С.55-58.
4. Бурачок О.В. Дослідження можливості витіснення водою конденсату, що випав у пласті // *Нафтова і газова промисловість*. №2, 2007. – С. 29-32.
5. Бурачок О.В., Першин Д.В., Матківський С.В., Бікман Є.С., Кондрат О.Р. Особливості відтворення рівняння стану газоконденсатних сумішей за умови обмеженої вхідної інформації // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, № 1(74), 2020, С. 82-88.
6. Бурачок О.В., Першин Д.В., Матківський С.В., Бікман Є.С., Кондрат О.Р., Філатов В.Ю. Перевірка якості створення PVT-моделі газоконденсатної пластової системи за допомогою концепції однокоміркової гідродинамічної моделі // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ» Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*, № 2 (4), 2020, С. 49-56.

7. Бурачок О.В., Першин Д.В., Матківський С.В., Кондрат О.Р. Дослідження межі застосування PVT-моделі «чорної нафти» для моделювання газоконденсатних покладів // *Мінеральні ресурси України*, 2020, № 2, С. 43-48.
8. Бурачок О.В., Кондрат О.Р., Хайдарова Л.І. Аналіз результатів незмішувального витіснення конденсату з використанням азоту і вуглекислого газу // *Науковий огляд*, 2020, №7(70), 47-61.
9. Бойко В.С., Іванов С.І., Бурачок О.В., Шекета В.І. Комп'ютерна методика оптимізації роботи обводнених газових свердловин, що базується на вимірюванні гирлових тисків // *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. №3 (9), 2004. – С. 32-34.
10. Бойко В.С., Іванов С.І., Бурачок О.В., Ільницький Р.М., Шекета В.І. Комп'ютерна методика оптимізації роботи обводнених газових свердловин на основі використання даних про дебіт газу // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. № 2 (11), 2004. – С.60-63.
11. Бурачок О.В., Коваль В.І. Новий підхід до визначення вибійного тиску в обводнених газоконденсатних свердловинах // *Проблеми нафтогазової промисловості: Зб. наук. праць*. Вип. 2. – Київ, 2005. – 408 с. – С. 106-108.
12. Бурачок О.В., Алеїнік У.В. Метод визначення застійних зон у газовому покладі // *Проблеми нафтогазової промисловості: Зб. наук. праць*. Вип. 5 – Київ, 2007. – 648 с. – С. 229-235.
13. Матківський С.В., Ковальчук С.О., Бурачок О.В., Кондрат О.Р., Хайдарова Л.І. Дослідження впливу незначного прояву водонапірної системи на достовірність матеріального балансу // *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. № 2 (75), 2020. – С. 43-51.
14. Burachok O. Enhanced Gas and Condensate Recovery: Published Pilot and Commercial Projects Review. *Nafta-Gaz* 2021, no. 1, pp. 20-25.
15. Burachok O., Kondrat O., Matkivskii S., Khaidarova L. Application of CEOR optimization method for gas-condensate reservoir below dewpoint: Synthetic

case study. *Oil Gas European Magazine*, 46 Edition, Issue 4/2020, pp. 41-49.  
(Фахове видання включене до міжнародної наукометричної бази Scopus)



### Тези наукових конференцій

16. Бурачок О.В. Перспективи газоносності турнейських відкладів ДДЗ на прикладі Артюхівського родовища // *Стан і перспективи розробки нафтових родовищ України. Матеріали науково-практичної конференції* (м. Долина, 18-21 квітня 2006 р.). – Івано-Франківськ: ТЗОВ "Супутники", 2006. – 80 с. – С. 46-50.

17. Бурачок О.В., Кондрат О.Р. Сучасні технології та світовий досвід підвищення вуглеводневилучення із газоконденсатних родовищ // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази»*, 23-25 травня 2018 р. – Івано-Франківськ, 2018. – 367 с. – с. 210-213.

18. Кондрат О.Р., Кондрат Р.М., Смоліков Л.Р., Бурачок О.В. Підвищення вуглеводневилучення з виснажених родовищ природних вуглеводнів // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази»*, 23-25 травня 2018 р. – Івано-Франківськ, 2018. – 367 с. – с. 204-206.

19. Бурачок А.В. Применение теории фракталов для моделирования строения коллекторов нефти и газа // *Тезисы докладов Второй Сибирской международной конференции молодых ученых по наукам о Земле*. – Новосибирск: Новосиб. Гос. ун-т, 2004. – 213 с. – С. 30-32.

20. Бурачок О.В., Кондрат О.Р., Бікман Є.С., Матківський С.В., Першин Д.В. Особливості створення PVT-моделей за умови обмеженої вхідної інформації // *Modern science: problems and innovations. Abstracts of the 5th International scientific and practical conference*. SSPG Publish. Stockholm, Sweden. 2020. Pp. 21-27.

21. Бурачок О.В., Кондрат О.Р. Синергія при нагнітанні CO<sub>2</sub> у виснажений газоконденсатний поклад: геологічне захоронення та додатковий видобуток вуглеводнів // *Енергоефективність: наука, технології, застосування: Матеріали V Всеукраїнської науково-практичної конференції*.

Частина І. Київ, 25 листопада 2020 р. – Київ: НПУ імені М.П. Драгоманова, 2020. – 56 с. – С. 11-14.

22. Кондрат О.Р., Бурачок О.В. Оцінка ефективності використання вуглеводневих розчинників для підвищення конденсатовилучення // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова галузь: Перспективи нарощування ресурсної бази»*, 08-09 грудня 2020 р. – Івано-Франківськ, 2020. – 189 с. – С. 104-106.

23. Burachok O., Kondrat O. Optimization of Gas-condensate Reservoir EOR Technology under Geological Uncertainties. *EAGE IOR 2019 – 20th European Symposium on Improved Oil Recovery*, Pau, 8-11 April 2019, France, Tu P14. (Фахова конференція включена до наукометричної бази Scopus).

24. Romi A., Burachok O., Nistor M.L., Spyrou C., Seilov Y., Djuraev O., Matkivskyi S., Grytsai D., Goryacheva O., Soyma R.. Advantage of Stochastic Facies Distribution Modeling for History Matching of Multi-stacked Highly-heterogeneous Field of Dnieper-Donetsk Basin. *Fourth EAGE Conference on Petroleum Geostatistics*, 2-6 September 2019, Florence, Italy, ThP11. (Фахова конференція включена до наукометричної бази Scopus).

25. Burachok O., Zeug M. Ranking and Representative Model Selection: Eliminating the Gap Between Static Volumetric and Flow-Based Approaches. *International Scientific and Technical Conference “Geopetrol 2018”*, Zakopane-Koscielisko, September 17-20, 2018. pp. 927-936.

26. Burachok O. EOS PVT modeling of gas-condensate fluids with limited lab experimental data. *Student Technical Congress Program, German Section SPE*, 14-15 November 2019, Aachen, Germany. Page 58.

27. Burachok O., Pershyn D., Spyrou C., Turkarslan G., Nistor M.L., Grytsai D., Matkivskyi S., Bikman Y., Kondrat O. Gas-Condensate PVT Fluid Modeling Methodology Based on Limited Data. *82nd EAGE Annual Conference & Exhibition*, 8-11 December 2020. (Фахова конференція включена до наукометричної бази Scopus).

28. Burachok O. Flow-based Geological Model Screening and Ranking // Actual trends of modern scientific research. Abstracts of the 2nd International scientific and practical conference. MDPC Publishing. Munich, Germany. 2020. pp. 63-67.

29. Burachok O.V., Kondrat O.R., Matkivskyi S.V. Investigation of the efficiency of gas condensate reservoirs waterflooding at different stages of development // *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020*. E3S Web of Conferences 230, 01010 (2021). (Фахова конференція включена до наукометричної бази Scopus).

30. Burachok O., Nistor M.L., Sosio G., Kondrat O., Matkivskyi S. Evaluation of potential applicability of depleted gas-condensate fields for CO<sub>2</sub> sequestration and EOR: synthetic case study // *1st Geoscience & Engineering in Energy Transition Conference*, 16–18 November 2020, Strasbourg, France. (Фахова конференція включена до наукометричної бази Scopus).

31. Matkivskyi S.V., Kondrat O.R., Burachok O.V. Investigation of the influence of the carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) injection rate on the activity of the water pressure system during gas condensate fields development // *Gas Hydrate Technologies: Global Trends, Challenges and Horizons – 2020*. E3S Web of Conferences 230, 01011 (2021).