

## ВПЛИВ ТЕМПУ ЗАКОНТУРНОГО НАГНІТАННЯ АЗОТУ У ВИСНАЖЕНИЙ ГАЗОВИЙ ПОКЛАД КРУГОВОЇ ФОРМИ НА КОЕФІЦІЄНТ ВИЛУЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО ГАЗУ

*Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова*

*ІФНТУНГ; м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 242195,  
e-mail: rengr@nung.edu.ua, lilya.matiishun@gmail.com*

*Обґрунтовано застосування азоту для витіснення залишкового природного газу з виснажених газових покладів. Виконано аналіз останніх досліджень і публікацій із застосування азоту для підвищення газовилучення з виснажених газових покладів. З використанням ліцензованої комп'ютерної програми CMG досліджено вплив темпу нагнітання азоту у виснажений газовий поклад на показники його розробки (пластовий тиск, дебіт газу, вміст азоту у видобувному газі і коефіцієнт газовилучення по залишковому газу).*

**Ключові слова:** поклад, свердловина, газ, азот, витіснення, газовилучення, темп.

*Обосновано применение азота для вытеснения остаточного газа из истощенных газовых залежей. Выполнен анализ последних исследований и публикаций по применению азота для повышения газоотдачи из истощенных газовых залежей. С использованием лицензированной компьютерной программы CMG исследовано влияние темпа нагнетания азота в истощенную газовую залежь на показатели его к разработке (пластовое давление, дебит газа, содержание азота в добываемом газе и коэффициент газоотдачи по остаточному газу).*

**Ключевые слова:** залежь, скважина, газ, азот, вытеснение, газоотдача, темп.

*The use of nitrogen for the replacement of residual gas from depleted gas deposits is justified. The latest research and publications on the use of nitrogen to improve gas recovery from depleted gas deposits is analyzed. Using the licensed computer program CMG, the impact of the rate of nitrogen injection into the depleted gas reservoir on its indices for development (reservoir pressure, gas production, nitrogen content in the production gas, and gas recovery factor for the residual gas) has been studied.*

**Key words:** reservoir, well, gas, nitrogen, displacement, gas recovery, rate.

### **Постановка проблеми дослідження**

Родовища природних газів України значною мірою виснажені. Частина з них перебуває на завершальній стадії розробки, окремі – на межі припинення рентабельного видобутку газу. Виснажені родовища ще містять значні залишкові запаси газу і в найближчі роки будуть визначати рівень видобутку природного газу в Україні. Одним із методів підвищення поточного видобутку газу і кінцевого газовилучення з виснажених родовищ є витіснення залишкового природного газу неуглеводневими газами, зокрема азотом [1-11]. Порівняно з іншими неуглеводневими газами азот має низьку корозійну здатність, що дуже важливо для забезпечення безаварійної роботи газопромислового обладнання. Величезні запаси азоту містяться в атмосферному повітрі (78 % об.). Методи отримання азоту з повітря прості, дешеві, доступні і добре вивчені. Тому заслуговують уваги дослідження із застосування азоту для підвищення газовилучення з виснажених газових родовищ.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

За результатами лабораторних досліджень витіснення природного газу (метану) з однорідних і неоднорідних моделей пласта різними неуглеводневими газами найкращими витіснювальними властивостями характеризується діоксид вуглецю (CO<sub>2</sub>) [9]. Дещо менші витіснювальні властивості мають димові гази і азот.

Проте діоксин вуглецю характеризується високою корозійною властивістю. Не завжди його можна отримати у необхідній кількості. Застосування азоту в якості робочого агента зумовлено легкістю його отримання у промислових масштабах, меншими витратами на виробництво порівняно з іншими неуглеводневими газами та меншою стисливістю за високих тисків.

У роботах [1-4] наведено результати досліджень процесу витіснення залишкового природного газу азотом з виснажених газових покладів квадратної та кругової форм. За результатами досліджень встановлено оптимальні значення тиску початку нагнітання і тривалості періоду нагнітання азоту у поклад, а також вплив на коефіцієнт газовилучення системи розміщення видобувних свердловин на площі газонасності. Однак, на сьогодні не досліджено вплив темпу нагнітання азоту на коефіцієнт газовилучення по залишковому газу, що послужило підставою для написання додаткових досліджень.

### **Формулювання цілей статті**

За результатами комп'ютерного дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом з виснаженого газового покладу кругової форми оцінити вплив темпу нагнітання азоту у пласт на коефіцієнт газовилучення по залишковому газу.

**Методика дослідження**

Для оцінки впливу темпу нагнітання азоту у виснажений газовий поклад кругової форми на коефіцієнт газовилучення по залишковому газу виконано комп'ютерне дослідження за допомогою ліцензованої комп'ютерної програми CMG (Computer Modelling Group). Дослідження виконано на прикладі гіпотетичного газового покладу кругової форми з радіусом початкового контуру газонасиченості 3000 м, площа газонасиченості –  $28,26 \cdot 10^6 \text{ м}^2$ , товщина пласта – 12 м, коефіцієнтом відкритої пористості – 0,14, коефіцієнтом початкової газонасиченості – 0,78, коефіцієнтом проникності пласта –  $0,2 \text{ мкм}^2$ . Глибина залягання продуктивного пласта (середня глибина свердловини) – 3200 м, початковий пластовий тиск – 33 МПа, пластова температура – 340 К, відносна густина газу - 0,6. Запаси газу, підраховані програмою CMG, дорівнюють  $11,713 \text{ млрд. м}^3$ .

Газовий поклад розробляють в режимі виснаження пластової енергії 12 видобувними свердловинами, які розміщені у вигляді кільцевої батареї радіусом 1500 м. Свердловини експлуатують на режимі постійної депресії на пласт 0,02 МПа. Початковий дебіт газу однієї свердловини становив  $125 \text{ тис. м}^3/\text{доб}$ .

Після зниження пластового тиску на 90 % від початкового значення здійснюють нагнітання у пласт азоту через 12 нагнітальних свердловин, які розміщені у вигляді кільцевої батареї з радіусом 3000 м на початковому контурі газонасиченості. Наведене значення пластового тиску (0,1 від початкового тиску) у багатьох дослідженнях приймається як тиск «закидування» розробки газового покладу. Під час нагнітання азоту у пласт продовжували експлуатацію видобувних свердловин.

Дослідження виконано для різних співвідношень темпів нагнітання азоту і видобутку газу: 1:1; 1,25:1; 1,5:1; 1,75:1; 2:1. У дослідженнях темп видобутку газу з виснаженого газового покладу приймали постійним і рівним його значенню на момент початку нагнітання азоту у поклад. Для кожного варіанту нагнітання азоту у пласт здійснювали до того часу, поки він не прорветься до видобувних свердловин або вміст його у видобувному газі досягне 5 % об.

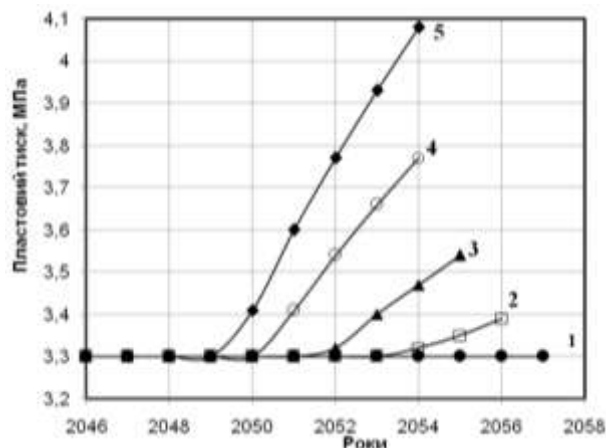
**Результати дослідження**

Газовий поклад уведено в розробку 01.01.2016 року. Нагнітання азоту у поклад розпочато 01.09.2045 року після зниження пластового тиску на 90 % від початкового значення. На зазначений момент часу поточний коефіцієнт газовилучення покладу дорівнював 81,82 %, а запаси залишкового газу –  $2129,4 \text{ млн. м}^3$ .

Розрахунки технологічних показників розробки покладу виконували з кроком у часі 1 рік. Для кожного моменту часу визначали пластовий тиск, дебіт видобувної свердловини по газу та азоту, вміст азоту у свердловинній продукції і розраховували коефіцієнт газовилучення по залишковому газу. За результатами розрахунків будували графічні залежності зміни у часі досліджуваних технологічних показ-

ників дорозробки покладу (рис. 1-4) і залежності коефіцієнта вилучення залишкового газу від співвідношення темпу нагнітання азоту у поклад  $Q_a$  і темпу видобутку газу  $Q_r$  (рис. 5).

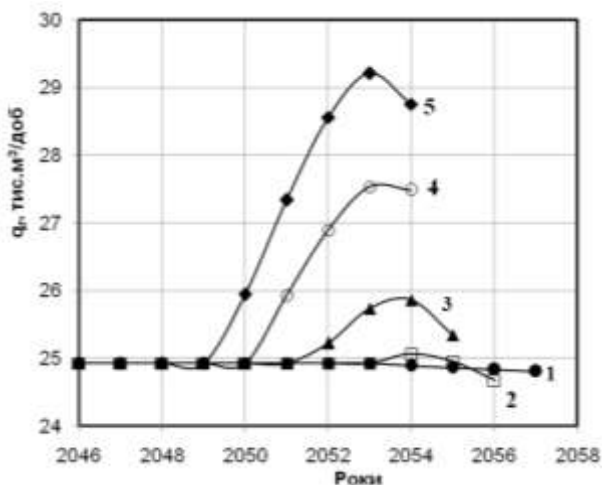
Згідно з результатами розрахунків у процесі нагнітання азоту у виснажений газовий поклад пластовий тиск зростає тим раніше і в більшій степені, чим більше співвідношення темпів нагнітання азоту і видобутку газу  $Q_a/Q_r$  (рис. 1). У початковий період нагнітання азоту у поклад пластовий тиск стрімко зростає і надалі характер його зміни в часі стає близьким до прямолінійного. За рівності у пластових умовах темпу нагнітання азоту у поклад і темпу видобутку газу ( $Q_a=Q_r$ ) пластовий тиск залишається постійним у часі (рис. 1, лінія 1). Для досліджених співвідношень темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу 1,25; 1,5; 1,75; 2,0 пластовий тиск на момент прориву азоту у видобувні свердловини зростає відповідно у 1.002; 1.006; 1.033; 1.045 разів, а на момент вмісту у свердловинній продукції 5 % об. азоту – у 1.027; 1.073; 1.142; 1.236 разів.



1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2

**Рисунок 1 – Зміна у часі пластового тиску для різного співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу**

Підвищення пластового тиску у процесі нагнітання азоту у поклад сприяє збільшенню дебіту свердловин (рис. 2). Дебіт газу плавно зростає у часі і досягає максимального значення у момент прориву азоту у видобувні свердловини, після чого поступово знижується через збільшення вмісту азоту у свердловинній продукції. Для значень співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу 1,25; 1,5; 1,75; 2,0 максимальний дебіт газу досягається відповідно через 100; 99; 94; 90 місяців з початку нагнітання азоту у поклад, а кратність збільшення дебіту газу становить відповідно 1.01; 1.038; 1.105; 1.172. рази. За рівності у пластових умовах значень темпу нагнітання азоту у поклад  $Q_a$  і темпу видобутку газу  $Q_r$  ( $Q_a/Q_r=1$ ) дебіт газу майже протягом усього періоду дорозробки покладу підтримується постійним, а після прориву азоту у видобувні свердловини зменшується (рис. 2, лінія 1).



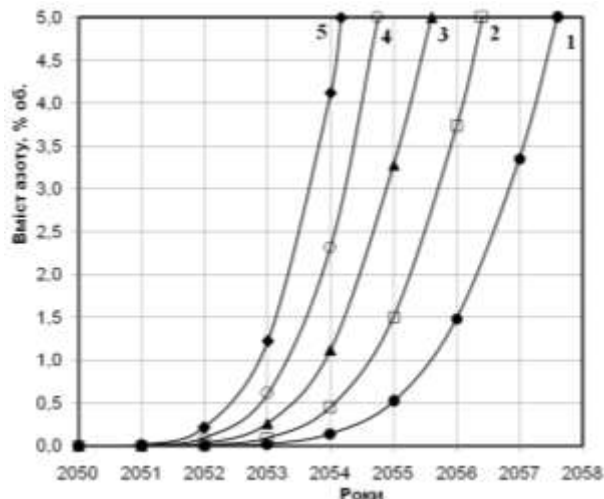
1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2

**Рисунок 2 – Зміна у часі дебіту газу для різного співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу**

Таким чином, при нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад зростає у часі пластовий тиск, що призводить до збільшення дебітів свердловин та устьового тиску. При цьому інтенсифікується процес дорозробки покладу за рахунок збільшення поточного видобутку газу, а за рахунок збільшення устьового тиску покращуються умови роботи систем збору та підготовки газу і подачі його споживачам.

Азот, який нагнітається у виснажений газовий поклад через нагнітальні свердловини, рухається по пласту і через певний період часу досягає видобувних свердловин. Прорив азоту у видобувні свердловини відбувається тим раніше, чим більше співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу (табл. 1, рис. 3). З моменту прориву у видобувні свердловини вміст азоту у свердловинній продукції стрімкіше збільшується з наростаючим темпом. При збільшенні співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу від 1 до 2 тривалість періоду дорозробки покладу з нагнітанням азоту у пласт зменшується від 81 до 61 місяця на момент прориву азоту у видобувні свердловини і від 142 до 102 місяців на момент досягнення вмісту азоту у видобувному газі 5 % об. (табл. 1).

У процесі дорозробки газового покладу з нагнітанням азоту коефіцієнт газовилучення по залишковому газу поступово зростає і тим



1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2

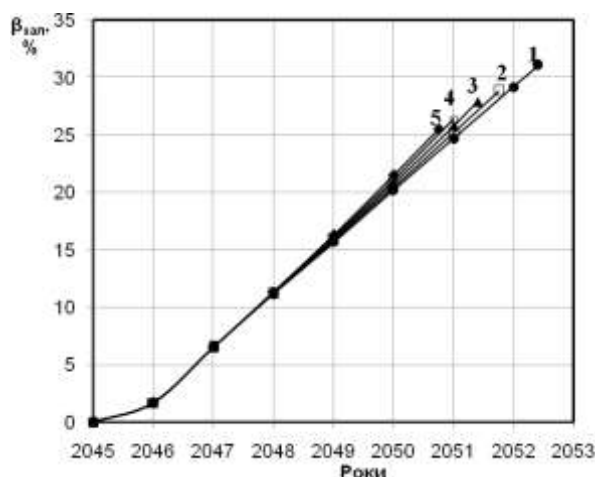
**Рисунок 3 – Зміна у часі вмісту азоту у видобувному газі для різного співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу**

більший, чим менше співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу (рис. 4). У часі різниця між значенням коефіцієнта газовилучення по залишковому газу для різних значень співвідношень  $Q_a/Q_r$  зростає. Для досліджених значень співвідношення  $Q_a/Q_r$  (1; 1,25; 1,5; 1,75; 2) коефіцієнт вилучення залишкового газу на момент прориву азоту у видобувні свердловини становить відповідно 31.09 %; 28.84 %; 27.91 %; 26.39 %; 25.57 %, а за вмісту у видобувному газі 5 % об. азоту – 53.97 %; 51.55 %; 49.33 %; 47.30 %; 45.65 %. Наведені дані свідчать про досить високі значення коефіцієнта газовилучення по залишковому газу і технологічну ефективність застосування азоту для довилучення залишкового газу з виснажених газових покладів.

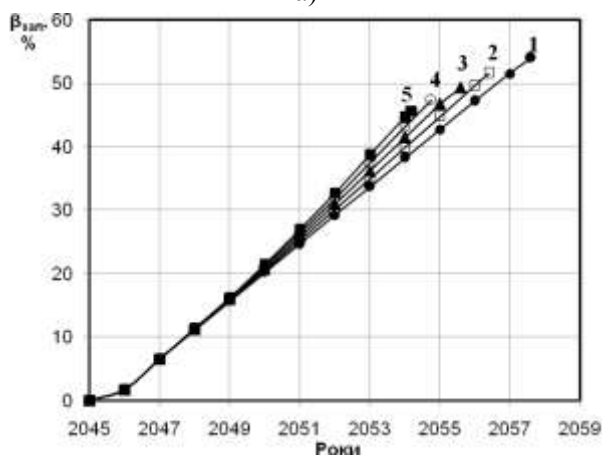
На рисунку 5 наведено узагальнені залежності коефіцієнта газовилучення по залишковому газу від співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу. На момент прориву азоту у видобувні свердловини розглядувана залежність описується квадратичним рівнянням і поступово виположується із збільшенням співвідношення  $Q_a/Q_r$ , а при досягненні вмісту 5 % об. азоту у видобувному газі має вигляд, близький до прямолінійного. Для досліджених значень співвідношення  $Q_a/Q_r$  від 1 до 2 абсолютна різниця між крайніми значеннями

**Таблиця 1 – Тривалість періоду дорозробки покладу з нагнітанням азоту у пласт**

Співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу	Тривалість періоду дорозробки покладу з нагнітанням азоту (місяці)	
	на момент прориву азоту у видобувні свердловини	на момент вмісту азоту у видобувному газі 5 % об.
1	81	143
1.25	73	129
1.5	69	118
1.75	64	109
2	61	102



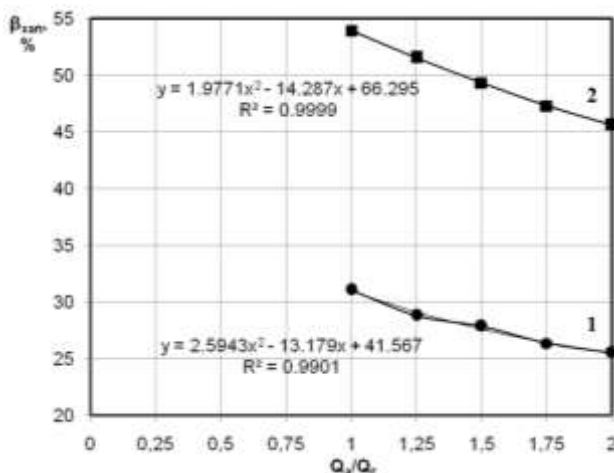
а)



б)

1 – 1; 2 – 1,25; 3 – 1,5; 4 – 1,75; 5 – 2

**Рисунок 4 – Зміна у часі коефіцієнта газовилучення по залишковому газу для різного співвідношення темпу нагнітання азоту у поклад і видобутку газу на момент прориву азоту у видобувні свердловини (а) і вмісту у видобувному газі 5 % об. азоту (б)**



**Рисунок 5 – Залежність коефіцієнта газовилучення по залишковому газу від співвідношення темпу нагнітання азоту у поклад і видобутку газу на момент прориву азоту у ви-**

**добувні свердловини (1) і вмісту у видобувному газі 5 % об. азоту (2)**

коефіцієнта газовилучення на момент прориву азоту у видобувні свердловини становить 5.52 %, а за вмісту у видобувному газі 5 % об. азоту – 8.32 %. Абсолютна різниця між коефіцієнтами газовилучення по залишковому газу за вмісту 5 % об. азоту у свердловинній продукції і на момент прориву азоту у видобувні свердловини становить: для значення співвідношення  $Q_a/Q_g=1 - 22.88\%$ , для  $Q_a/Q_g=2 - 20.08\%$ .

Наведені дані свідчать про доцільність продовження експлуатації видобувних свердловин після прориву в них азоту до досягнення допустимого вмісту азоту у видобувному газі, згідно з вимогами галузевого стандарту, що дозволить видобути разом з азотом додаткову кількість залишкового газу. У розглянутому прикладі видобувається з покладу 20-22 % залишкового газу.

Згідно з результатами виконаних досліджень із збільшенням темпу нагнітання азоту у поклад порівняно з темпом видобутку газу на початок реалізації процесу коефіцієнт газовилучення по залишковому газу зменшується (для умов розглянутого прикладу на 5.52 – 8.32 %). Проте із збільшенням темпу нагнітання азоту у поклад зростають пластовий та устьовий тиски і дебіти свердловин, що дозволяє збільшити поточний видобуток газу і скоротити термін дорозробки покладу.

**Висновки**

Результати досліджень впливу темпу законтурного нагнітання азоту у виснаженій газовій поклад кругової форми після зниження пластового тиску до мінімального значення свідчать про технологічну ефективність розглянутого процесу. Із покладу видобувається до 50 % залишкового газу і більше. При цьому 20-22 % залишкового газу видобується після прориву азоту у видобувні свердловини, що свідчить про доцільність спільного видобутку із свердловин газу з азотом до моменту досягнення допустимого вмісту азоту у свердловинній продукції. Згідно з результатами досліджень із збільшенням співвідношення темпів нагнітання азоту у поклад і видобутку газу коефіцієнт газовилучення зменшується. Найбільший коефіцієнт газовилучення отримано за рівності у пластових умовах темпу нагнітання азоту у поклад і темпу видобутку газу. Проте із збільшенням темпу нагнітання азоту у поклад зростає пластовий тиск. В результаті збільшується поточний видобуток газу з покладу і скорочується термін його дорозробки. Тому в кожному конкретному випадку параметри процесу нагнітання азоту у поклад (темп та інші показники) слід вибирати на підставі техніко-економічних розрахунків.

*Література*

- 1 Кондрат Р.М. Дослідження впливу тиску початку нагнітання азоту у виснажене газове родовище на характеристики процесу вилучення залишкового природного газу / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – №2(59). – С. 51-57.
- 2 Кондрат Р.М. Enhanced gas recovery from depleted gas fields with residual natural gas displacement by nitrogen / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Науковий вісник НГУ. – 2017. – № 5. – С. 23-28. – ISSN 2071-2227.
- 3 Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова. Вплив розміщення видобувних свердловин на коефіцієнт газовилучення при периферійному нагнітанні азоту у виснажений газовий поклад кругової форми / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2017 №4(65). С.34-39.
- 4 Кондрат Р.М. Дослідження процесу витіснення залишкового природного газу азотом із виснаженого газового родовища за різної тривалості періоду нагнітання азоту в пласт / Р.М. Кондрат, Л.І. Хайдарова // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2016. – № 1(58). – С. 60-67.
- 5 Ермаков П.П. Нагнетание азота в пористые среды для увеличения нефтеотдачи / П.П. Ермаков, Н.А. Еремин // Геология, геофизика и разработка нефтяных месторождений. – 1996. – № 11. – С.45-50.
- 6 Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. Часть 2 / [Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С. и др.] – М.: Ижевск, Институт компьютерных технологий. НИИ «Регулярная хаотическая динамика», 2009. – 484 с.
- 7 Игнатьев Н.А. Опыт и перспективы закачки азота в нефтегазовой промышленности / Игнатьев Н.А., Синцов И.А. // Фундаментальные исследования. – 2015. – Вып. 11 (часть 4). – С. 678-682.
- 8 Синцов И.А. Повышение нефтеотдачи путем закачки углекислого газа. Нефть и газ Западной Сибири: материалы международной научно-технической конференции. Т. 2. Разработка и эксплуатация нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождений / И.А. Синцов, О.С. Трухина; отв. ред. П. В. Евтин. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2015. – 310 с.
- 9 Oldenburg C.M. and Benson S.M. CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Production and Carbon Sequestration // SPE International Petroleum Conference and Exhibition. – 2002. – SPE 74367.
- 10 SPE-169578-MS CO<sub>2</sub> Injection for Enhanced Gas Recovery Sumeer Kalra, Xingru Wu, University of Oklahoma, Colorado, USA, 16–18 April 2014.
- 11 Recovery of Gas Condensate by Nitrogen Injection Compared With Methane Injection. SPE 30795.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
15.05.18*

*Рекомендована до друку  
професором **Тарком Я.Б.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук **Акульшиним О.О.**  
(ПАТ «Український нафтогазовий інститут»,  
м. Київ)*