

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ПІДЗЕМНОГО СХОВИЩА ГАЗУ НА РІЗНИХ ЕТАПАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О.Т. Чернова<sup>1</sup>, Г.М. Кривенко<sup>2</sup>, О.В. Кривенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

<sup>2</sup>к.т.н., доцент, доцент кафедри технологій захисту навколишнього середовища  
та безпеки праці,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0000-0001-5188-3032

<sup>3</sup>аспірант кафедри транспортування та зберігання енергоносіїв,  
Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна  
ORCID ID: 0009-0008-7126-3701

### Анотація

**Вступ.** Підземні газосховища формують ефективну систему підземного зберігання газу, що є ключовим технологічним елементом існуючої газотранспортної системи країни та дає можливість вирішувати низку інженерно-технологічних завдань. У зв'язку з важливістю безперебійного та надійного функціонування таких сховищ актуальною залишається проблема контролю їхнього стану, визначення структурних особливостей активної зони та картування напрямків поширення високопроникних і застійних зон у межах резервуарного пласта. **Метою** є аналіз характеристик підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (геолого-промислових параметрів пластової системи, змін об'ємної густини газу та фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи). **Результати.** Досліджено характер поведінки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх зміни у часі, які пов'язані зі зміною режимів експлуатації, за допомогою інформативного параметра об'ємної густини порід. Наведено методіку розрахунку зміни об'ємної густини газу у випадку чисто газового режиму експлуатації газосховища. Проаналізовано зміну фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи у зв'язку із циклічною експлуатацією газосховища. Розглянуто питання об'ємної деформації глинистих порід покришок або глинистих пропластків у породах-колекторах через зміну напруженого стану в породах-колекторах, що впливає на зміну коефіцієнта пористості для глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Розглянуто вплив чинників на втрати газу підземних сховищах. **Висновки.** Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань модернізації та експлуатації підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

**Ключові слова:** зміна густини газу, водонасичення газоносних пластів, об'ємна деформація, коефіцієнт пористості, втрати природного газу, чинники.

**CHARACTERISTICS OF UNDERGROUND GAS STORAGE  
AT DIFFERENT STAGES OF OPERATION**

**O.T. Chernova<sup>1</sup>, G.M. Kryvenko<sup>2</sup>, O.V. Kryvenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0000-0002-6424-7569

<sup>2</sup> PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Environmental Protection Technologies and Occupational Safety,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0000-0001-5188-3032

<sup>3</sup> PhD Student at the Department of Transportation and Storage of Energy Carriers,

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine*  
ORCID ID: 0009-0008-7126-3701

**Summary**

**Introduction.** *Underground storage facilities of gas create a powerful underground gas storage system, which is an important technological link in the country's existing gas transportation system, capable of solving a number of issues. Given the importance of uninterrupted and effective operation of underground storage facilities, the problem of monitoring their condition, determining the structural features of the active zone and mapping the directions of extension of highly permeable and stagnant zones within the reservoir layer is relevant. **Purpose.** The purpose is to analyze the characteristics of underground gas storage at different stages of operation. To achieve the goal, the following research tasks were formulated: study of changes in gas density, water saturation of gas-bearing layers and compaction of clay rocks, which are caps, losses of natural gas in underground storages. **Results.** The nature of the behavior of geological and industrial parameters of the layer system of underground gas storages and their changes over time, which are associated with changes in operating modes, was studied using the informative parameter of rock bulk density. The method of calculating the change in gas bulk density in the case of a purely gas mode of operation of a gas storage facility is presented. The change in the filtration and capacity properties of the reservoir system in connection with the cyclic operation of a gas storage facility is analyzed. The issue of the volumetric deformation of clayey rocks of the caps or clayey interlayers in reservoir rocks is considered due to a change in the stress state in reservoir rocks, which affects the change in the porosity coefficient for clayey rocks due to the cyclic operation of underground gas storage facilities. The influence of factors on gas losses in underground storage facilities is considered. **Conclusions.** The results of this study can be used to support operational decisions for underground gas storage facilities, enabling informed adjustments at different stages of operation to optimize natural gas retention.*

**Key words:** *change in gas density, water saturation of gas-bearing reservoirs, volumetric deformation, porosity coefficient, natural gas losses, factors.*

**Вступ.** Газові підземні сховища – це стратегічний енергетичний ресурс, який дає можливість забезпечити енергетичну безпеку, стабільність постачань і захист від зовнішніх ризиків, підтримувати опалювальні сезони та зменшити залежність

від імпорту, а також відіграє важливу роль у європейській енергетичній системі. Незважаючи на складнощі, викликані військовими діями, Україна накопичила достатні запаси для опалювального сезону.

Частина газу також імпортується зі Східної Європи (Польщі, Угорщини, Словаччини та ін.), щоб підтримувати рівень запасів.

Слід зауважити, що підземні сховища газу (ПСГ) під час війни функціонують у стабільному режимі, забезпечуючи внутрішні потреби та зберігаючи європейські запаси, попри ризики обстрілів. Основні потужності (понад 12 млрд куб. м) зосереджені переважно на заході. Газова інфраструктура є більш стійкою за електричну, але потребує захисту.

**Постановка проблеми.** Без використання ПСГ важко уявити нормальне функціонування газотранспортної системи будь-якої країни. Підземні сховища залишаються захищеними, загальна система зберігання є стійкою, хоча наземні об'єкти зазнавали пошкоджень. ПСГ забезпечують балансування споживання, підтримання тиску в трубопроводі для надійного постачання в разі зниження температур та резерв на випадок аварій. Слід відмітити, що європейські компанії активно використовують українські сховища, закачуючи туди свої запаси газу (для зберігання), що свідчить про довіру до надійності системи. Під час війни газотранспортна система України зберігає гнучкість, що дає змогу оперативно вирішувати питання постачання в разі локальних пошкоджень, оскільки на цей час трубопровідна система споруджена з можливістю перекачування газу різними шляхами, змінюючи напрямки потоків. У випадку аварій чи пошкодження окремої ділянки транспортування не зупиняється, а транспортується резервними шляхами, продовжуючи постачання газу.

Отже, необхідно провести детальний аналіз, які чинники впливають на циклічну експлуатацію підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

**Актуальність дослідження та зв'язок авторського доробку з важливими науково-практичними завданнями.** З огляду на стратегічну роль підземних сховищ газу актуальним є завдання забезпечення їх безперебійної та ефективної експлуатації. У цьому контексті особливої уваги потребують питання контролю технічного й геологічного стану ПСГ, виявлення структурних особливостей активної зони та просторового оконтурювання зон із підвищеною проникністю й застійних ділянок у межах пластів-резервуарів. Розв'язання зазначених завдань можливе на основі аналізу динаміки геолого-промислових параметрів пластової системи ПСГ та їх часових змін, обумовлених варіаціями режимів експлуатації. Саме в цьому полягає практичне значення отриманих автором наукових результатів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенням завдань, пов'язаних із впливом рівня зовнішнього навантаження на деформування порід і зміну їх деформаційних і ємніснофільтраційних властивостей, у різні роки займалися Савків Б. П., Гімер Р. Ф., Фик І. М., Федутенко А. М., Середюк М. Д. та інші [1; 2; 3]. У [4] наведено, що для різних амплітудних груп простежується певна залежність стабілізації росту об'ємних деформацій зі збільшенням кількості циклів зміни порового тиску. Дослідження геомеханічних процесів як фактор карбонізаційних перетворень наведено у [5]. Питанню зміни коефіцієнта пористості для

глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу присвячені роботи [6; 7]. У [8] обґрунтовано параметри зон зміцнення порід навколо виробок та критичної інфраструктури, запропоновано методи ін'єкційного закріплення, що дають можливість оптимізувати створення захисного екрану, знизити деформації та підвищити стійкість підземних споруд. З аналізу літературних джерел можна зробити висновок, що виникла потреба проаналізувати характеристики підземного сховища газу на різних етапах експлуатації, оскільки за зміни режимів роботи сховища відбувається зміна експлуатаційних параметрів.

**Метою** є аналіз характеристик підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (геолого-промислових параметрів пластової системи, змін об'ємної густини газу та фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи). Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі задачі досліджень: дослідження зміни густини газу, водонасичення газонесних пластів та ущільнення глинистих порід, які є покривками, втрати природного газу в ПСГ.

Новизна полягає у комплексному дослідженні чинників, що впливають на циклічну експлуатацію підземних сховищ газу (режим роботи підземних сховищ газу, за якого газ регулярно закачується й відбирається протягом року або навіть кілька разів на рік, а не зберігається довго без руху). Результати наукової роботи дадуть змогу вчасно розробити заходи щодо запобігання виникнення потенційних загроз під час експлуатації підземних сховищ газу.

**Викладення основного матеріалу.** Дослідження динаміки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх часових змін, зумовлених варіаціями режимів експлуатації, здійснюється з використанням інформативного показника об'ємної густини гірських порід. Визначальною особливістю процесів, що відбуваються в ПСГ, є циклічний характер впливу операцій нагнітання та відбору газу на вміщуючі породи-колектори, причому швидкість цих процесів суттєво перевищує відповідні показники, характерні для природних газових родовищ.

Варто зазначити, що геолого-промислові параметри пластової системи ПСГ визначають природні та техногенні умови функціонування сховища й безпосередньо формують чинники, що впливають на його циклічну експлуатацію. Такі параметри, як колекторські властивості пласта, неоднорідність та тріщинуватість порового простору, пластовий тиск і температурні умови, водонасиченість та наявність газоводяних контактів, зумовлюють можливі режими закачування, зберігання та відбору газу. Отже, чинники циклічної експлуатації ПСГ є проявом впливу геолого-промислових параметрів на технологічні та експлуатаційні характеристики сховища.

Безпосереднє дослідження змін геолого-петрофізичних параметрів у підземних газосховищах потребує значних матеріальних витрат, у зв'язку із чим на практиці широко застосовуються непрямі методи аналізу. До таких методів належать розрахунки на основі даних багаторічних експлуатаційних спостережень за роботою газосховищ, лабораторні дослідження зразків порід-колекторів та їх аналогів в умовах, максимально наближених до пластових умов ПСГ, а також математичне моделювання фізичних процесів, що відбуваються в підземних газосховищах.

У разі експлуатації газосховища в чисто газовому режимі динамічні процеси, що відбуваються в газонасичених пластах підземного сховища газу, зумовлюють

зміну об'ємної густини газу, а отже, об'ємної густини газонасиченої породи. Визначальним чинником при цьому є варіація густини газу, спричинена його стисненням або розширенням у процесі циклічної експлуатації. Об'ємну густину газонасиченої породи  $\sigma_n$  можна визначити з використанням відомої петрофізичної залежності [4]:

$$\sigma_n = \sigma_{ск} \cdot (1 - K_n) + \sigma_g \cdot K_n, \quad (1)$$

де  $\sigma_{ск}$  – густина скелета породи;  $\sigma_g$  – густина газу;  $K_n$  – коефіцієнт абсолютної пористості.

Густина газу  $\sigma_g$  залежить від його хімічного складу та пластових умов і може бути з достатньою точністю визначена з використанням рівняння стану реального газу (узагальненого рівняння Клапейрона – Менделєєва):

$$p \cdot V = Z_r \cdot n \cdot R \cdot T, \quad (2)$$

де  $p$  – пластовий тиск, МПа;  $T$  – температура в пласті, К;  $V$  – об'єм газу, м<sup>3</sup>;  $Z_r = Z_r(p, T)$  – коефіцієнт стисливості газу;  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(моль·К);  $n$  – кількість газу, моль.

$$n = \frac{m}{\mu}, \quad (3)$$

де  $m$  – маса газу;  $\mu$  – молярна маса.

Підставляючи співвідношення  $\sigma_g = m/V$  та (3) у (2), отримуємо для густини газу:

$$\sigma_g = \frac{p \cdot \mu}{Z_r \cdot R \cdot T}. \quad (4)$$

Зміна фільтраційно-ємнісних властивостей пластової системи є відомим наслідком циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Порівняльний аналіз результатів лабораторних досліджень і чисельного моделювання показує, що найбільше зменшення пористості відбувається зі зростанням амплітуди порового тиску, при цьому порядок отриманих величин є узгодженим [4]. Для модельного зразка пісковика з початковою пористістю 42 %, амплітудою коливань порового тиску 5 МПа та кількістю циклів, що дорівнює шести, максимальне зниження пористості становило 0,2 %. При цьому з кожним наступним циклом спостерігається поступове зменшення коефіцієнта пористості (рис. 1). Аналіз експериментальних даних свідчить, що незалежно від початкового значення пористості її суттєве зниження відбувається до 7–8-го циклу навантаження. Подальша експлуатація практично не призводить до змін ємнісних параметрів пласта-колектора. З огляду на те що на Дашавському ПСГ на теперішній час виконано 27 повних циклів нагнітання та відбору газу із залученням усього порового об'єму відповідно до технологічного проекту циклічної експлуатації, зміну коефіцієнта пористості пластової системи можна вважати незначною та такою, що не чинить істотного впливу на загальну зміну геогустинних властивостей газонасичених пластів.

Насиченість порового простору флюїдом визначається як частка об'єму відповідного флюїду в загальному об'ємі пор, які він займає. За природних умов пористе середовище гірських порід повністю заповнене газовою та/або рідкою фазами. Природний газ у пластових умовах завжди перебуває у рівновазі з водяною парою, а газонасичені породи, крім газу, містять також зв'язану, а в окремих

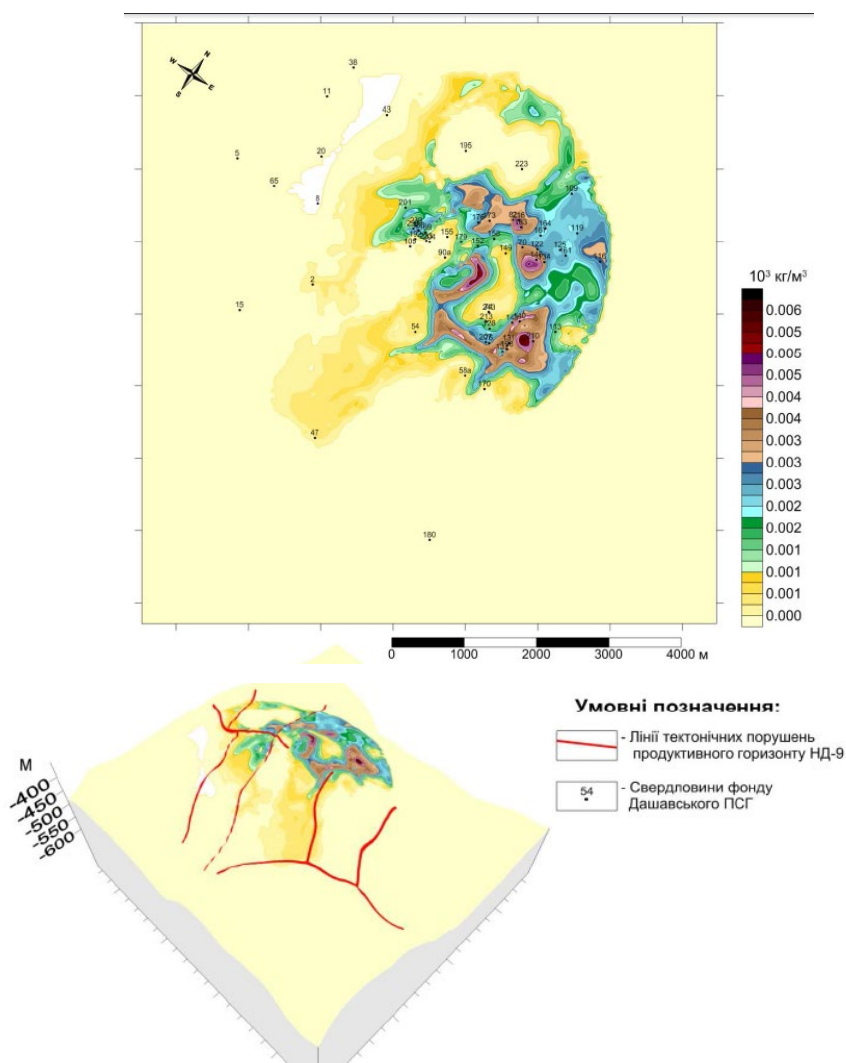


Рис. 1. Геостатистичний зріз у товщі продуктивного горизонту НД-8 нижньодашавської світи сарматського ярусу неогену

випадках і вільну воду. Вологість газу описується концентрацією води в паровій фазі системи «газ – вода» і зазвичай характеризується масовим відношенням водяної пари до сухого газу. За своєю фізичною природою процеси вологоутримання в природному газі є аналогічними до процесів, що відбуваються в повітрі. Кількість води, яка міститься в газі, визначається насамперед термобаричними умовами, зокрема тиском  $P$  та температурою  $T$ . Тривалий час вважалося, що вміст вологи не залежить від компонентного складу газу, а насичений водяною парою природний газ містить таку саму кількість води, як і повітря за ідентичних значень тиску та температури (табл. 1). Проте встановлено, що за низьких тисків ці відмінності є незначними, тоді як зі зростанням тиску розбіжності істотно збільшуються [9].

Таблиця 1

**Вміст води (у грамах) у 1 м<sup>3</sup> повітря, насиченого парами води за різних температури та тиску**

Температура,	Тиск, МПа										
	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
0	4,9	0,98	0,49	0,327	0,254	0,2	0,16	0,14	0,12	0,11	0,098
5	6,8	1,36	0,68	0,453	0,34	0,27	0,23	0,2	0,17	0,15	0,136
10	9,4	1,88	0,94	0,627	0,47	0,38	0,31	0,27	0,24	0,21	0,188
15	12,9	2,58	1,29	0,86	0,65	0,52	0,43	0,37	0,32	0,29	0,258
20	17,4	3,48	1,74	1,16	0,87	0,7	0,58	0,5	0,44	0,39	0,348
25	23,1	4,62	2,31	1,54	1,16	0,92	0,77	0,66	0,58	0,51	0,462

Наявність у складі природного газу вуглекислого газу та сірководню сприяє підвищенню його вологості. Водночас присутність азоту, навпаки, зумовлює її зменшення, оскільки цей компонент знижує відхилення газової суміші від властивостей ідеального газу та характеризується меншою розчинністю у воді. Зі зростанням густини або середньої молекулярної маси газу, що обумовлено підвищенням вмісту важких вуглеводнів, вологість газу зменшується внаслідок взаємодії молекул цих компонентів з молекулами води. Додатковим чинником зниження вологості є наявність у пластових водах розчинених солей, які спричиняють зменшення парціального тиску водяної пари.

Під час експлуатації Дашавського підземного сховища газу разом із видобутим природним газом на поверхню виноситься певна кількість води, обсяги якої реєструються та відображаються у сезонних звітах про роботу ПСГ. Об'єм винесеної води доцільно характеризувати як відношення кількості відібраної води до об'єму відібраного газу. Середні сезонні значення вмісту води в газі, що відбирається, наведені на рисунку 2 [4, 6]. За нормальних умов максимальний внесок води в загальну об'ємну густину газу Дашавського ПСГ становить  $5,6 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>. Оскільки зі зростанням пластового тиску вологонасиченість газу зменшується, за термобаричних умов експлуатації Дашавського газосховища внесок води в загальну об'ємну густину газу буде ще нижчим і становитиме  $0,23 \cdot 10^{-4}$  кг/м<sup>3</sup>, що відповідає приблизно 0,12 % від сумарної зміни густини газу, зумовленої процесами експлуатації ПСГ.

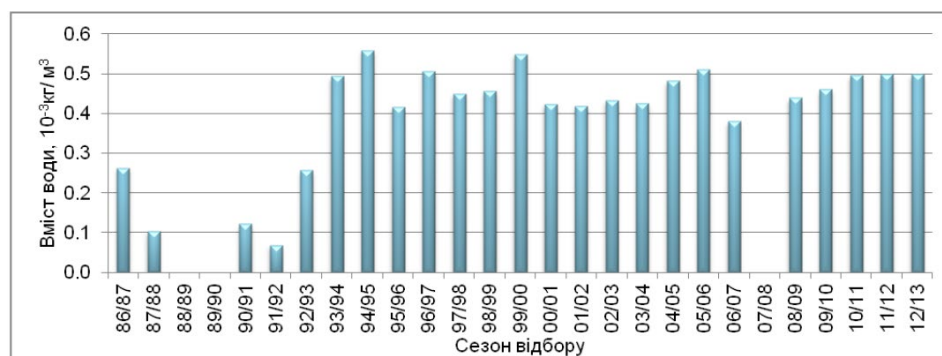


Рис. 2. Середній сезонний вміст води (у кілограмах) у 1 м<sup>3</sup> відібраного газу за нормальних умов (дані Дашавського ВУПЗГ)

Для пластової системи Дашавського підземного сховища газу характерний чисто газовий режим роботи, за якого вплив змін водонасичення газу на загальну зміну густини порід є мінімальним. У зв'язку із цим під час інтерпретації результатів гравітаційного моніторингу для умов Дашавського газового резервуара впливом коливань водонасичення можна знехтувати.

Відомо, що зміна напруженого стану в породах-колекторах спричиняє об'ємну деформацію глинистих покришок або глинистих прошарків у межах колекторських порід. Дослідженням змін коефіцієнта пористості глинистих порід за умов циклічної експлуатації підземних сховищ газу присвячено низку наукових робіт [6, 7]. Узагальнення їх результатів свідчить про відсутність суттєвих змін пористості глинистих покришок і прошарків за регулярного знакозмінного короткотривалого навантаження тривалістю 4–6 місяців. Такий часовий інтервал є недостатнім для прояву фільтраційних процесів флюїдів через малопроникні глинисті покришки, що дає змогу не враховувати ці ефекти в подальших оцінках.

Зв'язок між інформативним показником об'ємної густини гірських порід та об'ємною густиною газу й газонасиченої породи має фізичний та структурно-функціональний характер.

Інформативний показник об'ємної густини гірських порід відображає інтегральні властивості середовища – співвідношення твердої фази та порового простору, ступінь пористості та характер флюїдонасичення. Таким чином, він є узагальненою характеристикою структурного стану породи та її фізичних параметрів.

Об'ємна густина газонасиченої породи формується як результат сумарного внеску мінеральної матриці та флюїдів, що заповнюють поровий простір. За наявності газу густина породи зменшується порівняно з водонасиченим або повністю мінеральним станом, оскільки густина газу суттєво менша за густину рідин і твердої фази. Саме ця різниця і зумовлює зміну інтегрального показника густини.

Отже, інформативний показник об'ємної густини гірських порід виступає базовою фізичною характеристикою середовища, тоді як об'ємна густина газу визначає величину відхилення сумарної густини породи від її фонового (негазонасиченого) стану. Об'ємна густина газонасиченої породи є похідною величиною, що відображає взаємодію структурних параметрів породи та фізичних властивостей флюїду.

Таким чином, між зазначеними параметрами існує прямий фізичний зв'язок: структурний стан породи визначає чутливість її густини до присутності газу, а властивості газу формують величину цієї зміни.

Слід зазначити, що зарубіжний та вітчизняний досвід підземного зберігання газу підтверджує можливість експлуатації свердловин з міжколонними тисками до 2 МПа та витіканням газу до 100 м<sup>3</sup>/добу, тобто витікання газу є планово-передбачуваними [10].

Втрати газу в межах пласта-об'єкта зберігання обумовлені поступовим насиченням малопроникних зон, процесами дифузії та сорбції газу, його розчиненням у воді під час зберігання у водоносному горизонті, а також защемленням газу за поступового заводнення пласта. За оцінками зарубіжних і вітчизняних авторів, такі втрати не перевищують 1–1,5 % активного об'єму за цикл [11; 12].

До внутрішньопластових втрат слід віднести і 9,1 млрд м<sup>3</sup> залишкового буферного об'єму газу, який на цей час замінити немає чим.

Отже, для безпечної експлуатації підземних сховищ газу потрібно проводити аналіз характеристик на різних етапах їх експлуатації.

**Висновки.** Досліджено характер поведінки геолого-промислових параметрів пластової системи підземних сховищ газу та їх зміни в часі, які пов'язані зі зміною режимів експлуатації, за допомогою інформативного параметра об'ємної густини порід. Наведено методику розрахунку зміни об'ємної густини газу у випадку чисто газового режиму експлуатації газосховища. Проаналізовано зміну фільтраційно-емнісних властивостей пластової системи у зв'язку із циклічною експлуатацією газосховища. Розглянуто питання об'ємної деформації глинистих порід покришок або глинистих пропластків у породах-колекторах через зміну напруженого стану в породах-колекторах, що впливає на зміну коефіцієнта пористості для глинистих порід унаслідок циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Розглянуто вплив чинників на втрати газу підземних сховищах. Наведені результати досліджень можуть використовуватися під час вирішення питань експлуатації підземних сховищ газу. Це дасть змогу приймати рішення про внесення змін на різних етапах експлуатації для збереження природного газу.

За результатами аналізу чинників, що впливають на циклічну експлуатацію ПСГ, можливе внесення змін у режими закачування, зберігання та відбору природного газу, зокрема коригування темпів і обсягів закачування, граничних значень пластового тиску, тривалості експлуатаційних циклів, обсягів активного та буферного газу, а також режимів роботи свердловин і кінцевих параметрів відбору, що дає змогу зменшити втрати газу, запобігти обводненню та забезпечити підвищення ефективності й надійності експлуатації ПСГ.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Савків Б. П. Підземне зберігання газу в Україні. Київ : Кий, 2008. 240 с.
2. Орлов О. О., Фик І. М. та ін. Бітумонафтогазогеологічне районування, нафтові і газові родовища та підземні сховища газу України : монографія. Івано-Франківськ : Симфонія форте. 2015. 540 с.
3. Федутенко А. М. Проблеми та перспективи розвитку підземного зберігання газу в Україні. *Науковий вісник. Стан і перспективи підземного зберігання газу в Україні*. 2004. № 2 (8). С. 9–14.
4. Петровський О. П., Федченко Т. О., Трачук А. Ю. Геогустинні характеристики пластової системи підземного сховища газу на різних етапах експлуатації (на прикладі Дашавського підземного резервуару). *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 3 (52). С. 79–86.
5. Bulat A., Krukovskiy O., Bulich Yu., Bezruchko K., Burchak O. Geomechanics as a factor of carbonification transformations at various hierarchical and scale levels. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип.170. С. 156–164.
6. Гімер Р. Ф., Савків Б. П. Технологічні особливості створення ПСГ України. *Розвідка і розробка. Серія «Транспорт і зберігання газу»*. Івано-Франківськ, 1998. С. 15–34.

7. Чернова О.Т. Аналіз розвитку мережі підземних сховищ газу України. *Розробка родовищ : зб. наук. пр.* 2014. Т. 8. С. 261–276.
8. Slashchov I., Slashchova O., Seleznov A., Shmyglov V., Kryvenko Ye., Brizheniuk V. Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Геотехнічна механіка*. 2024. Вип. 170. С. 165–180.
9. Гімер Р. Ф., Гімер П. Р., Деркач М. П. Підземне зберігання газу. Львів : Центр Європи. 2007. 224 с.
10. Чернова О.Т. Технологічні особливості експлуатації підземних сховищ газу. *VI Міжнародна конференція «Актуальні проблеми розвитку світової науки»*. С. 80–86.
11. Ярошенко О. Л. Сталий розвиток підприємств підземного зберігання газу: шляхи досягнення. *Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу*. 2016. № 2. С. 91–96.
12. Chernova O., Vutyaz O., Martyniuk R., Fedorovych I. Rational methods of operation of underground gas storages and mitigation of energy losses. *Nafta-Gaz*. 2022. No. 3. P. 187–196. DOI: 10.18668/NG.2022.03.03.

#### REFERENCES

1. Savkiv, B.P. (2008). Underground gas storage in Ukraine [Pidzemne zberihannya hazu v Ukraini]. Kyiv: Kiy. 240 p. [in Ukrainian].
2. Orlov, O.O., Fyk, I.M., et al. (2015). Bitumen-oil-gas-geological zoning, oil and gas fields, and underground gas storage in Ukraine: Monograph. [Bitumonaftohazogeologichne raionuvannya, naftovi i hazovi rodovyshcha ta pidzemni skhovyshcha hazu Ukrainy]. Ivano-Frankivsk: Symphony Forte. 540 p. [in Ukrainian].
3. Fedutenko, A.M. (2004). Problems and prospects of underground gas storage development in Ukraine [Problemy ta perspektyvy rozvytku pidzemnoho zberihannya hazu v Ukraini]. *Scientific Bulletin. Status and prospects of underground gas storage in Ukraine*, 2(8), 9–14 [in Ukrainian].
4. Petrovskiy, O.P., Fedchenko, T.O., & Trachuk, A.Yu. (2014). Geodensity characteristics of an underground gas storage reservoir at different stages of operation (a case study of the Dashava underground reservoir) [Heohustynni kharakterystyky plastovoi systemy pidzemnoho skhovyshcha hazu na riznykh etapakh ekspluatatsii (na prykladi Dashavskoho pidzemnoho rezervuaru)]. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 3(52), 79–86 [in Ukrainian].
5. Bulat A., Krukovskiy O., Bulich Yu., Bezruchko K., & Burchak, O. (2024). Geomechanics as a factor of carbonification transformations at various hierarchical and scale levels. *Geotechnical Mechanics*, 170, 156–164.
6. Himer, R.F., & Savkiv, B.P. (1998). Technological features of the creation of underground storage facilities in Ukraine [Tekhnologichni osoblyvosti stvorennia PSG Ukrainy]. *Exploration and Development. Series "Transport and Storage of Gas"*. Ivano-Frankivsk. 15–34 [in Ukrainian].

7. Chernova, O.T. (2014). Analysis of the development of underground gas storage network in Ukraine [Analiz rozvytku merezhi pidzemnykh skhovyshch hazu Ukrainy]. *Field Development*, 8, 261–276 [in Ukrainian].
8. Slashchov, I., Slashchova, O., Seleznov, A., Shmyglov, V., Kryvenko, Ye., & Brizheniuk, V. (2024). Justification of the parameters of injection rock hardening zones around mining workings and buried structures of critical infrastructure. *Geotechnical Mechanics*, 170, 165–180.
9. Himer, R.F., Himer, P.R., & Derkach, M.P. (2007). Underground gas storage. Lviv: Center of Europe. 224 [in Ukrainian].
10. Chernova, O. T. (2020). Technological features of underground gas storage operation [Tekhnolohichni osoblyvosti ekspluatatsii pidzemnykh skhovyshch hazu]. *VI International Conference “Actual Problems of World Science Development”* (pp. 80–86) [in Ukrainian].
11. Yaroshenko, O.L. (2016) Sustainable development of underground gas storage enterprises: ways to achieve it [Stalyi rozvytok pidpriemstv pidzemnoho zberihannia hazu: Shliakhy dosiahnennia]. *Scientific Bulletin of the Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas*, 2, 91–96 [in Ukrainian].
12. Chernova, O., Vytyaz, O., Martyniuk, R., & Fedorovych, I. (2022). Rational methods of operation of underground gas storages and mitigation of energy losses. *Nafta-Gaz*, (3), 187–196. <https://doi.org/10.18668/NG.2022.03.03>.

Дата першого надходження статті до видання: 10.03.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 15.04.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 01.07.2026