

УДК 553.98.061.4:622.691.24

Н. Дубей, канд. геол.-мінералог. наук, доц.

E-mail: nata0509@i.ua

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут природничих наук і туризму

вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

ВПЛИВ ГЕОЛОГІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПЛАСТІВ НА РОБОТУ ПІДЗЕМНИХ ГАЗОСХОВИЩ

(Представлено членами редакційної колегії д-ом геол. наук, проф. О. М. Іванік та д-ом геол. наук, проф. О. М. Карпенком)

На основі проведеного аналізу досліджень щодо створення та експлуатації підземних сховищ газу (ПСГ) в умовах неоднорідних колекторів встановлено відсутність комплексної методики врахування фактора неоднорідності на стадії їхнього проектування. У результаті має місце значне завищення проектних показників проти фактичних і зниження ефективності роботи ПСГ.

Наведено методичні розробки з урахування неоднорідності пласта на стадії проектування ПСГ, які містять конкретні пропозиції з уточнення початкових запасів і газонасиченого об'єму пласта шляхом переінтерпретації залежності приведеного пластового тиску від сумарної кількості газу в підземних газосховищах.

Метою даної роботи є оцінка впливу геолого-промислових чинників на технологічні показники експлуатації ПСГ, створених у виснажених газових покладах, шляхом порівняльної характеристики роботи Опарського та Богородчанського ПСГ. Для досягнення поставленої мети досліджено геолого-промислові особливості Опарського та Богородчанського ПСГ; розроблено методику вивчення геологічної неоднорідності; досліджено вплив геологічних чинників на технологічні показники експлуатації ПСГ.

Результати дослідження мають практичне значення. Використання методики вивчення характеру неоднорідності пластів-колекторів є необхідним при проектуванні нових газосховищ і при корегуванні технологічних проектів по ПСГ, які створені в неоднорідних колекторах і перебувають в експлуатації.

Ключові слова: підземне сховище газу, неоднорідність пластів колекторів, проникність, геолого-промислові особливості, проектування, експлуатація ПСГ, пластовий тиск.

Постановка проблеми. Одним із найголовніших стратегічних завдань держави є підтримання на високому технічному рівні й подальше розширення газотранспортної системи, а також підвищення ефективності роботи підземних газосховищ. Вирішення цих питань неможливе без детального вивчення геологічної будови об'єктів, в яких проектується створення підземних газосховищ або аналізується робота вже існуючих ПСГ.

Визначальними геологічними параметрами для всіх ПСГ у пористому середовищі є проникність, пористість, товщина і глибина залягання пласта-колектора, об'єм порового простору, який може бути заповнений газом, наявність герметичної покривки над пластом-колектором, активність водонапірної системи. При цьому особливу увагу слід звертати на ступінь витриманості колекторських властивостей продуктивних горизонтів за площею і розрізом.

При створенні ПСГ в однорідних високопроникних колекторах (Дашавське, Червонопопівське) фактичні технологічні показники експлуатації близькі до проектних. Водночас при створенні ПСГ в умовах неоднорідних, різнопроникних колекторів фактичні технологічні показники експлуатації значною мірою відрізняються від проектних. Це виражено, у першу чергу, у зменшенні фактичного активного об'єму газу на 20–40 % при значному збільшенні буферного об'єму газу, що має місце на Угерському, Опарському, Кегицівському ПСГ. Слід чекати таких відхилень на Пролетарському газосховищі (горизонти Б-5, Б-9) та ПСГ, створених в аналогічних геолого-промислових умовах. Ці відхилення насамперед пов'язані з тим, що проекти створення ПСГ складалися в основному за матеріалами розробки продуктивного горизонту без урахування неоднорідності пластів-колекторів та їхніх фільтраційних властивостей.

Неврахування неоднорідності пластів-колекторів і пов'язане з ним погіршення технологічних показників роботи ПСГ спричинює невідправдані перевитрати (завищення кількості свердловин, потужності компресорної станції тощо) і різко знижує економічну ефективність його роботи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теоретичні основи проектування та експлуатації газосховищ у виснажених газових родовищах були закладені у працях С. Н. Бузінова (Бузінова, Толкушин, 1979), А. І. Ширковського (Ширковский, Задора, 1974).

Значний внесок у теорію та практику створення підземних газосховищ у виснажених пластах, у тому числі й в умовах Прикарпаття, зробили А. В. Баранова, В. П. Войцицький (Войцицкий, 1993; Войцицкий 1986), Р. Ф. Гімер (Гімер та ін., 2001), О. Н. Грачева, О. М. Іщенко, Й. С. Павлюх, О. В. Солецький, Г. І. Солдаткін (Солдаткин, 1975).

Питанню вивчення неоднорідності колекторів у підземних сховищах газу і впливу цього фактора на ефективність їхньої експлуатації присвячено роботи Н. В. Дубей (Дубей, 2017), Н. Р. Ковальчука (Ковальчук, 1975), Т. Н. Митрофанової (Митрофанова, 1976), Н. М. Свихнушина (Свихнушин, Азаматов, 1971).

Деякі автори відмічають наявність нерівномірного дренавання пластів-колекторів і його вплив на технологічні показники роботи ПСГ (Бондарев, 1982; Борисов и др. 1970; Григорьев, 1983).

Виділення нерозв'язаних раніше частин загальної проблеми. У результаті проведеного аналізу досліджень щодо створення та експлуатації підземних газосховищ в умовах неоднорідних колекторів встановлено відсутність комплексної методики врахування фактора неоднорідності на стадії їхнього проектування. У результаті має місце значне завищення проектних показників проти фактичних і зниження ефективності роботи ПСГ.

У даній роботі ми пропонуємо методичні розробки з урахування неоднорідності пласта на стадії проектування ПСГ, які містять конкретні пропозиції з уточнення початкових запасів і газонасиченого об'єму пласта шляхом переінтерпретації залежності приведеного пластового тиску від сумарної кількості газу в підземних газосховищах.

Метою даної роботи є оцінка впливу геолого-промислових чинників на технологічні показники експлуатації ПСГ, створених у виснажених газових покладах, шляхом порівняльної характеристики роботи Опарського та Богородчанського ПСГ.

Для досягнення поставленої мети були виконані такі **завдання**:

- досліджено геолого-промислові особливості Опарського та Богородчанського ПСГ;
- розроблено методику вивчення геологічної неоднорідності;
- досліджено вплив геологічних чинників на технологічні показники експлуатації ПСГ.

Результати дослідження мають практичне значення. Використання методики вивчення характеру неоднорідності пластів-колекторів є необхідним при проектуванні нових газосховищ і при корегуванні технологічних проектів по ПСГ, які створені в неоднорідних колекторах і перебувають в експлуатації.

Виклад основного матеріалу дослідження. До складу Західного газорегулювального комплексу входять 5 ПСГ: Більче-Волицько-Угерське, яке є найбільшим у Європі з активним об'ємом 17.5 млрд кубометрів, Угерське (XIV–XV горизонти), Дашавське, Опарське і Богородчанське. Цей комплекс є гарантом надійності транзитних передач російського чи центральноазійського газу до європейських країн і газопостачання західних областей України і прилеглих до них Молдови і Білорусі.

У роботі виконано **аналіз геологічної будови** Опарського та Богородчанського підземних газосховищ, пов'язаних із Передкарпатським краєвим прогином (Войцицкий, 1986; 1993; Леськів, Щерба, 1979). Опарське ПСГ розташовано в межах Зовнішньої зони прогину, а Богородчанська структура – у смузі сполучення Зовнішньої й Внутрішньої зон.

Опарське ПСГ розташовано на території Дрогобицького району Львівської області. Підземне сховище газу створено в горизонтах НД-5, НД-7, НД-8 і введено в експлуатацію 29 липня 1979 року.

Нижньосарматські відклади, до яких приурочені поклади газу, складені в положу антиклінальну складку, витягнуту в північно-західному загальнокарпатському напрямку.

Колекторами газу продуктивних горизонтів НД-5, НД-7 і НД-8 є пласти і пропластки пісковиків і алевролітів, які залягають серед однорідних глинистих пластів, що служать покривками для ПСГ. У роботі детальніше досліджувався лише один із трьох продуктивних горизонтів Опарського ПСГ – горизонт НД-7, який є найбільш невитриманим за площею і розрізом.

Горизонт НД-7 залягає на глибинах 700–810 м і відділяється від горизонту НД-5 глинистою пачкою товщиною 20–40 м. Загальна товщина його коливається від 15 до 45 м, ефективна – від 10 до 35 м. Коефіцієнт піщанистості – 0,45–0,8. Відкрита пористість – 10–29 %, проникність – $1 \cdot 10^{-15}$ – $905 \cdot 10^{-15}$ м². У нижній частині горизонту залягає водоносний пласт, який має обмежене розповсюдження по площі покладу. У південно-східній частині структури відмічається його літологічне виклинювання.

Горизонт значною мірою розчленований глинистими непроникиними пропластками, які мають порівняно велику товщину 2–5 м і значну поширеність по площі. Доля низькопрониких колекторів у розрізі свердловини досить велика і може досягати 50–70 %.

Богородчанське підземне сховище газу розташовано в Богородчанському районі Івано-Франківської області.

ПСГ створено в 1979 році в тортонському горизонті однойменного газового родовища, який безпосередньо перекритий відкладами Стебницького насуву.

У тектонічному плані Богородчанське газосховище пов'язано зі складною за будовою брахіантіклінальною складкою північно-західного простягання.

Поздовжніми та поперечними порушеннями Богородчанське підняття розбите на три блоки: північно-західний, північно-східний і південно-східний. Останній є найбільший за розмірами. Промислова газоносність пов'язана із трьома піщано-алевролітовими горизонтами (верхній, середній, нижній). Основні запаси газу були приурочені до середнього горизонту в межах основного південно-східного блока.

Пласти середнього продуктивного горизонту вивчені частим чергуванням пісковиків, алевролітів і аргілітів. Загальна товщина горизонту – 15–80 м, ефективна

товщина колекторів (пісковиків і алевролітів) у межах 40–60 м у склепінній частині й 12–15 м у західній частині структури. Відкрита пористість – 10–28 %, коефіцієнт піщанистості – 0,5–0,8. Проникність – $1 \cdot 10^{-15}$ – $360 \cdot 10^{-15}$ м². При цьому переважають колектори з проникністю $2 \cdot 10^{-15}$ – $10 \cdot 10^{-15}$ м². Щодо площі проникність окремих лінз змінюється значно меншою мірою, ніж це має місце по Опарському ПСГ.

Продуктивні горизонти родовища перекриті потужною товщею (до 1000 м) моласових утворень, які належать до насунутого комплексу Внутрішньої зони Передкарпатського прогину.

Відклади насуву складені в основному аргілітами, щільними глинами з рідкими прошарками алевролітів. Пісковики майже відсутні.

Газосховище створено в середньому продуктивному горизонті, з яким пов'язані основні запаси газу по родовищу. Газовий поклад – пластовий склепінний літологічно і тектонічно екранований. Початковий пластовий тиск – 10,15 МПа. Початкова абсолютна відмітка ГВК – мінус 823 м. Початкові запаси газу – 3300 млн м³.

Для вирішення поставлених завдань було розроблено **методику вивчення неоднорідності колекторів** та її застосування до об'єктів досліджень.

Усі прийоми і методи вивчення базуються в основному на статистичній обробці та узагальненні геолого-геофізичного фактичного матеріалу, отриманого в процесі буріння свердловин, включаючи обробку даних аналізу кернів і результатів інтерпретації промислово-геофізичних досліджень свердловин (Дементьев, 1966).

Результати досліджень можна подати у вигляді графіків, полігонів розподілу, геологічних профілів, карт піщанистості, пористості, проникності та кількісної оцінки. Вивчалась неоднорідність за розрізом і площею.

Для детального вивчення розрізу покладів, їхнього розчленування з урахуванням літолого-петрографічної й промислово-геофізичної характеристик порід були побудовані геолого-геофізичні (Опарське ПСГ) (рис. 1) і геологічні (Богородчанське ПСГ) профілі.

Опарське ПСГ характеризується значним розчленуванням по розрізу. Нерідко пісковики виклинюються за простяганням, або виклинюються, розділяючи їх, прошарки глинистих порід. Товщина пісковиків і алевролітів дуже мінлива.

На геологічному профілі Богородчанського ПСГ видно, що середній горизонт, в якому створено ПСГ, складається з окремих лінз, які мають пластовий характер і вивчені частим чергуванням пісковиків, алевролітів і аргілітів.

Продуктивність пласта в першу чергу визначається його ефективною товщиною, піщанистістю, пористістю та проникністю. Ці показники в умовах Опарського ПСГ значно змінюються за розрізом і площею.

Так, наприклад, для Опарського ПСГ по свердловині 95 у розрізі продуктивного горизонту НД-7 встановлені такі межі основних показників: ефективної товщини – 2,6–8 м; пористості – 16–27 %; проникності – $3 \cdot 10^{-15}$ – $700 \cdot 10^{-15}$ м². Таке коливання перелічених параметрів характерне і для розрізів решти свердловин. Порівнюючи характеристики продуктивних пластів за розрізами свердловин Богородчанського і Опарського ПСГ на основі аналізу геолого-геофізичних профілів і фактичного матеріалу, можна зробити висновок, що суттєва неоднорідність пластів-колекторів за розрізом є характерною ознакою лише для Опарського ПСГ.

Оцінка мінливості за площею ефективної товщини, піщанистості, пористості й проникності пластів-колекторів продуктивного горизонту НД-7 Опарського ПСГ проводилася шляхом аналізу графіка зміни ефективної товщини пісковиків і алевролітів продуктивного горизонту і карт піщанистості, пористості, проникності (рис. 2).

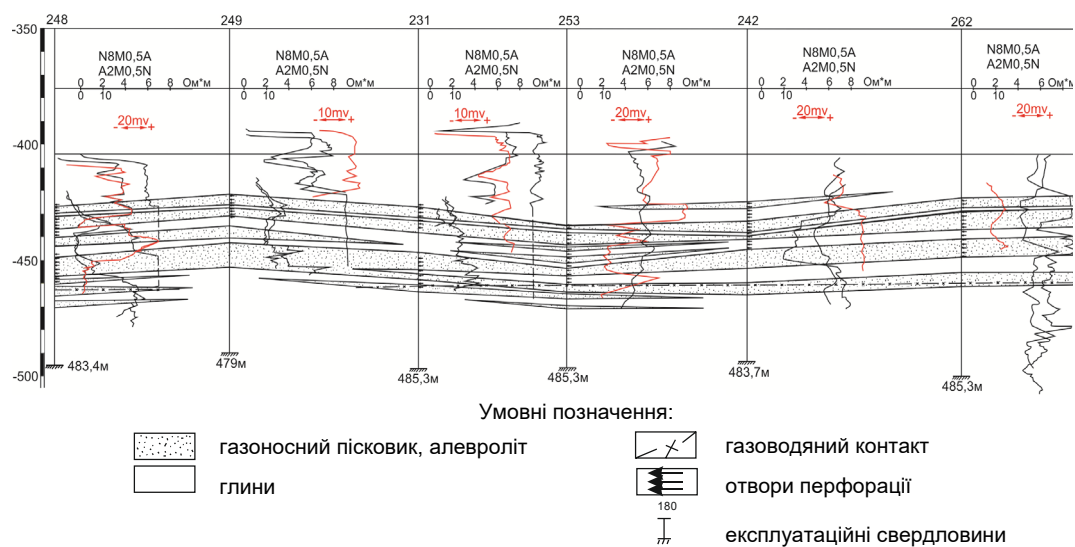


Рис. 1. Геолого-геофізичний профіль Опарського ПСГ

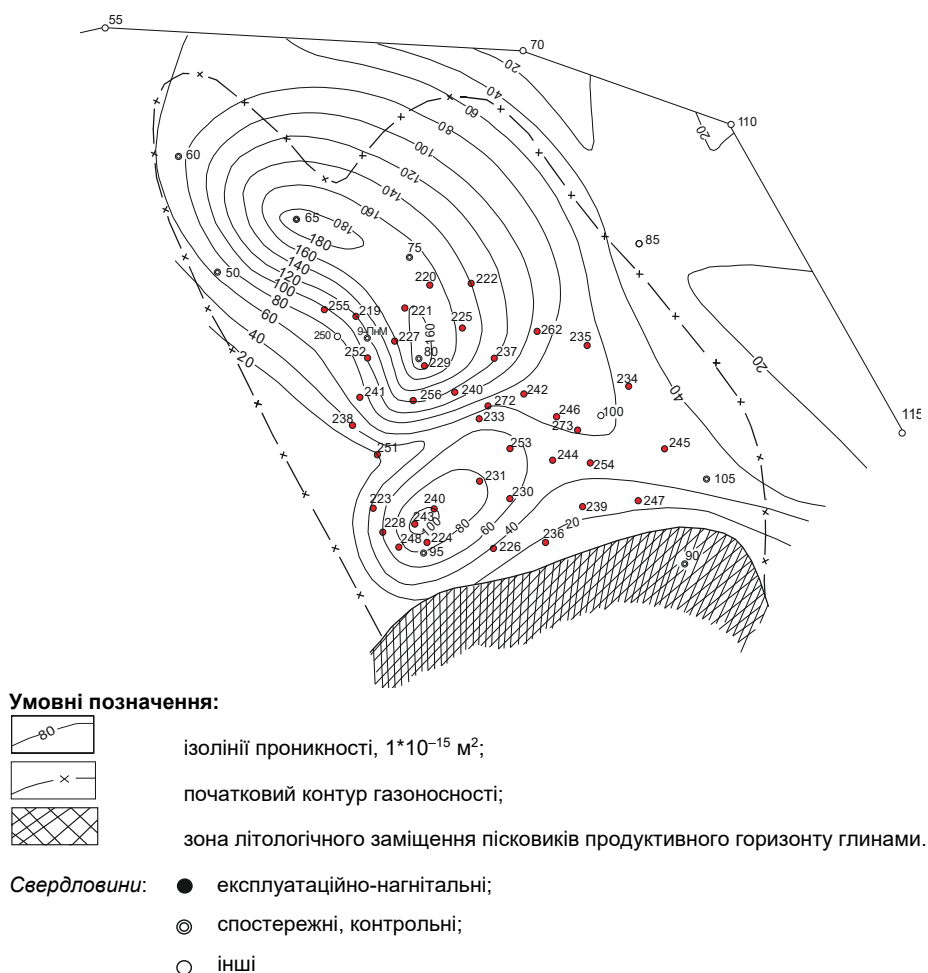


Рис. 2. Карта проникності продуктивного горизонту НД-7 Опарського підземного сховища газу

Із складених карт видно, що найкращі колекторські властивості мають породи-колектори, розміщені в північно-західній частині структури. Значення піщаності, пористості та проникності становлять тут відповідно 0,7–0,75; 25,2–26 %; $200 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. У напрямку до півночі та сходу структури вони зменшуються відповідно до 0,5; 21 %; $40 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$. У південній частині Опарської площі, ближче до межі зони глинизації, перелічені параметри є мінімальні: піщаність – 0,4; пористість – 19 %; проникність – $20 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Деяке збільшення всіх показників відмічається на карті в південно-західній зоні. Значення піщаності зростає тут до 0,68; пористості – до 24 %; проникності – до $100 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Оцінка впливу неоднорідності пластів колекторів на технологічні показники експлуатації підземних сховищ газу. У практиці проектування, створення й експлуатації підземних сховищ газу у виснажених газових пластах, як правило, використовуються ті ж основні принципи, що й у разі проектування розробки самих газових родовищ. В основу технологічних схем (проектів)

зкладаються результати аналізів розробки родовищ (газонасичений і поточний поровий об'єм, робочі дебіти свердловин, режим роботи покладів, ступінь взаємодії різних ділянок покладів та ін.) без урахування специфічних умов роботи газосховища і в першу чергу високих темпів відбору і закачки газу. Якщо в процесі розробки газових покладів темп зниження пластового тиску часто становить 0,2–0,5 МПа на рік, то в процесі експлуатації ПСГ характер зміни тиску має приблизно синусоїдний характер, а темп його зниження або росту досягає 3–7 МПа за 4–5 місяців.

У багатьох випадках прийняті за матеріалами розробки вихідні дані загалом підтверджуються в результаті пробної й промислової експлуатації ПСГ. Це в основному стосується газосховищ, створених у виснажених газових покладах, які характеризуються високою проникністю й однорідністю продуктивних пластів при газовому або близькому до газового режиму їхньої роботи.

Але на деяких ПСГ фактичні показники експлуатації значною мірою відрізняються від прийнятих за матеріалами розробки. Це у першу чергу стосується ПСГ, створених у пластах порівняно невисокої проникності (до $100 \cdot 10^{-15}$ – $300 \cdot 10^{-15}$ м²), які відрізняються при цьому

значною неоднорідністю. Ця відмінність перш за все виражається в суттєвому зниженні активного об'єму газу, збільшенні об'єму буферного газу, зниженні продуктивності ПСГ, різкій диференціації пластових тисків по площі структури.

Зазначене вище особливо характерно для створених у Західному комплексі підземного зберігання газу Опарського та Угерського ПСГ. У даній роботі дається детальний аналіз роботи саме Опарського підземного газосховища, а також порівняльна характеристика з Богородчанським ПСГ, на якому менш виражена неоднорідність колекторів.

Умови створення ПСГ і з'ясування основних причин відхилення фактичних технологічних параметрів роботи від проектних подано нижче.

Оцінка впливу неоднорідності колекторів на технологічні показники експлуатації підземних сховищ газу була проведена на прикладі експлуатації Опарського ПСГ.

Нерівномірність дренавання можна продемонструвати за допомогою графіка залежності наведеного пластового тиску від кількості газу в ПСГ. У даній роботі наведено такий графік лише для горизонту НД-7, де цей фактор має найбільш виражений характер (рис. 3).

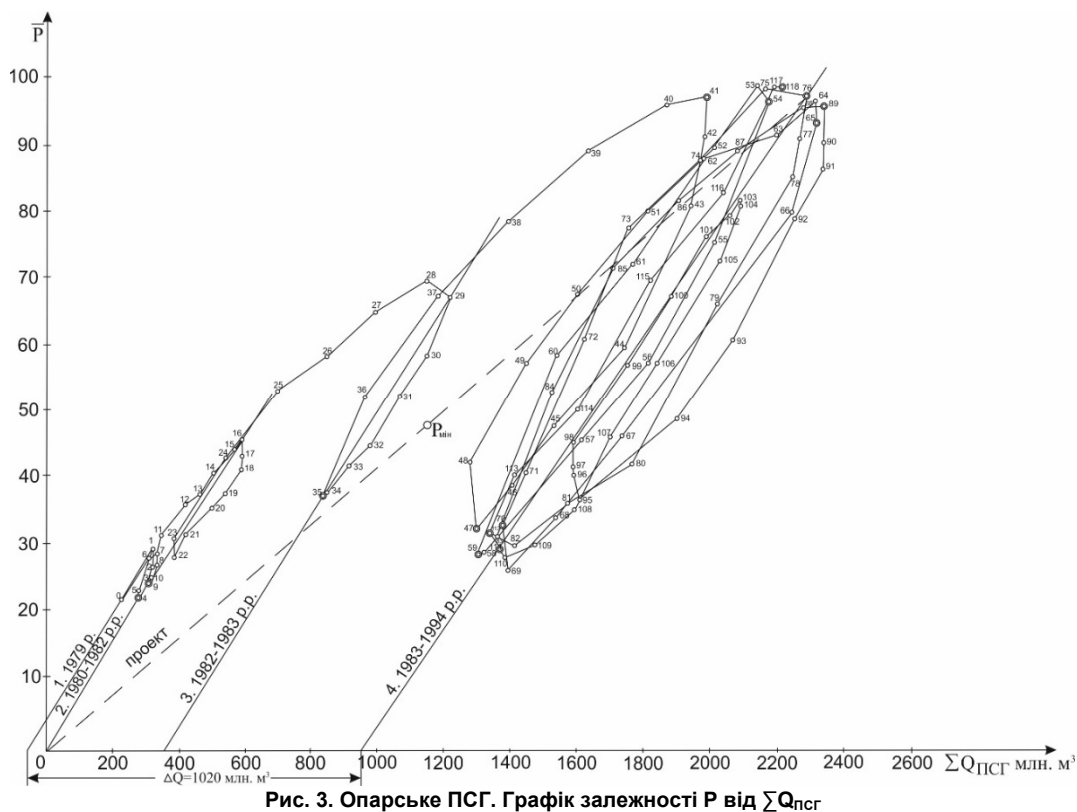


Рис. 3. Опарське ПСГ. Графік залежності P від $\Sigma Q_{\text{ПСТ}}$

За даним графіком можна оцінити активний газонасичений об'єм пласта ω_a , який працює в процесі циклічної закачки:

$$\omega_a = \frac{\Delta Q}{\Delta P}, \quad (1)$$

де ΔQ – об'єм закачуваного або відібраного газу за сезон, млн м³; ΔP – зміна приведенного пластового тиску за сезон.

Як видно із графіка, дана залежність не відповідає залежності для газового режиму, а має вигляд кривих вигнутих уверх при закачуванні газу і вигнутих униз при відборі. При збільшенні об'ємів закачування газу із формуванням газосховища ця залежність зміщується

праворуч по осі абсцис, що пов'язано із заповненням "застійних" слабкодренованих зон у низькопроникних пластах і пропластках.

На графіку залежності $\bar{P} = f(\Sigma Q_{\text{ПСТ}})$ (рис. 3) можна виділити чотири зони, які відповідають окремим періодам роботи ПСГ (1979–1980, 1980–1981, 1982–1983, 1983–1994 рр.). Відрізняються вони між собою об'ємами закачування і відбору газу.

Кожному періоду умовно відповідає певна пряма лінія, яка з часом зі збільшенням об'єму газу в ПСГ зміщується праворуч по осі абсцис. Паралельність цих прямих говорить про те, що активний газонасичений об'єм пласта практично встановився вже на першому періоді роботи газосховища, хоч режим роботи ПСГ стабілізувався

десь після 1983 р. Визначений за формулою, цей об'єм відповідно становить 12,6; 11,5; 12,6; 13,6 млн м³.

Загалом активний газонасичений об'єм пласта можна взяти за останнім періодом роботи ПСГ – 13,6 млн м³.

Об'єм недренованого в процесі роботи ПСГ пласта можна оцінити за величиною $\sum Q_{\text{ПСГ}}$, яка відсікається залежністю на осі абсцис (рис. 3). Проте у зв'язку з тим, що відсутній другий установлений режим роботи ПСГ, його можна оцінити (з певним зниженням), урахувуючи відрізок ΔQ , який відсікається лініями 1–4.

Об'єм "застійних" зон $\omega_{z.z}$ можна оцінити за формулою

$$\omega_{z.z} = \frac{2 \cdot \Delta Q_{\text{ПСГ}}}{\left((P_{\text{cp.zak}} + P_{\text{cp.vib}})_i - (P_{\text{cp.zak}} + P_{\text{cp.vib}})_{i-1} \right)}, \quad (2)$$

де $\Delta Q_{\text{ПСГ}}$ – збільшення об'єму газу в "застійних" зонах при зміні роботи ПСГ; $P_{\text{cp.i}}$ і $P_{\text{cp.i-1}}$ – середні приведені пластові тиски для i-го та i-1-го режимів роботи ПСГ; $P_{\text{cp.zak}}$ і $P_{\text{cp.vib}}$ – середні приведені пластові тиски в кінці сезонів закачки і відбору газу, відповідно для i-го та i-1-го режимів роботи ПСГ;

Об'єм "застійних" зон, оцінений за формулою, становить 16,2 млн м³. Тоді початковий газонасичений об'єм Ω_0 становитиме

$$\Omega_0 = 13,6 + 16,2 = 29,8 \text{ млн м}^3.$$

Якщо взяти обводненість за 5 %, то початковий газонасичений об'єм до розробки родовища мав становити

$$\Omega_0 = \frac{29,8}{0,95} = 31,4 \text{ млн м}^3.$$

Одержані дані певною мірою дозволяють скорегувати величину початкових записів газу Q_0 , які з урахуванням обводнення становитимуть

$$Q_0 = (\omega_a + \omega_{z.z}) P_0, \quad (3)$$

$$Q_0 = 31,4 \cdot 75,44 = 2368,8 \text{ млн м}^3.$$

Для поліпшення технологічних показників експлуатації ПСГ Корективами до технологічної схеми створення

ПСГ (Войціцький, 1993) передбачалося збільшити кількість експлуатаційних свердловин із 79 до 134, у тому числі для горизонту НД-7 – із 38 до 69. При цьому активний об'єм газу ПСГ повинен буде збільшитись до 2400 млн м³/добу, що значно менше, ніж передбачалося технологічною схемою. Проте реалізація Коректив до сьогоднішнього дня не здійснена.

Для Богородчанського підземного газового сховища

графічна залежність $\bar{P} = f(\sum Q_{\text{ПСГ}})$ (рис. 4) має приблизно такий самий вигляд, як і на Опарському ПСГ, але відхилення розрахункових точок вгору і вниз від результуючої лінії значно менші, що пов'язано з більш однорідними проникними колекторами.

На графіку залежності $\bar{P} = f(\sum Q_{\text{ПСГ}})$ (рис. 4)

можна чітко виділити три зони, які відповідають етапам формування ПСГ.

Як видно з наведених даних, активний газонасичений об'єм фактично сформувався вже на стадії дослідно-промислової експлуатації.

Об'єм "застійної" зони для встановленого режиму роботи ПСГ (рис. 4, пряма лінія 3) становитиме

$$\omega_{z.z} = \frac{270 \cdot 2}{112,9 + 42,4} = 3,48 \text{ млн м}^3.$$

Загальний газонасичений об'єм пласта становитиме $27,60 + 3,48 = 31,08$ млн м³, що практично відповідає газонасиченому об'єму, визначеному за матеріалами розробки (30,66 млн м³).

Як установлено, фактичні технологічні показники експлуатації Опарського ПСГ не відповідають проектним. Зокрема, на 25–35 % виявився нижчим активний об'єм газу, збільшився об'єм буферного газу та знизилася продуктивність ПСГ.

Це пов'язано з тим, що в умовах ПСГ низькопроникні колектори практично не беруть участі у циклічній роботі ПСГ, утворюючи малоактивні "застійні" зони. Графіки залежності наведеного пластового тиску від кількості газу в ПСГ мають еліпсоподібний характер, що обумовлено складними умовами дренавання газового покладу.

На Богородчанському ПСГ, де менш виражена неоднорідність колекторів, фактичні показники експлуатації практично відповідають проекту. Проте і тут виявлено малоактивні "застійні" зони, об'єм яких невеликий.

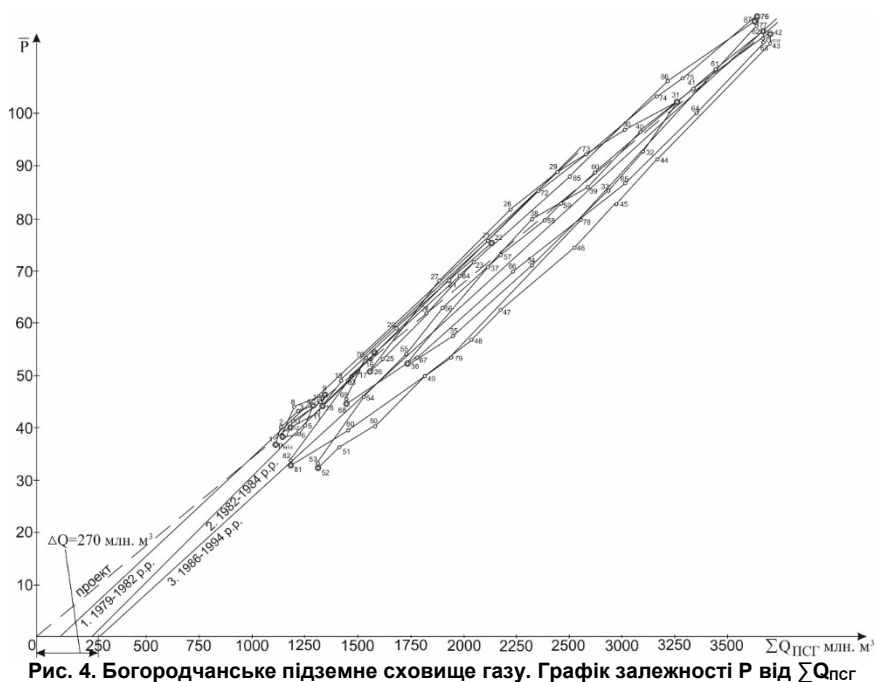


Рис. 4. Богородчанське підземне сховище газу. Графік залежності $\bar{P}$ від $\sum Q_{\text{ПСГ}}$

При експлуатації газосховищ немає можливості виміряти диференційовано пластові тиски по окремих пластах і пропластах. Практично заміряють статичний і пластовий тиски при зупинці свердловини. Проте цей тиск не характеризує середній пластовий тиск по даному елементу газосховища. У зв'язку з різними тисками в окремих пластах мають місце міжпластові перетоки, і цей тиск фактично є динамічним.

У зв'язку з неможливістю виміряти істинний пластовий тиск у промисловій практиці оперують динамічним пластовим тиском. Саме цей тиск є визначальним при розрахунках режиму роботи ПСГ та встановленні об'ємів активного і буферного газу.

На практиці активний газонасичений об'єм пласта визначається за формулою:

$$\omega_{akt} = \frac{Q_{akt}}{P_{pl,max} - P_{pl,min}}, \quad (4)$$

де Q_{akt} – активний об'єм газу в ПСГ при збільшенні середнього пластового тиску від мінімальної до максимальної величини; $P_{pl,max}$ і $P_{pl,min}$ – приведені максимальний і мінімальний середні пластові тиски.

Для однорідного пласта середній пластовий тиск відповідатиме динамічному. Для неоднорідного пласта замість середнього необхідно у формулу (4) підставити значення динамічного пластового тиску, тобто тиску, який контролює роботу ПСГ.

Із зростанням об'єму закачки активний газонасичений об'єм пласта дещо збільшується, що мало місце по Опарському ПСГ.

Умовний газонасичений об'єм пласта, який відповідає ступеню недозаповнення низькопроникних пластів при циклічній роботі газосховища, утворює "застійні" зони. Середній пластовий тиск $P_{cp,z,z}$ у цих зонах можна розрахувати за формулою

$$P_{cp,z,z} = \frac{\Delta Q \cdot P_{at} \cdot Z_{pl} \cdot T_{pl}}{\omega_{z,z} \cdot T_{st}}, \quad (5)$$

де ΔQ – об'єм газу, який не бере участі в циклічній роботі ПСГ; Z_{pl} – коефіцієнт стисливості газу; P_{at} – атмосферний тиск, МПа; $\omega_{z,z}$ – пасивний газонасичений об'єм пласта, який характеризує "застійні" зони і не бере участі у роботі ПСГ; T_{st} і T_{pl} – відповідно стандартна і пластова температура, К.

У процесі експлуатації ПСГ величини максимальних і мінімальних пластових тисків, як правило, регламентовані й залежать в основному від промислово-геологічних особливостей газових покладів і режиму роботи компресорної станції.

Для умов неоднорідних пластів матиме місце значне зниження активного об'єму газу і збільшення буферного його об'єму.

Активний об'єм пласта дорівнюватиме

$$Q_{akt} = \omega_{akt} (P_{max} - P_{min}). \quad (6)$$

Буферний об'єм газу буде розраховуватися за формулою

$$Q_{buf} = \omega_{akt} \cdot P_{min} + \Delta Q, \quad (7)$$

де ΔQ – об'єм газу в "застійних" зонах.

Як уже зазначалося вище, фактичні технологічні показники експлуатації Опарського ПСГ не відповідають проектним. На 25–35 % виявився нижчим активний об'єм газу, збільшився об'єм буферного газу та понизилась продуктивність ПСГ.

Причина в основному одна – неврахування неоднорідності пластів колекторів і приймання до основи технологічних проектів повного газонасиченого порового простору газового покладу, визначеного за матеріалами розробки родовища. Це, у свою чергу, приводить до значного погіршення техніко-економічних показників експлуатації ПСГ: зменшується активний об'єм газу при збільшенні буферного об'єму, зменшується потужність ПСГ, завищується кількість свердловин і потужність компресорної станції.

Собівартість зберігання газу може збільшитись у 1,5–2 рази. Водночас є можливість урахувати зазначені фактори при проектуванні нових газосховищ.

Висновки. 1. На основі вивчення характеру неоднорідності пластів колекторів за розрізом і площею покладів, в яких створені підземні сховища газу Прикарпаття, установлено, що продуктивні пласти Опарського ПСГ значною мірою неоднорідні.

2. Аналіз експлуатації газових покладів, пов'язаних з неоднорідними колекторами, показав, що за циклічної експлуатації ПСГ за рахунок значно вищих темпів зміни тиску, порівняно з процесом розробки газового покладу і періодичності зміни напрямку руху газу в пласті, диференціація пластових тисків по окремих пластах носить більш виражений характер: у процесі циклу закачки-відбору газу зміна тиску від мінімальної до максимальної величини в низькопроникних пластах у 6–8 разів нижча, ніж у високопроникних, створюється ефект "застійних" зон, який спричинює зменшення активного об'єму газу на 20–40 % і більше.

3. Пластовий тиск, який замірюється у свердловинах з метою контролю за роботою ПСГ, не відповідає середньому пластовому тиску по продуктивному горизонту. Його величина залежить від ступеня дренажу окремих пластів і величини міжпластових перетоків і близька до пластового тиску найбільш проникних пластів.

4. При проектуванні ПСГ в умовах неоднорідних колекторів до основи технологічних проектів рекомендується закладати не повний газонасичений поровий об'єм, як це робиться на практиці, а тільки активний, визначений за запропонованою методикою, виключивши об'єм "застійних" зон, що дасть змогу досягти максимального наближення проектних показників до реальних.

Така система проектування скорочує термін вводу ПСГ в експлуатацію, дозволяє більш об'єктивно оцінити його потенційні можливості, виключити непродуктивні витрати та підвищити ефективність зберігання газу.

Список використаних джерел

- Бондарев, В. Л. (1982). Влияние особенностей геологического строения ПХГ на его эксплуатацию (на примере ПХГ Северо-Западного экономического района). *Сборник научных трудов ВНИИГаз*, 5, 27–34.
- Борисов, Ю. П., Воинов, В. В., Рябина, З. К. (1970). Влияние неоднородности пластов на разработку нефтяных месторождений. Москва: Недра.
- Бузинов, С. М., Толкушин, Г. Ф. (1979). Методы оптимизации технологических параметров подземных хранилищ газа. *Реферативный сборник. Транспорт и хранение газа ВНИИГазпром*, 8, 34–37.
- Войцкицкий, В. П. (Рук.). (1986). Анализ эксплуатации Угерского (XIV–XV), Дашавского и Богородчанского ПХГ и рекомендации по выводу их на проектный режим. *Отчет о НИР (заключит.)*. УкрНИИГаз. Харьков.
- Войцкицкий, В. П. (Кер.). (1993). Корективи до технологічного проекту експлуатації Опарського ПСГ. *Звіт з НДР*. УкрНДІГаз. Харків.
- Гімер, Р. Ф., Гімер, П. Р., Деркач, М. П. (2001). Підземне зберігання газу. Івано-Франківськ: Факел.
- Григорьев, В. С. (1983). Особенности разработки и подсчета запасов низкопроницаемых коллекторов. *Нефтяная и газовая промышленность*, 3, 33–35.
- Дементьев, Л. Ф. (1966). Статистические методы обработки и анализа промыслово-геологических данных. Москва: Недра.
- Дубей, Н. В. (2017). Статистичні методи обробки та аналізу в нафтогазопромисловій геології. *East European Scientific Journal*, 3(19), 20–24.
- Ковальчук, Н. Р. (1979). Особенности геологического строения Угерского подземного хранения газа по данным доразведки месторождений. *Нефтяная и газовая промышленность*, 4, 35–37.

Леськів, І. В., Шерба, В. М. (1979). Геолого-геофізичні дослідження при розшуках газу в Передкарпатському прогині. Київ: Наукова думка.

Митрофанова, Т. Н. (1976). К обработке исходных данных для проектирования газохранилищ в слоисто-неоднородных пластах. *Реферативный сборник Транспорт и хранение газа ВНИИ Газпром*, 4, 21-26.

Сви́хнушин, Н. М., Азаматов, В. И. (1971). Методы изучения неоднородности коллекторов при оценке кондиций и подсчете запасов. Москва: Недра.

Середюк, М. Д., Савків, Б. П. (2015). Підземне зберігання газу. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ.

Солдаткин, Г. И. (1975). Основные достижения и научно-исследовательские задачи в области эксплуатации подземных хранилищ газа. *Реферативный сборник: Транспорт и хранение газа ВНИИ Газпром*, 1, 10-15.

Ширковский, А. И., Задора, Г. И. (1974). Добыча и подземное хранение газа. Москва: Недра.

References

Bondarev, V. L. (1982). Vliyanie osobennostey geologicheskogo stroeniya PHG na ego jekspluataciju (na primere PHG Severo-Zapadnogo jekonomicheskogo rajona). *Sbornik nauchnyh trudov VNIIGaz*, 5, 27-34. [in Russian]

Borisov, U. P., Voinov, V. V., Rjabinina, Z. K. (1970). Vliyanie neodnorodnosti plastov na razrabotku nefjanij mestorozhdenij, risov. Moskva: Nedra. [in Russian]

Buzynov, S. M., Tolkushyn, H. F. (1979). Metody optymyzatsyy tekhnologicheskikh parametrov podzemnykh khranilyshch haza. *Referativnyi sbornik Transport i khraneniye haza VNIIE Hazprom*, 8, 34-37. [in Russian]

Dement'ev, L. F. (1966). Statisticheskie metody obrabotki i analiza promislovo-geologicheskikh dannyh. Moskva: Nedra. [in Russian]

Dubei, N. V. (2017). Statystychni metody obrobky ta analizu v naftohazopromyslovii heolohii. *East European Scientific Journal*, 3(19), 20-24. [in Ukrainian]

Grigor'ev, V. S. (1983). Osobennosti razrabotki i podschjota zapasov nizkopronicaemykh kolektorov. *Nefjanaja i gazovaja promyshlennost'*, 3, 33-35. [in Russian]

Himer, R. F., Himer, P. R., Derkach, M. P. (2001). Pidzemne zberihannia hazu. Ivano-Frankivsk: Fakel. [in Ukrainian]

Koval'chuk, N. R. (1979). Osobennosti geologicheskogo stroeniya Ugerskogo podzemnogo hranenija gaza po dannym dorazvedki mestorozhdenij. *Nefjanaja i gazovaja promyshlennost'*, 4, 35-37. [in Russian]

Leskiv, I. V., Shcherba, V. M. (1979). Heoloho-heofizychni doslidzhennia pry rozshukakh hazu v Peredkarpatskomu prohyni. Kyiv: Naukova dumka. [in Ukrainian]

Mitrofanova, T. N. (1976). K obrabotke ishodnyh dannyh dlja proektirovaniya gazohraniliw v sloisto-neodnorodnyh plastah. *Referativnyj sbornik Transport i hranenie gaza. VNIIE Hazprom*, 4, 21-26. [in Russian]

Serediuk, M. D., Savkiv, B. P. (2015). Pidzemne zberihannia hazu. Ivano-Frankivsk: IFNTUNH. [in Ukrainian]

Shyrkovskiy, A. Y., Zadora, H. Y. (1974). Dobycha y podzemnoe khraneniye haza. Moskva: Nedra. [in Russian]

Soldatkin, G. I. (1975). Osnovnye dostizheniya i nauchno-issledovatel'skie zadachi v oblasti jekspluatatsii podzemnykh hraniliw gaza. *Referativnyj sbornik Transport i hranenie gaza. VNIIE Hazprom*, 1, 10-15. [in Russian]

Svihnushin, N. M., Azamatov, V. I. (1971). Metody izuchenija neodnorodnosti kolektorov pri ocenke kondicij i podschete zapasov. Moskva: Nedra. [in Russian]

Voitsitskiy, V. P. (Head). (1993). Korektyvy do tekhnolohichnoho proektu ekspluatatsii Oparskoho PSH. *Zvit z NDR. UkrNDIHaz*. Kharkiv. [in Ukrainian]

Voitsitskiy, V. P. (Head). (1986). Analiz ekspluatatsiy Uherskoho (XIV-XV), Dashavskoho y Bohorodchanskoho PKhH y rekomendatsyy po vyvodu ykh na proektniy rezhym. *Otchet o NYR (zakliuchyt.)*. UkrNYH Haz. Kharkov. [in Russian]

Надійшла до редколегії 14.12.18

N. Dubei, Cand. Sci. (Geol.-Min.), Assoc. Prof.

E-mail: nata0509@i.ua

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

Institute of Natural Sciences and Tourism, 15, Carpatska Str., Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine

THE INFLUENCE OF GEOLOGICAL HETEROGENEITY OF LAYERS ON THE WORK OF UNDERGROUND GAS STORAGE FACILITIES

As a result of the analysis of studies in the field of the creation and operation of underground gas storage facilities (PSG) in the conditions of heterogeneous reservoirs, the lack of a comprehensive method for incorporating the heterogeneity factor at the stage of their design is established. As a result, there is a significant overestimation of project indicators comparing to actual and a decrease in the efficiency of the operation of the subsystem.

In this article, the author presents methodological developments for the account of the heterogeneity of the reservoir at the design stage of the UGS, which contains specific proposals for the refinement of initial stocks and gas-saturated reservoir volume by reinterpreting the dependence of reduced reservoir pressure on the total amount of gas in underground gas storage.

The purpose of this work is to assess the impact of geological and industrial factors on the technological performance of the PSG, created in exhausted gas deposits, by comparing the characteristics of the work of Oparsky and Bogorodchansky UGS. To achieve this goal, the geological-industrial features of the Oparsky and Bogorodchansky UGS have been investigated; the methodology for studying geological heterogeneity has been developed; the influence of geological factors on the technological parameters of the operation of the UHF is investigated.

The results of the study are of practical importance. The use of the methodology for studying the nature of the heterogeneity of reservoir layers is necessary in the design of new gas storage facilities and in the adjustment of technological projects on gas-fired power stations that are in operation and created in non-uniform collectors.

Keywords: underground storage of gas, heterogeneity of reservoir layers, permeability, geological-industrial features, design, creation, operation of PSG, reservoir pressure.

Н. Дубей, канд. геол.-минералог. наук, доц.

E-mail: nata0509@i.ua

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

Інститут естественных наук и туризма, ул. Карпатская, 15, г. Ивано-Франковск, 76019, Украина

ВЛИЯНИЕ ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАСТОВ НА РАБОТУ ПОДЗЕМНЫХ ГАЗОХРАНИЛИЩ

В результате проведенного анализа исследований в области создания и эксплуатации подземных хранилищ газа (ПХГ) в условиях неоднородных коллекторов установлено отсутствие комплексной методики учета фактора неоднородности на стадии их проектирования. В результате имеет место значительное завышение проектных показателей по сравнению с фактическими и снижение эффективности работы ПХГ.

Автор приводит методические разработки по учету неоднородности пласта на стадии проектирования ПХГ, которые содержат конкретные предложения по уточнению начальных запасов и газонасыщенного объема пласта путем переинтерпретации зависимости приведенного пластового давления от суммарного количества газа в подземных хранилищах газа.

Целью данной работы является оценка влияния геолого-промысловых факторов на технологические показатели эксплуатации ПХГ, созданных в истощенных газовых залежах, путем сравнительной характеристики работы Опарского и Богородчанского ПХГ. Для достижения поставленной цели исследованы геолого-промышленные особенности Опарского и Богородчанского ПХГ; разработана методика изучения геологической неоднородности; исследовано влияние геологических факторов на технологические показатели эксплуатации ПХГ.

Результаты исследования имеют практическое значение. Использование методики изучения характера неоднородности пластов-коллекторов необходимо при проектировании новых газохранилищ и при корректировке технологических проектов по ПХГ, находящихся в эксплуатации и созданных в неоднородных коллекторах.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, неоднородность пластов коллекторов, проницаемость, геолого-промышленные особенности, проектирование, эксплуатация ПХГ, пластовое давление.