

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ОСУШЕННЯ ПОРИСТОГО СЕРЕДОВИЩА

О.М.Сусак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166

e-mail: tzn g@n un g. e d u. u a

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса осушки пористой среды от остаточной воды. По результатам экспериментов разработана математическая модель для расчета максимального изменения остаточной водонасыщенности от проницаемости и параметров работы пористой среды.

The results of experiments of dewatering of pore space are represented. The mathematical model of dewatering of pore space was elaborated for calculation of changing of pore volume of underground gas storage

Розвиток системи підземного зберігання газу в Україні ставить перед фахівцями цієї галузі низку завдань, розв'язок яких вимагає наукового обґрунтування. Значний практичний та теоретичний досвід з експлуатації підземних сховищ газу (ПСГ), що створені у виснажених газових родовищах, на жаль, не охоплює такі питання, як зміни в поровому просторі пластів-колекторів, що відбуваються протягом тривалої циклічної експлуатації сховищ газу.

Вивчення особливостей формування штучних покладів газу у виснажених газових родовищах дало змогу встановити, що протягом перших 6-8 років циклічної експлуатації відбувається значне збільшення газонасиченого порового простору сховищ, що працюють з газовим режимом роботи. Цей процес супроводжується зменшенням максимального пластового тиску газу. Наявність такого роду змін було зафіксовано в ряді ПСГ Західного регіону України. Вивчення газогідродинамічних показників роботи сховищ показало, що в цілому сховища залишалися герметичними. Основні положення гідрогеології нафтових та газових покладів свідчать про наявність значної кількості залишкової води у покладах колишніх газових родовищ навіть тоді, коли родовище не мало явно вираженого руху пластових вод. Факт наявності залишкової води у покладах сховищ залишився без уваги на етапі проектування ПСГ, а отже не було враховано впливу залишкової води та збільшення порового об'єму сховищ за рахунок осушення покладів від залишкової води під час циклічної експлуатації ПСГ.

Дослідженням вмісту залишкової або зв'язаної води в різних типах породи займалися такі науковці як Дж. Амикс [1], Кристеа Н. [2], Гімматудинов Ш.К. [3], Джонс П. Д. [4], які прийшли до фактично однакових висновків. Вміст залишкової води в пісковиках може коливатися від 20 до 60% залежно від типу породи. Однак, точне визначення залишкової водонасиченості в більшості випадків визначити неможливо. Дослідження кернів свердловин ПСГ на залишкову водонасиченість в Україні не проводилися. Лише в останні роки під час розробки на виснаження газових родовищ

України проводиться відбір кернів з метою дослідження на залишкову водонасиченість.

Існує декілька методів розрахунку залишкової водонасиченості:

– графічний метод розрахунку залежно від проникності породи, запропонований Дж. Амиксом, Джонсом П.Д.;

– аналітичний метод за залежностями, що базуються на аналізі численних кернів породи.

Відповідно до графічного методу визначення проводиться залежно від типу породи та проникності за номограмою. Така номограма побудована для пісковиків Джонсом П. у межах проникності від 2 мДс до 10 Дс. Номограма для визначення залишкової водонасиченості залежно від проникності для пісковиків зображена на рис. 1.

Аналітичні залежності в своїх роботах приводять Гімматудинов Ш.К., Коротаєв Ю.П., Ширковський А.І. [5] Ці залежності отримані ними на основі аналізу результатів випробувань кернів порід. Ширковський А.І. у своїй праці [6] наводить такі залежності:

$$S_n = 0,337 - 0,155 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (1)$$

$$S_{nc} = 0,182 - 0,1 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (2)$$

де: S_n , S_{nc} – відповідно залишкова водонасиченість для пісків та пісковиків, частки одиниць;

k_o – абсолютна проникність, Дс;

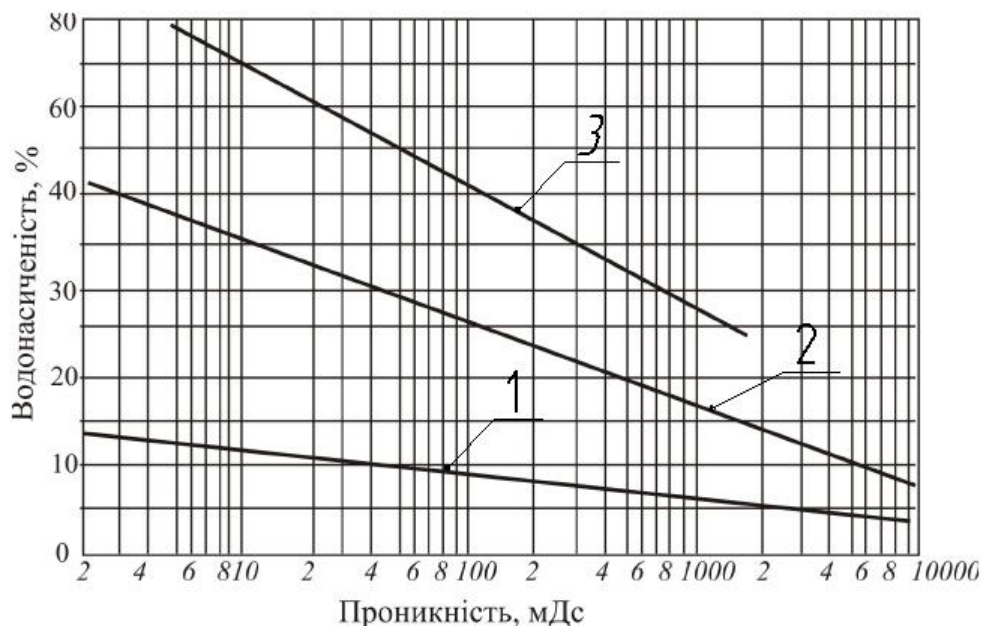
m_o – відкрита пористість, частки одиниць.

Гімматудинов Ш.К. приводить дещо інші залежності, хоча принципової відмінності між ними немає:

$$S_n = 0,437 - 0,155 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (3)$$

$$S_{nc} = 0,283 - 0,1 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (4)$$

$$S_{van} = 0,183 - 0,1 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (5)$$



1 – крупнозерністі пісковики, вапняки, доломіти; 2 – середньозерністі пісковики; 3 – дрібнозерністі пісковики

Рисунок 1 — Залежність залишкової водонасиченості від проникності для пісковиків різних типів

де: S_n, S_{nc}, S_{van} – відповідно залишкова водонасиченість для пісків, пісковиків та вапняків, у частках одиниць;

k_o – абсолютна проникність в мДс;

m_o – відкрита пористість у відсотках.

Процес осушення порового простору газових родовищ вивчався Ширковським А.І. Ним було встановлено, що поровий простір впродовж розробки на виснаження практично не зазнає впливу ефекту осушення. Вивчення процесу осушення пластів-колекторів ПСГ на сьогодні не проводилося.

Метою проведення серії експериментів було визначення величини осушення пористого середовища та впливу на цей процес тиску та температури природного газу. Серед характеристик пористого середовища вирішальний вплив має фазова проникність даного середовища, а тому досліди проводилися на чотирьох різних взірцях ядерного матеріалу реальних газових родовищ України. Схема експериментальної установки для дослідження процесу осушення пористого середовища представлена на рис. 2.

Проведення експериментів з осушення порового простору включали в себе наступні етапи:

- визначення параметрів взірця до початку експерименту, тобто в сухому стані;
- насичення взірця водою до стану 100% насичення;
- продування природним газом з різними темпами з метою витіснення вільної гравітаційної води з взірця з одночасним визначенням його фазової проникності;
- моделювання циклічної роботи сховища з визначенням маси взірця після кожного циклу.

На першому етапі визначалися геометричні параметри взірця (діаметр, довжина та маса). У зв'язку з тим, що взірець (керна) перед проведенням дослідів був ретельно екстрагований, можна вважати, що отримане значення його маси відповідає нульовому насиченню водою порового простору. Наступним кроком було визначення проникності взірця в ненасиченому стані.

Вихідне рівняння для розрахунку проникності пористого середовища за умови лінійної фільтрації газу має такий вигляд [2]:

$$k = \frac{2 \cdot Q \cdot \eta \cdot p_{амм} \cdot z_{cp} \cdot l}{S \cdot (p_{ex}^2 - p_{вых}^2)}, \quad (6)$$

де: Q – об'ємна витрата за атмосферних умов, м³/с;

S – площа фільтрації, м²;

k – проникність взірця, м²;

η – динамічна в'язкість природного газу,

Па·с;

p_{ex} – тиск на вході в камеру з взірцем,

Па;

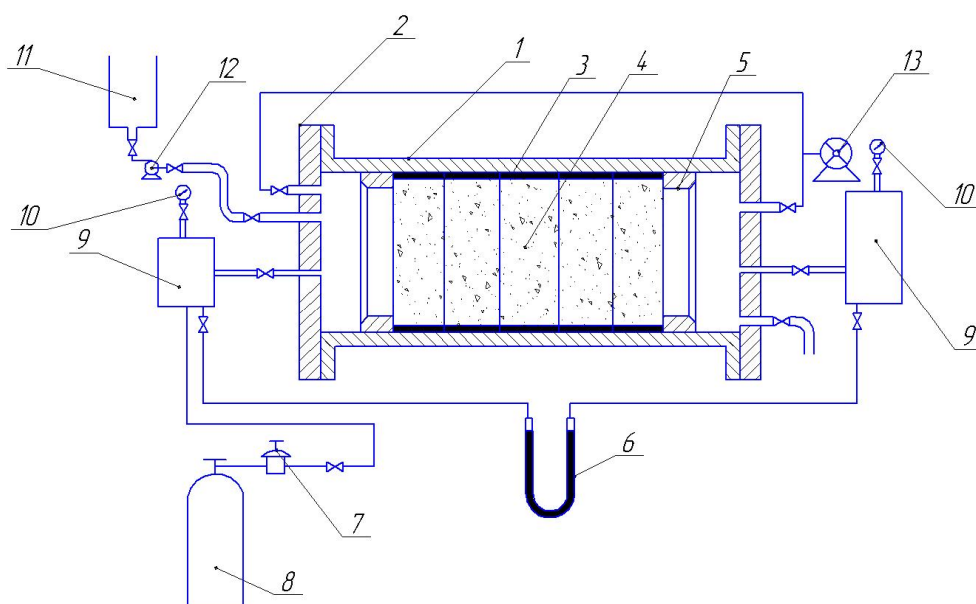
$p_{вых}$ – тиск на виході з камери, Па;

l – довжина взірця, м;

z_{cp} – коефіцієнт стисливості за середніх

умов.

Коефіцієнт стисливості z_{cp} визначався за середньоарифметичним тиском в камерах на вході і виході взірця та температурою оточуючого середовища за формулою Касперовича В.К [7]. За умов дослідів відносна густина газу складала $\Delta = 0,561$. Під час проведення першого етапу експериментів для всіх чотирьох дослідних взірців температура підтримувалась на рівні $18 \pm 0,5^\circ \text{C}$. Результати розрахунку про-



1 – циліндричний корпус для встановлення взірця; 2 – муфта; 3 – шар герметизуючої епоксидної смоли; 4 – керн; 5 – ущільнююча муфта; 6 – ртутний дифманометр; 7 – редуктор тиску метану; 8 – балон з метаном; 9 – камера метану; 10 – манометр; 11 – ємність з водою; 12 – водяний насос; 13 – газований лічильник

Рисунок 2 — Схема експериментальної установки з дослідження процесу осушення пористого середовища

никності взірців у ненасиченому стані представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 — Результати визначення проникності взірців у ненасиченому стані

№ взірця	Проникність взірця, $\times 1,02 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$
№1	745
№2	568
№3	1051
№4	945

На другому етапі експериментів проводилося насичення порового простору взірця технічною дистильованою водою. Цей етап включав такі операції: вакуумування взірця і насичення його водою під вакуумом та нагнітання води у взірець під вакуумом і під тиском.

За результатами було визначено масу взірця в стані 100 % насичення, масу води, яка заповнила поровий простір взірця.

Метою третього етапу було витіснення вільної води з взірця до такого стану, коли у взірці буде знаходитися лише залишкова вода. Цей результат досягався шляхом продування взірця метаном із одночасним визначенням фазової проникності взірця.

Було встановлено, що характер зміни фазової проникності кожного з взірців практично однаковий. Під час перших дослідів фазова проникність мало чим відрізняється від нуля, далі стрімко починає зростати та за результатами останніх дослідів з кожної серії експериментів крива фазової проникності наближається до

100% та практично не змінюється. Після проведення циклу експериментів кожен взірець зважувався. Маса взірця після проведення циклу експериментів відрізнялася від маси сухого взірця. Це свідчило про те, що не вся вода, якою був насичений взірець, була видалена з порового простору, однак подальше продування взірця не давало приросту фазової проникності, отже можна стверджувати, що у взірці залишилася лише нерухома залишкова вода, на яку суттєво впливають капілярні сили. Результати визначення залишкової водонасиченості представлені в таблиці 2.

Відповідно до отриманих результатів залишкова водонасиченість лежить у межах 27÷34%, що відповідає даним, які були отримані Сухаревим Г.М., [8] Карцевим А.А., [9] Кристеа Н., Гімнатудіновим Ш.К. та ін.

Метою останнього етапу експериментів було моделювання циклічної експлуатації порового простору шляхом періодичного нагнітання та відбору певної кількості природного газу.

Для кожного з взірців досліди проводилися за таких умов: середній тиск під час проведення експерименту змінювався в межах 2,45÷4,91 МПа, температура 283÷303 К. Було проведено цикл експериментів, при якому 8–10 разів моделювався процес циклічної експлуатації ПСГ. Після кожного з циклів взірець зважувався та визначалося, на скільки зменшилася маса взірця за кожен із циклів. Встановлено, що після 6–7 циклів „нагнітання – відбір” маса взірця залишається сталою, хоча й відрізняється від маси сухого екстрагованого взірця на початку експерименту.

Таблиця 2 — Результати визначення залишкової водонасиченості взірців

№ взірця	Маса сухого взірця, г	Маса взірця при 100% насиченні, г	Маса взірця після циклу дослідів, г	Залишкова водонасиченість, %
№1	318,1	376,6	334,5	28
№2	297,8	351,2	316,0	34
№3	321,4	380,3	336,1	25
№4	307,3	363,1	322,7	27

Таблиця 3 — Результати експериментів з осушення порового простору першого взірця

$P_{сер}$, МПа	T, К	Проникність взірця, $\times 1,02 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$	Зміна водонасиченості, %
2,45	283	735	23,24
3,43	283	735	21,19
3,92	283	735	20,54
4,91	283	735	19,91
2,45	288	735	23,58
3,43	288	735	22,90
3,92	288	735	21,36
4,91	288	735	20,33

Результати експериментів для першого взірця у діапазоні середніх тисків та температур наведені в таблиці 3.

Результати проведення експериментальних досліджень осушення порового простору в процесі його циклічної експлуатації дали можливість отримати емпіричну залежність для визначення величини максимального зменшення водонасиченості залежно від середнього тиску в поровому просторі, температури та проникності.

Для отримання вказаної залежності було використано методику раціонального планування експерименту. Незалежними параметрами вважалися середній тиск P , температура T та проникність середовища k , четвертий параметр C вважався сталим. Функцією-відгуком вважалось значення максимальної зміни водонасиченості α , яке було визначене експериментальним шляхом. Побудова залежності функції-відгуку від параметрів проводилася на основі методу найменших квадратів на п'яти рівнях.

Загальна функція $\alpha = f(P, k, T)$ з урахуванням перевідного коефіцієнта має вигляд

$$\alpha = 0,64675 \cdot P^{-0,1877} \cdot k^{0,0731} \cdot T^{0,5807} \quad (7)$$

У залежності (7) тиск P слід підставляти в МПа, температуру T в К, проникність k в мДс. Середньоквадратична похибка складає 0,0652, а коефіцієнт варіації – 0,0195 (1,95%).

Розрахунки максимальної зміни водонасиченості за отриманою залежністю (7) показали, що на процес осушення порового простору суттєво впливають всі вказані в залежності параметри. Ураховуючи той факт, що за умов роботи ПСГ температура покладів залишається незмінною, отже для умов ПСГ України розрахунки максимальної зміни водонасиченості в покладах можна розраховувати, виходячи зі значень проникності та середнього тиску газу в покладах.

Експериментальні дослідження осушення пористого середовища потоком газу дозволили встановити закономірності перерозподілу вологи залежно від параметрів режиму і отримати емпіричну залежність для визначення водонасиченості, використання якої підтверджує основні теоретичні положення та дає змогу оцінити стан продуктивного горизонту ПСГ в період циклів “нагнітання-відбір”.

Література

- 1 Амикс Дж., Басс Д., Уайтинг Р. Физика нефтяного пласта. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 247 с.
- 2 Кристеа Н. Подземная гидравлика: Пер. с рум. – М.: Гостоптехиздат, 1961. – Т.1. – 342 с.
- 3 Гиматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1982. – 312 с.
- 3 Джонс П. Механика нефтяного пласта. – М.: Гостоптехиздат, 1947. – 184 с.
- 4 Коротаев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1984. – 487 с.
- 5 Ширковский А.И. Определение и использование физических параметров пористой среды при разработке газоконденсатных месторождений. // ВНИИЭгазпром. Сер.: Геология, разведка и разработка газовых и газоконденсатных месторождений. – 1971. – 49 с.
- 6 Касперович В.К. Практичні залежності для розрахунку коефіцієнта стисливості // Нафтова і газова промисловість. – 1996. – №4 – С. 43-44.
- 7 Сухарев Г.М. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1971. – 304 с.
- 8 Карцев А.А. Гидрогеология нефтяных и газовых месторождений. – М.: Недра, 1972. – 280 с.