

## РОЗРАХУНОК ЗБІЛЬШЕННЯ ГАЗОНАСИЧЕНОГО ПОРОВОГО ОБ'ЄМУ ПСГ ЗА РАХУНОК ОСУШЕННЯ ПОКЛАДІВ

О.М.Сусак

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166  
e-mail [tzng@nuing.edu.ua](mailto:tzng@nuing.edu.ua)

*Представлены результаты теоретических исследований процесса осушки пластов ПХГ от остаточной воды. Исходя из зависимостей подземной гидравлики разработаны математические модели для расчета изменения остаточной водонасыщенности. Представлены результаты апробации полученных зависимостей на примере одного из ПХГ Украины.*

*The results of theoretical calculation 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 based on theoretical dependences of reservoir hydraulics.*

Режими роботи пластової системи підземних сховищ газу визначаються характером протікання газогідродинамічних процесів у пористому середовищі, а тому вивчення впливу властивостей пористого середовища на характер фільтрації газу має вирішальне значення під час розв'язання задач із прогнозування режимів роботи ПСГ. Вивчення параметрів роботи ПСГ, що створені у виснажених газових родовищах та працюють у газовому режимі роботи, дало змогу встановити розбіжності між проектними та фактичними значеннями активного газонасиченого порового об'єму покладів. Було встановлено, що на етапі проектування та експлуатації ПСГ не враховувався факт наявності залишкової водонасиченості в покладах сховищ газу. Результати численних досліджень структури та кількості залишкової води в покладах колишніх газових родовищ дали змогу встановити, що на початковій стадії розробки на виснаження покладів газових родовищ залишкова водонасиченість коливалася в межах від 10 до 30%.

Питання впливу залишкової водонасиченості на характер фільтрації газу вивчалось детально науковцями світу, такими як Щелкачев В.Н. [1], Чарний І.А. [2], Хейн А.Л. [3] та ін. Однак питанню цього впливу циклічної експлуатації на параметри покладів практично не приділялося уваги. Детально процес осушення пористого середовища під час розробки на виснаження газового родовища вивчав Ширковський А.І. [4] та прийшов до висновку, що протягом усього періоду розробки на виснаження осушується лише привибійна зона свердловини, а пласт загалом не зазнає змін у залишковій водонасиченості. Однак в його праці не розглядався режим нагнітання не насиченого вологою природного газу в обсязі, що прирівнюється до початкових запасів родовища. Тому доцільно детально розглянути процес осушення порового простору під час циклічної експлуатації покладів ПСГ, крім того, слід врахувати особливості геологічної будови сховищ, наявність застійних зон та зон із пониженою фільтрацією.

Як вихідні рівняння для розробки математичної моделі процесу осушення пористого середовища використовувалися такі залежності: залежність для визначення вологовмісту природного газу в стані повного насичення (формула Бюкачека); закон збереження маси газу в покладах; рівняння нерозривності потоку газу при ізотермічній фільтрації газу.

$$W = \left( B(t) + \frac{A(t)}{P} \right) \cdot k_1 \cdot k_2, \quad (1)$$

де:  $B(t)$ ,  $A(t)$  – коефіцієнти, що визначаються в залежності від температури газу;

$k_1$ ,  $k_2$  – відповідно коефіцієнти, що враховують склад газу та мінералізацію води,

$$\operatorname{div} \bar{V} + m_0 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{(1-S) \cdot \rho}{f \cdot \rho_0} \right) = 0; \quad (2)$$

$$\operatorname{div}(W \cdot \bar{V}) + m_0 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \left( S + \frac{(1-S) \cdot \rho \cdot W}{f \cdot \rho_0} \right) = 0, \quad (3)$$

де:  $f$  – коефіцієнт, що враховує збільшення об'єму газової фази внаслідок вмісту в природному газі водяних парів ( $f = 1$ );

$S$  – водонасиченість порового простору.

Під час проведення розрахунків було прийнято такі припущення: за рахунок осушення фазова проникність покладів змінюється за лінійним законом; динамічна в'язкість газу, коефіцієнт стисливості природного газу визначалися за значенням середньозваженого пластового тиску та пластової температури; пластова температура – величина незмінна впродовж циклічної експлуатації сховищ газу.

Залишкова водонасиченість покладів у початковому стані визначалася аналітичним методом. Такі залежності в своїх роботах приводять Гімматудинов Ш.К., Коротаєв Ю.П., Ширковський А.І. [5], [6]. Ці залежності отримані ними на основі аналізу результатів випробувань кернів порід. Найбільш поширені залежності наводить Ширковський А.І. [1]:

$$S_n = 0,337 - 0,155 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (4)$$

$$S_{nc} = 0,182 - 0,1 \cdot \log \frac{k_o}{m_o}, \quad (5)$$

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

$k_o$  – абсолютна проникність, Дс;

$m_o$  – відкрита пористість, частки од.

За залежністю (4) було визначено залишкову водонасиченість покладів одного з ПСГ України. Так, початкова залишкова водонасиченість покладів знаходиться у межах від 15 до 24% при абсолютній проникності покладів  $k = 225 \div 1335$  мД·с та пористості 24-25%. Відповідно до фактичних даних мінімальна залишкова водонасиченість покладів приймалася в межах 8-10%.

Спільний розв'язок залежностей (1)-(3) за умови плоскорадіальної фільтрації реального газу в покладі дав можливість отримати залежність для визначення зміни водонасиченості на контурі живлення за період відбору газу:

$$S_{кін} = S_{ноч} - \frac{A' \cdot \mu_{ср} \cdot \Omega_0 \cdot T_0^2 \cdot Q}{k_0 \cdot F^2 m_o \cdot T^2 \cdot (P_{ноч}^2 - P_{кін}^2)} \times \left( \frac{P_{кін}}{\sqrt{2 \cdot P_{кін}^2 - P_{ноч}^2}} - \frac{P_{ноч}}{P_{кін}} \right) - \frac{A' \cdot T_0}{T \cdot z_{ср} \cdot P_0 \cdot f} \cdot \ln \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кін}} \right), \quad (6)$$

де:  $S_{кін}$  – кінцева водонасиченість, частки од.;

$S_{ноч}$  – початкова водонасиченість, частки од.;

$A'$  – коефіцієнт із формули Бюкачека для визначення вологовмісту природного газу, що визначається залежністю  $A' = A(t) \cdot k_1 \cdot k_2$ ;

$k_1$  та  $k_2$  – коефіцієнти, що враховують відповідно склад газу та мінералізацію води;

$\mu_{ср}$  – динамічна в'язкість природного газу за середніх умов, Па·с;

$\Omega_0$  – початковий газонасичений поровий об'єм, м<sup>3</sup>;

$T_0$  – стандартна температура, К;

$Q$  – об'єм відбору газу за стандартних умов за місяць (декаду), м<sup>3</sup>;

$k_0$  – початкова фазова проникність середовища, м<sup>2</sup>;

$F$  – площа фільтрації, м<sup>2</sup>;

$m_o$  – початкова пористість середовища, частки од.;

$T$  – пластова температура, К;

$P_{ноч}$  – середньозважений по об'єму тиск на початку місяця (декади) відбору газу, Па;

$P_{кін}$  – середньозважений по об'єму тиск на кінець місяця (декади) відбору газу, Па;

$z_{ср}$  – коефіцієнт стисливості за середніх умов;

$P_0$  – атмосферний тиск за стандартних умов (101325 Па);

$f$  – коефіцієнт, що враховує збільшення об'єму газової фази внаслідок вмісту в природному газі водяних парів ( $f = 1$ ), для умов ПСГ Прикарпаття.

Зміну водонасиченості на контурі в процесі нагнітання газу можна визначити за залежністю

$$S_{кін} = S_{ноч} + \frac{A' \cdot \mu_{ср} \cdot \Omega_0 \cdot T_0^2 \cdot Q}{k_0 \cdot F^2 m_o \cdot T^2 \cdot (P_{кін}^2 - P_{ноч}^2)} \times \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кін}} - \frac{P_{кін}}{\sqrt{2 \cdot P_{кін}^2 - P_{ноч}^2}} \right) + \frac{A' \cdot T_0}{T \cdot z_{ср} \cdot P_0 \cdot f} \cdot \ln \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кін}} \right). \quad (7)$$

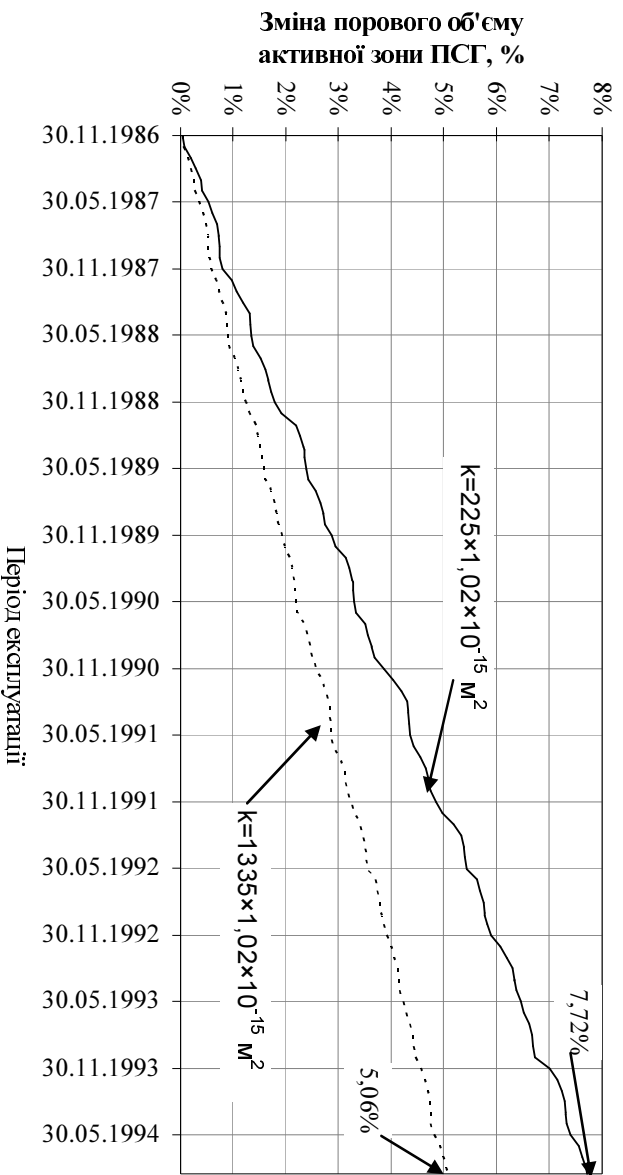
Газонасичений поровий об'єм в кінці місяця (декади) відбору або нагнітання газу можна визначити за залежністю

$$\Omega = \frac{\Omega_0}{1 - (S_{ноч} - S_{кін})}. \quad (8)$$

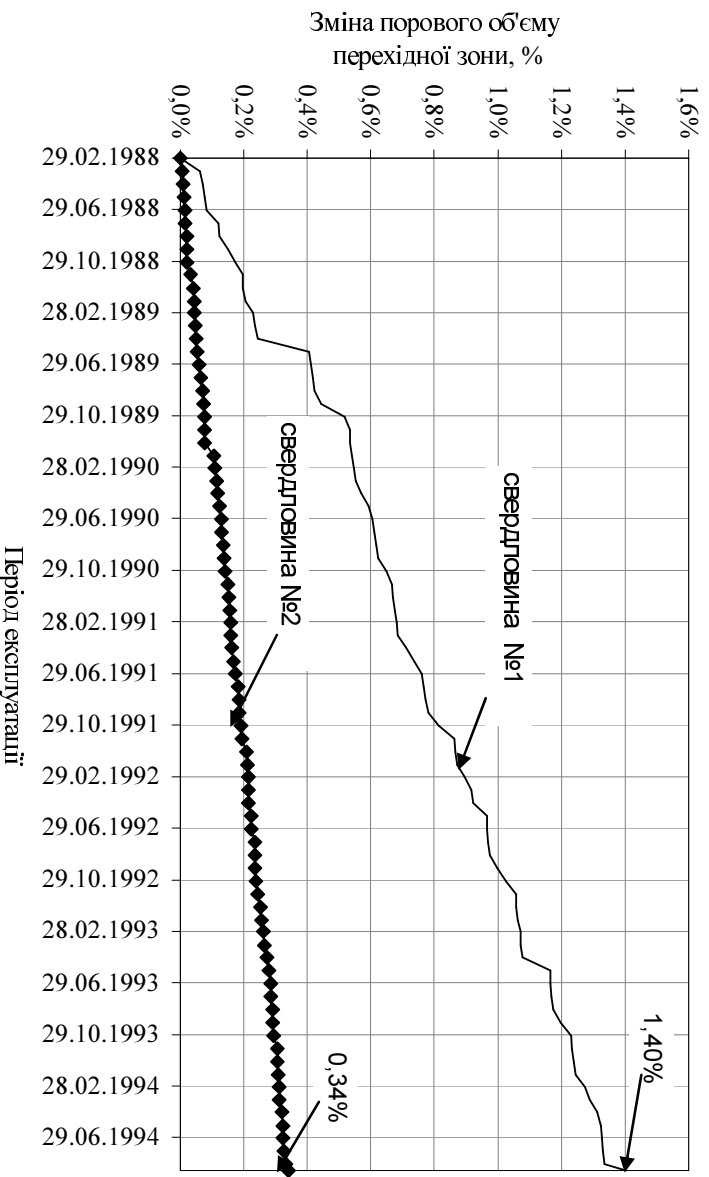
Апробація отриманих залежностей була проведена на прикладі фактичних даних експлуатації одного з ПСГ Західного комплексу підземного зберігання газу. Внаслідок складної геологічної будови сховища розрахунок проводився по зонах фільтрації: активній, перехідній та застійній. Як вихідні дані використовувалися фактичні дані експлуатації сховища, а саме: середньозважений початковий та кінцевий пластовий тиск станом на кінець кожного місяця відбору (нагнітання) газу, початковий газонасичений поровий об'єм, пластова температура, абсолютна проникність покладу в зоні фільтрації, пористість покладу, площа фільтрації. Під час проведення розрахунку визначалося значення водонасиченості, зміни водонасиченості у відсотках, значення порового об'єму та зміни порового об'єму у відсотках. Розрахунки проводилися для різних значень проникності, а саме:  $k = 225, 450, 750, 1335$  мД·с.

За результатами розрахунків були побудовані графічні залежності зміни газонасиченого порового об'єму активної зони сховища впродовж перших десяти років циклічної експлуатації сховища. Результати розрахунку зміни газонасиченого порового об'єму активної зони сховища представлені на рис. 1.

Перехідна та застійна зона сховища також зазнають ефекту осушення порового простору, хоч і значно меншою мірою. Розрахунок процесу осушення перехідної зони проводився за фактичними даними експлуатації сховища; як вихідні дані приймалися значення пластового тиску по двох спостережних свердловинах, що розташовані у перехідній зоні сховища. Результати розрахунку зміни газонасиченого порового простору перехідної зони сховища представлені на рис. 2.



Рисунк 1 – Динаміка зміни порового об'єму активної зони сховища в період 1986–1994 рр.



Рисунк 2 — Динаміка зміни газонасиченого порового об'єму перехідної зони сховища

Застійна зона сховища характеризується значно меншими змінами пластового тиску, як вихідні дані використовувалися фактичні значення пластового тиску по контрольній свердловині застійної зони. Результати розрахунку зони газонасиченого порового об'єму застійної зони сховища представлені на рис. 3.

На основі закономірностей фільтрації газу в пористому середовищі створено і реалізовано математичну модель осушення продуктивного горизонту сховища, що дає можливість прогнозувати збільшення газонасиченого порового простору в період циклів „нагнітання-відбір”.

Результати аналітичного розрахунку процесу осушення порового простору сховища від залишкової пластової води показують, що осушення порового простору активної зони сховища відбувається протягом перших 6-8 років циклічної експлуатації, за рахунок чого активно працюючий поровий простір збільшується на 5-7,7%. Зони пониженої фільтрації та застійні зони також відчують вплив ефекту осушення покладу хоч і значно меншою мірою. Так, поровий простір перехідної зони збільшується лише на 1%, а поровий простір застійної зони – на 0,44%, тобто таким збільшенням можна знехтувати.

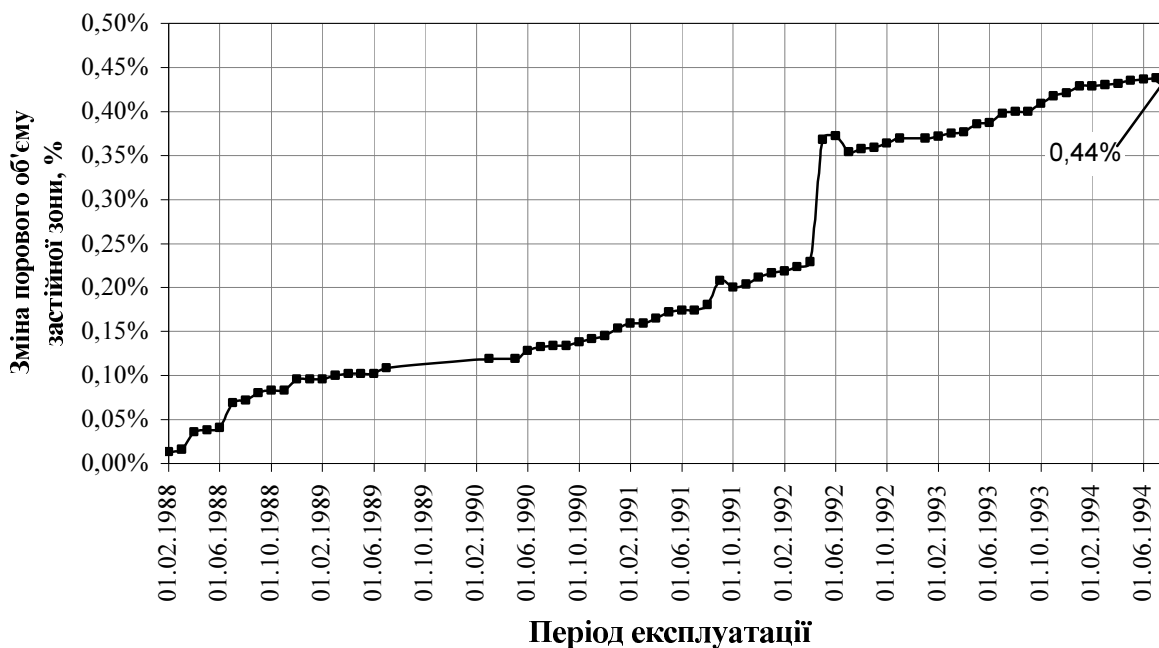


Рисунок 3 — Динаміка зміни газонасиченого порового об'єму застійної зони сховища

### Література

1 Щелкачев В.Н. Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. – М.: Гостоптехиздат, 1949. – 523 с.  
 2 Чарный И.А. и др. Динамика осушки водоносных пластов при создании подземных газохранилищ // Газовая промышленность. – 1962. – №1. – С.15-18.  
 3 Хейн А.Л., Бузинов С.Н., Алтухов П.Я. Экспериментальное исследование процесса двухстадийной осушки водоносного пласта газом. // Вопросы подземного хранения газа в водоносных структурах: Труды ВНИИГАЗ. – 1961. – Вып. 11(19). – С. 296-345.

4 Ширковский А.И. Определение и использование физических параметров пористой среды при разработке газоконденсатных месторождений. // ВНИИЭгазпром. Серия: Геология, разведка и разработка газовых и газоконденсатных месторождений. – 1971. – С. 49.  
 5 Гимматудинов Ш.К., Ширковский А.И. Физика нефтяного и газового пласта. – М.: Недра, 1982. – 312 с.  
 6 Коротаев Ю.П., Ширковский А.И. Добыча, транспорт и подземное хранение газа. – М.: Недра, 1984. – 487 с.