

Рис. 7 - Графік залежності  $P_{пл.пр.} = F(V_{газу в покладі})$ , побудований на основі переінтерпретації об'ємів газу:

- крива графіка за період 1979-1985 рр.
- крива графіка за період 1985-1990 рр.
- крива графіка за період 1990-1995 рр.
- крива графіка за період 1995-2002 рр.

#### Література

1. *Войцицький І.В.* Основні принципи аналізу експлуатації пластової частини підземних сховищ газу // Питання розвитку газової промисловості України / Зб. наук. праць УкрНДІгазу. Вип. XXX. – Харків, 2002. – С. 2.

УДК 622.691.24

### АНАЛІЗ ЦИКЛІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ БОГОРОДЧАНСЬКОГО ПСГ

© *В.В. Заяц*<sup>1</sup>, *М.Д. Гебура*<sup>1</sup>, *П.Р. Гімер*<sup>2</sup>, *О.М. Сусак*<sup>2</sup>

1) УМГ „Прикарпаттрансгаз”, 48, вул. Незалежності, м. Івано-Франківськ, 76000; E-mail: zvv.ptg@naftogaz.net

2) ІФНТУНГ; 15, вул. Карпатська, м. Івано-Франківськ, 76019. E-mail: gidro@nung.edu.ua

Приводится анализ циклической эксплуатации Богородчанского ПХГ с использованием метода стандартного годографа. На основе анализа выделены три этапа формирования хранилища. Причем на третьем этапе отмечено увеличение рабочего объема ПХГ, которое происходит за счет осушки пласта и оттеснения контурных вод.

An analysis of the Bohorodchany UGSF cyclic operation by means of a standard hodograph method is given. On basis of the analysis three stages of storage creation are singled out. At that an increase of UGS operating capacity is noticed at the third stage. It occurs due to layer dehydration and boundary waters driving off.

У процесі циклічної експлуатації підземних сховищ газу виникає питання контролю герметичності сховища та оцінювання параметрів газового покладу, а саме активного газонасиченого об'єму та об'єму застійних зон ПСГ. Найбільш простий та ефективний метод оцінювання герметичності сховища та визначення параметрів циклічної роботи покладу, на нашу думку, є метод побудови стандартних годографів ПСГ.

Стандартний годограф – графік залежності зведеного пластового тиску  $\bar{p}$  від загальної кількості газу в пласті за стандартних умов  $V_{cm}$ :

$$\bar{p} = \left( \frac{\rho_{cm} RT_{nl}}{V_{nl}} \right) V_{cm} \tag{1}$$

де  $\bar{p} = p_{nl}/z$  – зведений пластовий тиск;  $V_{nl}$  – активний газонасичений поровий об’єм пласта, млн. м<sup>3</sup>;  $V_{cm}$  – загальний об’єм газу в покладі, млн. м<sup>3</sup>;  $T_{nl}$  – пластова температура, К;  $R$  – газова стала природного газу,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$ ;  $\rho_{cm}$  – густина газу за стандартних умов,  $кг/м^3$

За фізичним змістом годограф – це графічне зображення зміни енергії газу в газосховищі при нагнітанні чи відборі газу, або його загальної потужності протягом циклу, оскільки:

$$N = p_{зв} V_{cm} \tag{2}$$

Залежність (1) називають стандартним годографом, оскільки об’єм газу зведений до стандартних умов і для його побудови використовуються безпосередньо дані обліку газу при циклічній експлуатації газосховища, і тільки зміну пластового тиску перераховують на зведений пластовий тиск. На нашу думку, він найпростіший для побудови годографа і зручний для виробничників, оскільки дозволяє:

- визначити об’єм газу в ПСГ;
- визначити газонасичений об’єм пласта;
- визначити активно працюючий об’єм пласта;
- визначити об’єм застійних зон;
- оцінювати герметичність штучного покладу;
- оцінювати фізико-літологічну характеристику покладу та її зміни.

Датою початку експлуатації Богородчанського газового родовища в ролі ПСГ можна вважати травень 1979 року коли було розпочато нагнітання буферного об’єму газу. Період 1979-1980 років експлуатації описується типовими кривими годографа для виведення ПСГ на режим циклічної експлуатації. У цьому режимі для сховища характерна наявність значної петлі годографа, лінії нагнітання та відбору мають різні кути нахилу і дуже сильно відчувається вплив розтікання газу по газоносній площі покладу. У цей період працювало всього 8 свердловин, які залишилися від газового родовища (рис. 1).

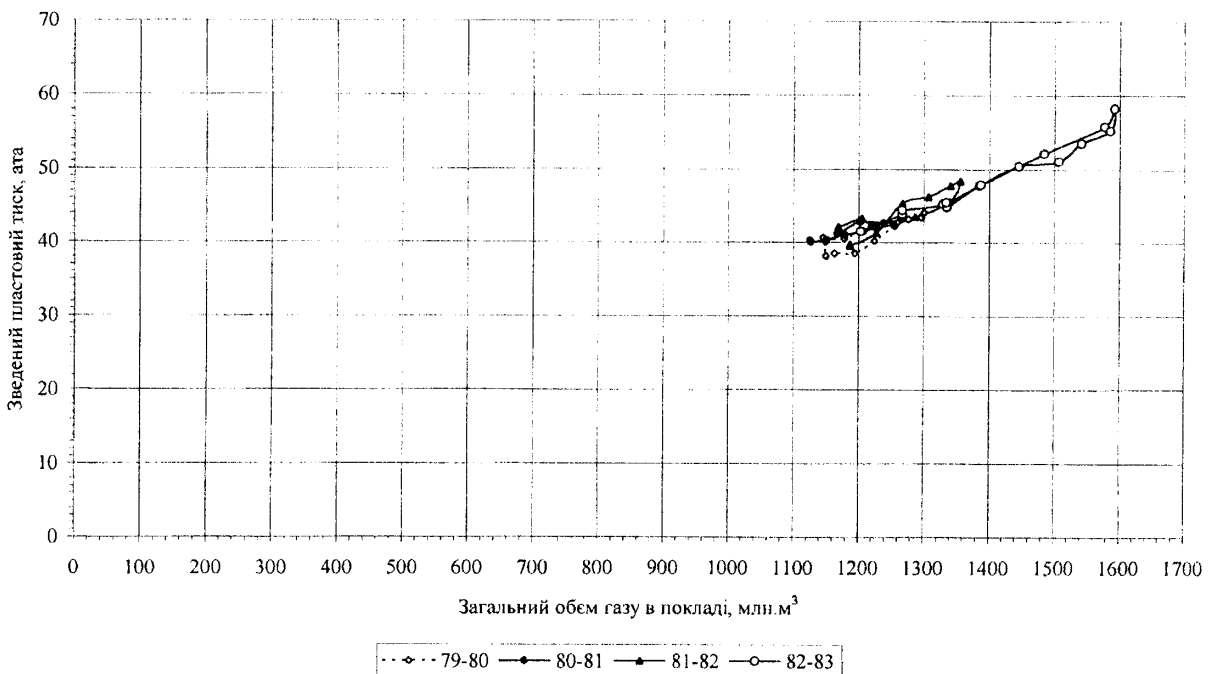


Рисунок 1 - Годограф циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ за 1979-1983 роки

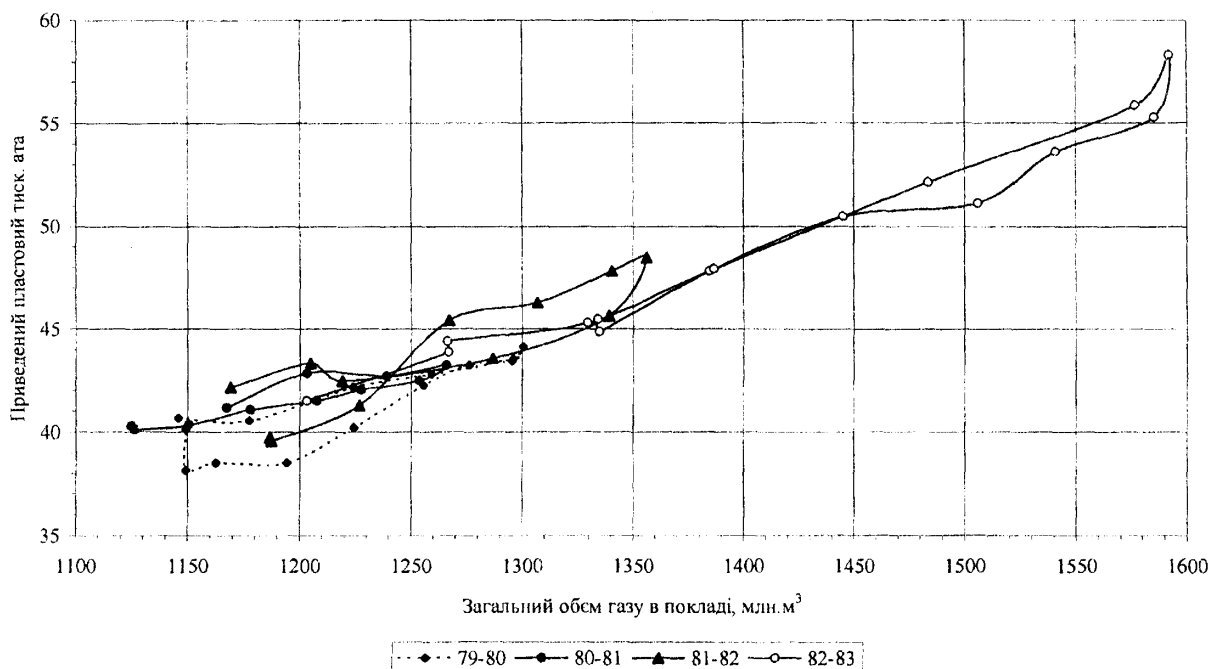


Рисунок 2 - Годограф циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ за 1979-1983 роки

Наступний період роботи 1980-1981 років не вніс корективи в режим виведення ПСГ на проектні показники у зв'язку з малими об'ємами нагнітання та відповідно малим максимальним тиском у сховищі (43,25 кгс/см<sup>2</sup>). Для даних років роботи також характерно значне розтікання газу по площі. Результатом даного процесу є велика площа гістерезисної кривої.

Значне зростання об'ємів нагнітання буферного газу в сховищі розпочалося в період 1981-1982 років, коли максимальний пластовий тиск зріс до 48,5 кгс/см<sup>2</sup> при загальному об'ємі газу в сховищі – 1356,29 млн. м<sup>3</sup>. У цей період формування штучного покладу спостерігається перетин кривих нагнітання і відбору. Точка перетину відповідає значенню загального об'єму газу в ПСГ 1240 млн.м<sup>3</sup> і тискові 42,5 кгс/см<sup>2</sup>. Станом на кінець періоду 1981-1982 років в експлуатації було 10 свердловин (рис. 2).

Нагнітання буферного газу продовжилось в 82-83 роках. У цей період зведений пластовий тиск виріс до 58,3 кгс/см<sup>2</sup>, при загальному об'ємі газу 1592 млн.м<sup>3</sup>. Слід відмітити, що в цей період вперше чітко помітні ознаки циклічної роботи частин покладу: значно зменшується площа гістерезисної петлі.

При пластових тисках у межах 40-50 кгс/см<sup>2</sup> практично накладаються лінії нагнітання і відбору газу, що свідчить про рівність активних об'ємів пласта охоплених роботою, незначні втрати пластової енергії в цьому діапазоні тисків.

При збільшенні зведеного тиску вище 50 кгс/см<sup>2</sup>, суттєві відмінності в режимі роботи покладу відсутні, при низьких темпах відбору газу проходить розтікання газу по площі сховища. З годографа (Рис. 2), видно, що в період відбору газу (при зведеному пластовому тиску більше 50 кгс/см<sup>2</sup>) у роботу включається більший газонасичений об'єм при цьому зростають втрати пластової енергії, збільшується площа петлі годографа.

У 1983-1985 роках суттєвих змін у газонасиченому поровому об'ємі не спостерігалось. Дещо збільшилися об'єм нагнітання газу. Загальний об'єм газу в покладі зріс до 2145 млн.м<sup>3</sup>, тиск у пласті піднявся до 75,34 кгс/см<sup>2</sup>. Характер кривих залежності  $\bar{p} = f(\Sigma Q)$  аналогічний попереднім двом циклам: у період відбору – розширення газової області та заповнення низькопроникних зон сховища.

Цикл роботи ПСГ в 1985-1986 років є першим циклом, в якому показники сховища стали наближатися до проектних. Зведений пластовий тиск зріс до 101,6 кгс/см<sup>2</sup>, при загальному об'ємі газу в покладі 3019 млн.м<sup>3</sup>. У цей період роботою охоплена значна (більше 85%) частина покладу. У зв'язку зі значним підвищенням тиску в пласті більш суттєво виражене розтікання газу в покладі, а отже, і втрати пластової енергії. Лінії нагнітання та відбору мають дещо різний характер. Під час нагнітання крива відхиляється від прямої лінії, що пов'язано як з тривалим нагнітанням газу (приблизно 6 місяців), так і з малими темпами нагнітання. Як наслідок, відбувався перерозподіл тиску

по площі газосховища. Відбір газу з покладу здійснювався більш високими темпами і крива відбору практично не відхиляється від прямолінійної (Рис. 3).

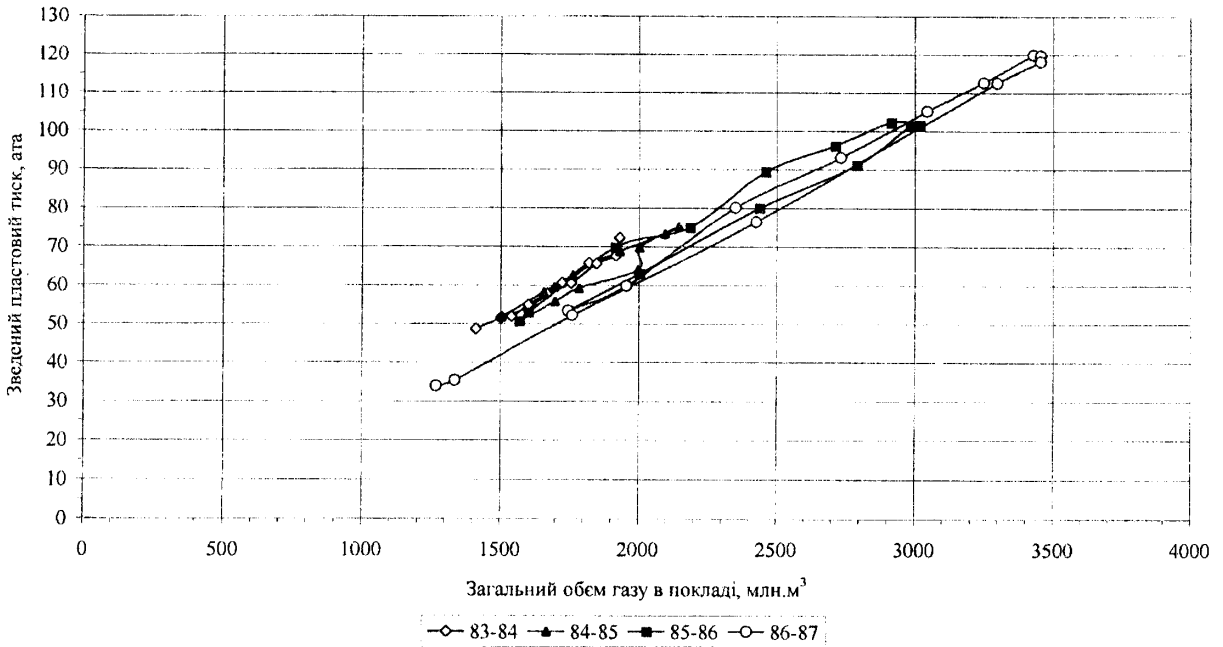


Рисунок 3 -Годограф циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ за період 1983-1987 роки

Наступний цикл роботи 86-87 роки характерний виведенням сховища на проектний режим. Зведений пластовий тиск зріс до 119,9 кгс/см<sup>2</sup>, при загальному об'ємі газу 3420 млн.м<sup>3</sup>. Площа петлі годографа значно зменшилася, що свідчить про завершеність перерозподілу об'ємів газу по площі сховища та більш повне охоплення покладу циклічною роботою (рис. 4).

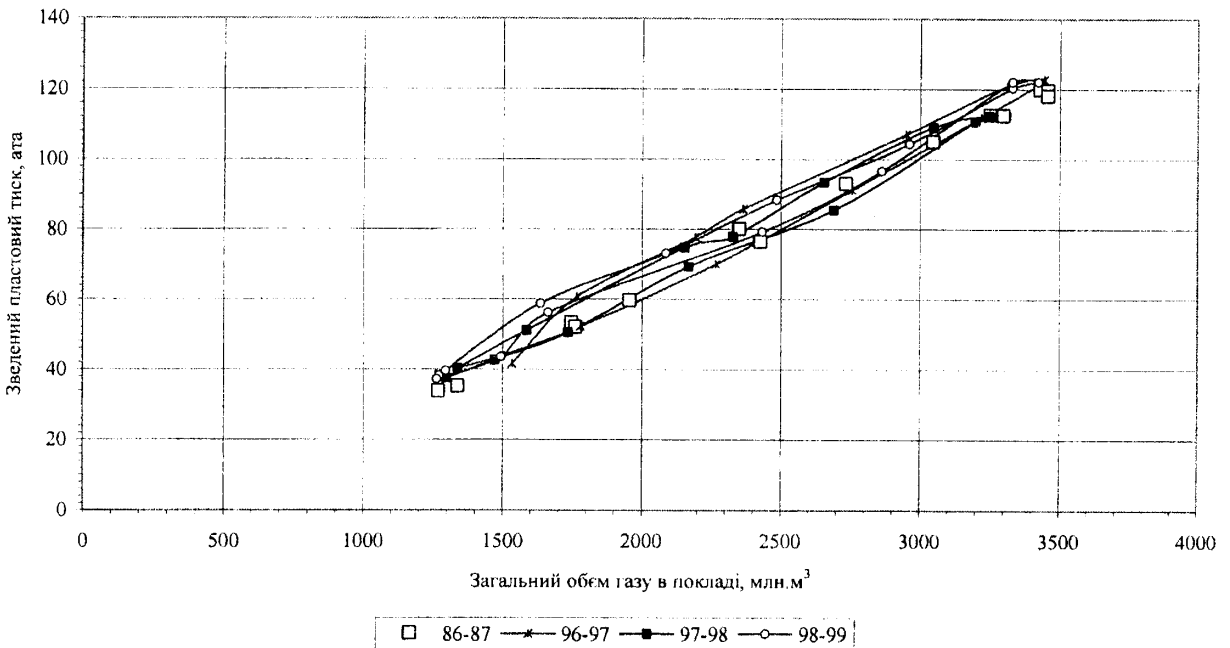


Рисунок 4 - Годограф циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ у період 1986-1998 рр.

Подальші цикли експлуатації сховища (з 1986 по 1998 роки) мають багато спільних рис. Петлі годографа (залежність  $\bar{p} = f(\Sigma Q)$ ) практично накладаються, однакові кути їх нахилу до осі абсцис, однак є і деяка різниця в режимах роботи. Так, у період 1987-1988 років вперше чітко виражена то-

чка перетину графіків нагнітання – відбір. Перетин кривих відбувається при зведеному тиску приблизно в  $58 \text{ кгс/см}^2$ , при цьому криві нагнітання та відбору мають різні кути нахилу, що означає роботу різних порових об'ємів у поточний проміжок часу.

Загалом, починаючи з 1994 року сховище почало поступово працювати в режимі, що наближається до раціонального. Так, у 1997-1998 роках циклічна експлуатація велася вже в більш оптимальних для сховища режимах: втрати пластової енергії знизилися, а в наступних циклах роботи (1998-2001 роки) лінії нагнітання – відбір практично паралельні, загальні втрати пластової енергії в кожному циклі практично однакові (рис. 5).

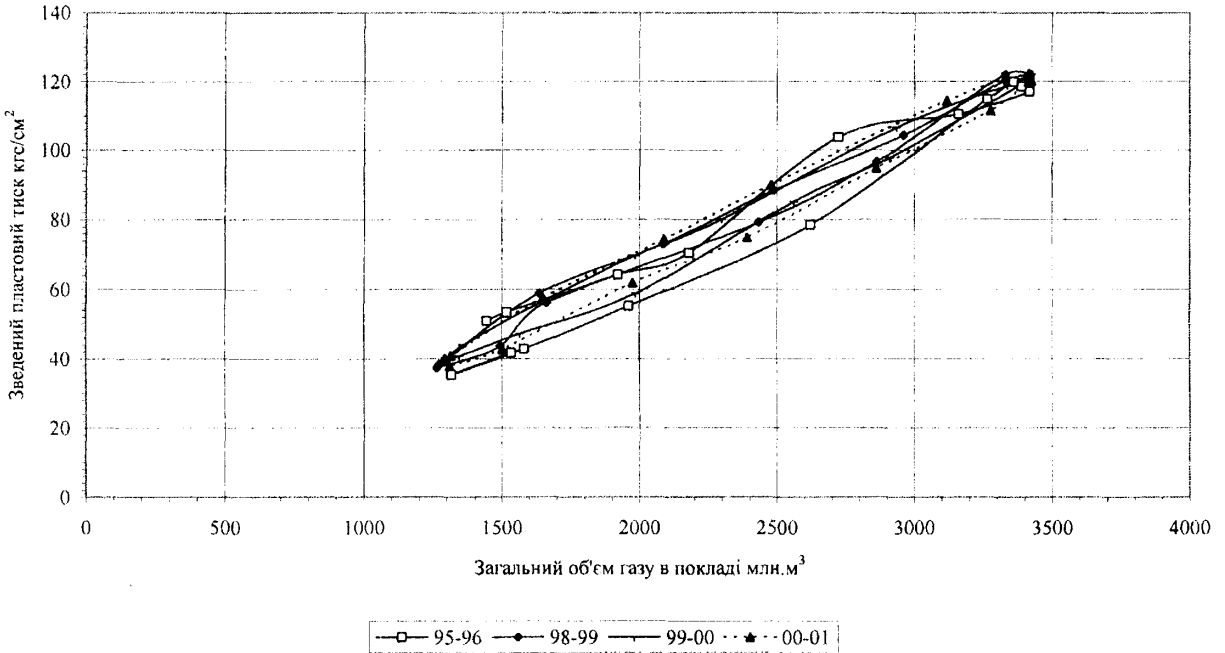


Рисунок 5 -Годограф циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ за період 1995-2001 роки

Для аналізу зміни активного газонасиченого порового об'єму та об'єму застійних зон сховища використовуємо механізм розрахунку параметрів кривої годографу, а саме визначимо коефіцієнти наступного рівняння:

$$\bar{p} = aQ + b,$$

де  $a$  – коефіцієнт, який обернено пропорційний активному газонасиченому поровому об'єму сховища;

$b$  – відрізок, що відсікається на осі абсцис при продовженні лінії годографу, і який характеризує об'єм газу в застійних зонах сховища.

Дані коефіцієнти були пораховані для циклів експлуатації сховища та результати зведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку активного порового об'єму застійних зон Богородчанського ПСГ

Період, роки	Коефіцієнти		Зведений поровий об'єм, млн.м <sup>3</sup> /ата	Об'єм застійних зон, млн.м <sup>3</sup>
	$a$ , ата/млн.м <sup>3</sup>	$b$ , ата		
82-83	0,03906202	-6,09683849	25,600	156,08
85-86	0,03633372	-5,76453522	27,523	158,66
86-87	0,03964105	-16,83520704	25,226	424,69
87-88	0,03984270	-17,93537977	25,099	450,15
88-89	0,04075121	-19,86952780	24,539	487,58
89-90	0,03955495	-13,37939041	25,281	338,25
90-91	0,04064224	-15,22021667	24,605	374,49
91-92	0,03707186	-6,93512394	26,975	187,07
92-93	0,04240438	-15,22136232	23,582	358,96
93-94	0,03929684	-4,58604837	25,447	116,70
94-95	0,04026538	-6,23242188	24,835	154,78

Продовження таблиці 1.

Період, роки	Коефіцієнти		Зведений поровий об'єм, млн.м <sup>3</sup> /ата	Об'єм застійних зон, млн.м <sup>3</sup>
	a, ата/млн.м <sup>3</sup>	b, ата		
95-96	0,03981271	-15,68815897	25,118	394,05
96-97	0,04070298	-16,28946983	24,568	400,20
97-98	0,03882625	-12,80925651	25,756	329,91
98-99	0,03897099	-10,57663295	25,660	271,40
99-00	0,03823928	-9,87507732	26,151	258,24
00-01	0,03849097	-11,00298083	25,980	285,86
01-02	0,03787098	-9,12550096	26,405	240,96
02-03	0,03711948	-7,50055146	26,940	202,07
03-04	0,03865315	-9,37938648	25,871	242,66

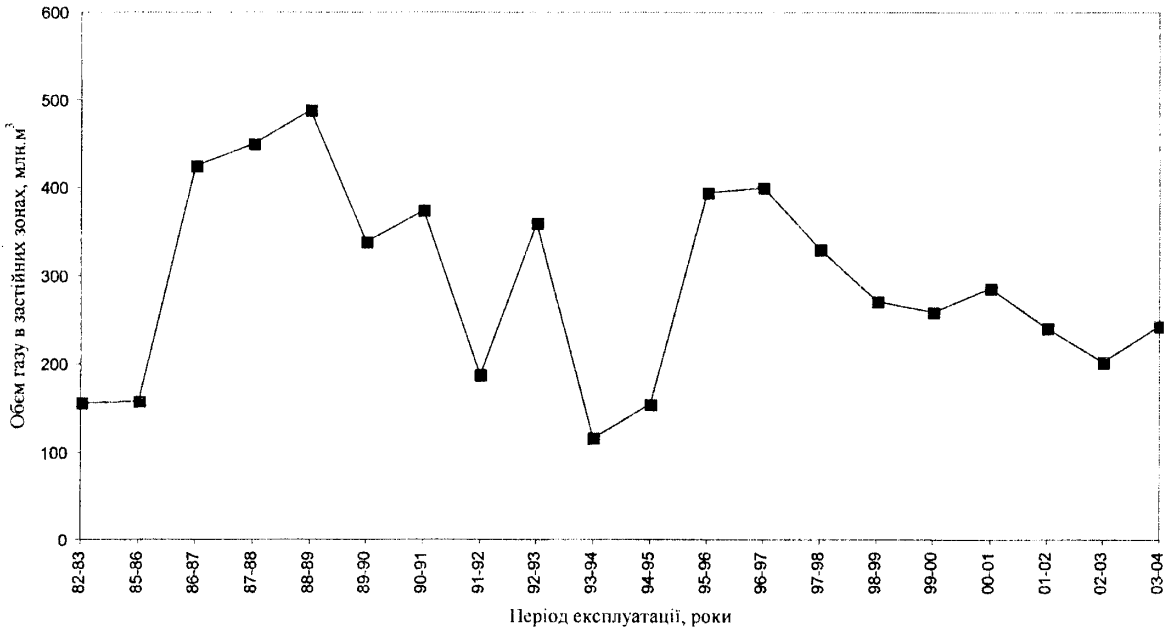


Рисунок 6 - Зміна об'єму газу в застійних зонах Богородчанського ПСГ

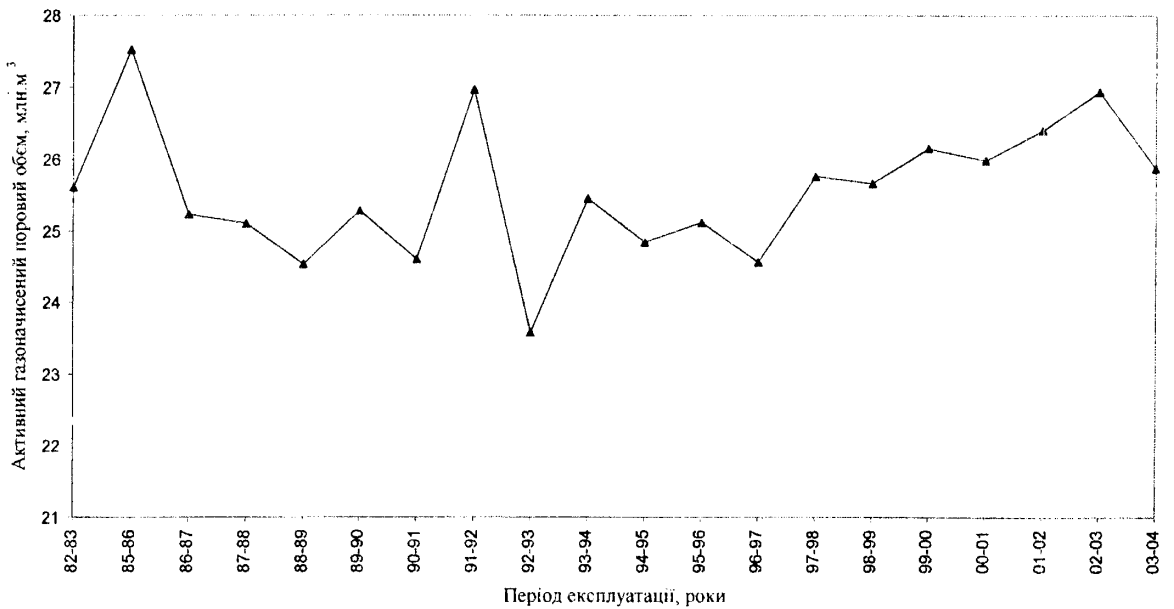


Рисунок 7 - Динаміка зміни активного газонасиченого порового об'єму Богородчанського ПСГ

Аналізуючи динаміку зміни порового об'єму сховища можна сказати наступне:

- Період стабілізації порового об'єму від моменту створення сховища в 1979 році тривав до циклу 1985-1986 років.
- Починаючи з 1986 по 1997 рік активний газонасичений поровий об'єм практично не змінювався та залишався в межах 25 млн.м<sup>3</sup>.
- Цикл 1997-1998 років характерний початком зростання порового об'єму. При цьому тенденція до зростання порового об'єму спостерігається до останнього циклу 2002-2003 років і протягом 9 циклів роботи активний поровий об'єм збільшився з 25 млн.м<sup>3</sup> до 26,9 млн.м<sup>3</sup> тобто практично на 8%.

Стабільне зростання порового об'єму свідчить про розширення сховища, в першу чергу, внаслідок осушення пласта і, можливо, незначного витіснення контурної води.

Динаміка зміни об'єму газу в застійних зонах сховища дещо відрізняється від зміни порового об'єму. Так, починаючи від 1985 року спостерігалось значне зростання об'єму газу в застійних зон. У подальшому, протягом трьох циклів роботи, практично відбулася його стабілізація за рівні, приблизно 420-480 млн.м<sup>3</sup>, надалі об'єм застійних зон мав тенденцію до зниження. З аналізу, на нашу думку, слід виключити періоди, коли був порушений усталений режим роботи газосховища (періоди 1993-1995 років). Починаючи з циклу 1995-1996 і до 2003 року спостерігається стабільне зменшення об'єму застійних зон з 400 млн.м<sup>3</sup> (1996-997 роки) до 250 млн.м<sup>3</sup> (1999-2000 роки) та до 200 млн.м<sup>3</sup> в останні періоди роботи. Загалом, об'єм застійних зон у порівнянні з початковими (в 1986-1989 роках) зменшився більше ніж у два рази.

На нашу думку процес формування сховища тривав наступним чином.

- 7) Етап перший – етап формування сховища. Процес нагнітання буферного газу в сховище. Даний етап роботи тривав з 1979 по 1986 роки коли в 1986 році вперше зведений пластовий тиск піднявся практично до 120 кгс/см<sup>2</sup>. У цей період роботи сховище працювало в режимі постійного збільшення охоплення покладу, про що свідчить зростання загальної площі петлі годографу. Протягом цього етапу роботи сховища в експлуатацію вводилися нові свердловини відразу після буріння, що спричинило нерівномірну експлуатацію покладу сховища, саме цим пояснюється складна форма кривих годографу сховища в цей період.
- 8) Етап другий – етап усталеної роботи ПСГ. Починаючи з циклу 1986-1987 років до циклу 1996-1997 років сховище практично не змінювало свої параметри роботи. Загальні втрати пластової енергії стабілізувалися параметри нагнітання та відбору від циклу до циклу повторювалися. Такий період можна назвати усталеним. Впродовж циклів експлуатації спостерігалася наявність точок перетину кривих нагнітання та відбору і, на нашу думку, цей факт можна пояснити тривалістю нагнітання та відбору газу, зміною темпів нагнітання та відбору впродовж циклу.
- 9) Етап третій – етап активної зміни параметрів сховища. Починаючи з 1996 року і до сьогоднішнього моменту в сховищі триває збільшення активного газонасиченого порового об'єму, при цьому в активну роботу включаються ті частини сховища, які до того виконували функції створення підпору, тобто буферу.

### Висновки

Аналіз циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ за весь період експлуатації з 1978 по 2004 роки показав наявність трьох етапів формування газонасиченого об'єму сховища:

- 1) Етап нагнітання буферного газу 1978-1986 роки, протягом якого зведений пластовий тиск зріс до 119 кгс/см<sup>2</sup>, загальний об'єм газу в покладі збільшився до 3450 млн.м<sup>3</sup>.
- 2) Етап усталеної роботи сховища, який тривав у період з 1986 по 1996 роки.
- 3) Етап розширення активної газонасиченої частини ПСГ, що фіксувався з 1996 по 2002 роки. Протягом цього етапу відбулося розширення штучного, активно працюючого газового покладу приблизно на 8%.

Основним питанням аналізу процесу формування штучного газового покладу на третьому етапі циклічної роботи було пояснення процесу розширення ПСГ. На нашу думку факт збільшення порового об'єму пояснюється осушуванням покладу внаслідок випаровування зв'язаної води. Процес осушування покладу тривав наступними етапами:

- До моменту початку розробки на виснаження пластова система була в стані рівноваги і природний газу був повністю насичений вологою при пластових умовах.

- На кінець розробки на виснаження пластовий тиск знизився до  $34 \text{ кгс/см}^2$  за незмінної пластової температури, що на даних умовах, означало недонасиченість парами води природного газу. Система природний газ – пластова залишкова вода була виведена з рівноваги.
- У процесі нагнітання буферного газу за температури точки роси до  $-5^\circ\text{C}$  створилася умова фазового переходу вода–природний газ.
- Під час тривалої циклічної експлуатації сховища тривало випаровування зв'язаної води, тим самим, збільшуючи поровий об'єм сховища. Процес випаровування зв'язаної води супроводжується зміною фазової проникності по газу. Так, дані Богородчанського ПСГ підтверджують зменшення коефіцієнта фільтраційного опору свердловин  $a$  рівняння нелінійної фільтрації газу в покладі  $P_{пл}^2 - P_{виб}^2 = aQ + bQ^2$ . Відповідно до положень теорії розробки газових родовищ коефіцієнт фільтраційного опору  $a$  обернено пропорційний фазовій проникності по газу, отже зменшення (у 2-4 рази порівняно з початковими), свідчить про збільшення проникності в привибійній зоні свердловин. Враховуючи той факт, що на Богородчанському ПСГ 88% покладу охоплено свердловинами при середньому радіусі дренажу в 80-90 м можна вважати, що загалом фазова проникність по сховищу зросла.

УДК 622.691.24

## УТОЧНЕННЯ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ГРУПИ ГАЗОВИХ ПОКЛАДІВ ПСГ НА ОСНОВІ РОЗРОБКИ ДВОМІРНОЇ ГЕОЛОГО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПЛАСТОВИХ СИСТЕМ (МЕТОДИКА)

© *І.В. Войціцький*

*УкрНДІгаз; 144, Львівський відділ; вул. Стрийська, м. Львів, 79026.*

На основе создания геолого-математических моделей трех газовых залежей Опарского ПХГ, математических моделей движения газа в скважинах, коммуникациях сбора и подготовки газа, его компримирования на ДКС разработана программная система расчета показателей работы всего технологического комплекса. В результате ее использования проведено уточнение геологических и газогидродинамических параметров работы залежей, разработана технология эксплуатации ПХГ.

A program system for calculating operation indices of the technological complex has been developed on the basis of geological-mathematical models of three gas deposits of the Oparske underground gas storage facility (UGSF), mathematical models of gas flow in wells, gas gathering and gas processing pipelines, gas compression at boosting gas-compressor stations. As result geological and gas hydrodynamic deposit operation parameters have been refined and the UGSF operation technology has been devised.

Проведення контролю за процесом експлуатації підземного сховища газу, створеного у двох і більше газових покладах багатопластового родовища газу, вимагає постійного розв'язання наступних завдань:

- визначення параметрів і показників, які характеризують динаміку зміни у часі газогідродинамічних величин порового середовища об'єктів підземного зберігання газу;
- кількісної оцінки глибини і площинного розповсюдження депресійної-репресійної воронки в часі і впливу останньої на технологічні показники ПСГ;
- визначення впливу експлуатації свердловин одного покладу на дебіти свердловин іншого, а також взаємовпливу всіх свердловин діючого фонду ПСГ між собою.

Процес вивчення може ускладнюватися (Опарське ПСГ) недосконалістю існуючої системи збору газу. Наприклад, газ, який надходить із групи покладів, перемішується в колекторі ще до вимірювального пункту. Відповідно, виникає проблема визначення реальних об'ємів відбору-нагнітання газу по покладах. А якщо врахувати ще й вплив водонапірної системи кожного горизонту на показники експлуатації покладу, то розв'язання вищезазначених завдань є надзвичайно складним.

Пропонуємо наступний підхід для проведення аналізу і прогнозування показників роботи групи газових покладів газосховища.