

622.691.24

С 90

Івано-Франківський національний  
технічний університет нафти і газу

СУСАК ОЛЕКСАНДР МИХАЙЛОВИЧ



УДК 622.691.24

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ  
ГАЗОНАСИЧЕНОГО ПОРОВОГО ОБ'ЄМУ  
СХОВИЩ З ГАЗОВИМ РЕЖИМОМ РОБОТИ**

Спеціальність 05.15.13– Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**м. Івано-Франківськ-2007**

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:**

доктор технічних наук, професор

**Гімер Роман Федорович**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри нафтогазової гідромеханіки  
м. Івано-Франківськ



**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **Капцов Іван Іванович**, Український науково-дослідний інститут природних газів (УКРНДІГАЗ), завідувач відділом транспортування газу, м. Харків.

кандидат технічних наук **Костів Василь Васильович**, Богородчанське виробниче управління підземного зберігання газу, УМГ "Прикарпаттрансгаз", ДК "Укртрансгаз", НАК "Нафтогаз України", головний інженер, м.Богородчани, Івано-Франківської області.

Захист відбудеться 02 листопада 2007 року о 14 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, м. Івано-Франківськ, вул. Східна, 44.

76019, Україна

З дисертації

Франківської

Україна, м. Івано-Франківськ

Автореферат

Вчений секретар

вченої ради Д 20.052.04

канд.техн.наук

бібліотеці Івано-Франківського

адресою: 76019,



## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Підземні сховища газу з газовим режимом роботи складають понад 50 відсотків від загальної кількості ПСГ в Україні. Станом на сьогоднішній день значна кількість газу зберігається в таких сховищах, крім того сховища з газовим режимом роботи відіграють вирішальну роль у забезпеченні надійності транзиту газу споживачам Західної Європи. Режими роботи ПСГ характеризуються значними змінами в часі в залежності від потреб споживачів, що ускладнює надійну та ефективну роботу сховищ.

У процесі циклічної експлуатації ряду сховищ України було виявлено збільшення газонасиченого порового об'єму сховищ, що супроводжувалося падінням максимального пластового тиску в сховищі. Аналіз гідрогазодинамічних показників сховищ доводив, що в цілому всі об'єкти залишалися герметичними.

Наукові дослідження особливостей роботи ПСГ з газовим режимом їх розробки, що спрямовані на вивчення особливостей формування активного газонасиченого порового об'єму, вивчення впливу застійних зон сховища є актуальними проблемами підвищення надійності постачання газу та покращання ефективності використання існуючих систем зберігання газу шляхом економії енергоресурсів.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота носить науково-прикладний характер та входить до комплексу розробок в рамках програми "Нафта і газ України до 2010 року". Робота базується на результатах госпдоговірних тем "Технологічний проект заміни азотом частки буферного об'єму газу Дашавського ПСГ", договір №5/2001, № Держ.реєстрації 0103U004315 та "Виконання газодинамічних розрахунків аналізу формування та експлуатації ПСГ Дашава, Богородчани та Пролетарське" договір №7/2003 від 01.04.2003.

### **Мета і задачі дослідження.**

Метою роботи є обґрунтування збільшення обсягів активного газу в ПСГ, що експлуатуються в умовах газового режиму роботи покладу за рахунок осушення порового простору і зменшення обсягів застійних зон сховища в умовах циклічної експлуатації ПСГ.

Поставлена мета реалізується через вирішення таких задач:

- аналітичні дослідження зміни водонасиченості порового простору під час циклів нагнітання – відбір;
- експериментальні дослідження зміни водонасиченості пористого середовища в процесі моделювання циклів нагнітання – відбір;
- математичне моделювання процесу витіснення залишкової води з продуктивного горизонту Дашавського ПСГ з встановленням закономірностей процесу осушення покладу;
- статистичні дослідження формування активного газонасиченого порового об'єму Дашавського ПСГ шляхом побудови годографів циклічної експлуатації;
- оцінка впливу застійних зон на ємність та характер експлуатації ПСГ.

**Об'єкт дослідження** – ПСГ України, що створені на базі виснажених газових родовищ із газовим режимом експлуатації.

**Предметом дослідження** є газогідродинамічні процеси формування газонасиченого об'єму ПСГ в умовах газового режиму роботи покладу.

**Методи дослідження:** математичне моделювання процесу осушення пористого середовища сховищ у процесі циклічної експлуатації ПСГ, експериментальні дослідження процесів осушення пористого середовища, статистичні дослідження формування активного газонасиченого порового простору ПСГ та вивчення впливу об'єму застійних зон сховища.

**Положення, що виносяться на захист.** Закономірності ступеня осушення покладів підземних сховищ газу, що працюють з газовим режимом роботи, від параметрів роботи продуктивного горизонту.

**Наукова новизна** проведених досліджень полягає в наступному:

1. Розроблена математична модель процесу осушення порового простору ПСГ в процесі циклічної експлуатації, що дозволило встановити закономірності зміни водонасиченості порового простору та зміни загального порового об'єму сховищ.
2. На основі експериментальних досліджень встановлено закономірність зміни залишкової водонасиченості від параметрів пористого середовища та режимів роботи покладів.
3. На основі статистичного аналізу сховищ методом побудови годографів циклічної експлуатації встановлено, що стабілізація порового простору сховища з газовим режимом роботи відбувається після 5-8 років циклічної експлуатації.
4. Доведено, що за рахунок осушення порового простору для умов підземних сховищ газу України можливе збільшення активного газонасиченого порового об'єму ПСГ на 6–8 %.

**Практичне значення отриманих результатів.** Теоретичні та експериментальні дослідження процесів формування газонасиченого порового об'єму сховищ дозволили розробити методи розрахунку змін порового об'єму сховищ, що дало змогу обґрунтувати зменшення максимальних тисків у сховищах із газовим режимом роботи. За результатами їх реалізації розроблено методику розрахунку параметрів сховища на підставі даних аналізу циклічної експлуатації ПСГ. Розроблена методика впроваджена на об'єктах УМГ “Львівтрансгаз”.

**Особистий внесок дисертанта.** Автором самостійно вперше:

1. На основі експериментальних досліджень встановлено закономірність зміни залишкової водонасиченості від параметрів пористого середовища та режимів роботи покладів. [1], [2]
2. Шляхом побудови годографів циклічної експлуатації методами математичної статистики встановлено, що стабілізація порового простору сховища з газовим режимом роботи відбувається після 5-8 років циклічної експлуатації. [4], [5], [7], [9].

3. Розроблена математична модель процесу осушення порового простору ПСГ в процесі циклічної експлуатації, що дозволило встановити закономірності зміни водонасиченості порового простору та зміни загального порового об'єму сховищ. [8], [3].
4. Доведено, що за рахунок осушення порового простору для умов підземних сховищ газу України можливе збільшення активного газонасиченого порового об'єму ПСГ на 6–8 %. [6], [10].

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідалися на : 6-й Міжнародній науково-практичній конференції “Нафта і газ України – 2000” (Івано-Франківськ, 31.10.-03.11.2000 р.); міжнародній науково-практичній конференції “Геопетроль – 2002” (Закопане, Польща, 25.09+28.09 2002 р.); міжнародній конференції “ВНИИГАЗ на рубеже веков – наука о газе и газовые технологии” (Москва, жовтень, 2003 р.); міжнародній конференції “Сорок років підземного зберігання газу в Україні” (м. Яремче, 2-4 червня 2004 р.).

У повному обсязі результати досліджень доповідалися на засіданні кафедри нафтогазової гідромеханіки ІФНТУНГ та науково-технічному семінарі факультету нафтогазопроводів.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано десять друківаних праць, з них три у фахових виданнях України.

**Структура і об'єм дисертації.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів підсумкових висновків та переліку використаних джерел, що містить 120 найменувань. Основний зміст викладений на 141 сторінці машинописного тексту і містить 46 рисунків, 26 таблиць і три додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтована актуальність роботи показаний її зв'язок із науковими програмами, темами, висвітлені мета і задачі наукових досліджень, наукова новизна та практичне значення отриманих результатів. Представлена інформація про апробацію та впровадження результатів роботи, розкритий особистий внесок автора у вирішення поставлених задач, вказана кількість наукових публікацій.

У **першому розділі** роботи представлено аналіз загальних тенденцій розвитку системи підземного зберігання газу в світі та в Україні. Наведена структура системи підземного зберігання газу Західної Європи, США та країн СНД, проведено аналіз системи підземного зберігання газу України, висвітлені питання створення комплексів ПСГ в Україні, проблеми та перспективи розвитку системи підземного зберігання газу в Україні. Наведено коротку характеристику та аналіз розробки на виснаження Дашавського газового родовища, на базі якого сформовано Дашавське ПСГ. Показано, що режим розробки на виснаження Дашавського родовища – газовий, проявів водонапірного режиму не спостерігалось навіть на завершальній стадії розробки на виснаження. У розділі наведено аналіз літературних джерел, присвячених аналізу циклічної експлуатації підземних сховищ газу. Основний вклад у розвиток методу аналізу роботи

ПСГ шляхом побудови годографів циклічної експлуатації сховищ внесли: Каґачинський В.Е., Баранов А.В., Лур'є М.В., Гімер Р.Ф., Войціцький В.П., Войціцький І.В. На сьогоднішній день метод побудови годографа широко використовується спеціалістами ДК “Укртрансгаз” для аналізу роботи системи ПСГ України. Так, Марчуком Я.С., Андрійшином М.П., Деркачом М.П., Савулою С.Ф., Юрченком В.П. та іншими було проведено детальний аналіз Опарського, Богородчанського, Краснопоповського, Червонопартизанського, Більче-Волиля-Угерського ПСГ. Використовуючи вже існуючий метод аналізу ПСГ, було встановлено, що тепер Дашавське ПСГ працює в режимі усталеної циклічної експлуатації. Вивчення питання формування сховищ газу у виснажених газових родовищах із газовим режимом роботи показало, що на стадії проектування та експлуатації сховищ не була врахована така характеристика пористого середовища як наявність залишкової води. Питання вмісту залишкової води у газових покладах вивчали: Сухарев Г.М., Карцев А.А., Злочевська Р.І. та інші. Ними встановлено, що поклади газових родовищ містять до 30 % залишкової (зв’язаної) нерухокої води.

Вплив залишкової води на режими фільтрації газу досліджував Дж.Амикс, П.Джонс. Окремо питання впливу залишкової водонасиченості на режими фільтрації газу в покладах вивчали Щелкачев В.Н., Кристеа Н., Закіров С.Н та інші. Ними виведені спільні якісні характеристики кривих фазових проникностей за наявності в покладах залишкової води, а саме:

- наближення фазової проникності рідини до нуля при насиченості рідиною, значно більшою від нуля;
- стрімке збільшення проникності по газу з одночасним зменшенням насиченості рідиною;
- досягнення відносної проникності газу 100 % перед тим, коли насиченість рідиною стане рівною нулю.

З метою визначення залишкової водонасиченості Ширковським А.І. запропоновано емпіричні математичні моделі:

Відповідно до положень підземної гідравліки та гідрогеології нафтових та газових покладів можна стверджувати про наявність значної кількості залишкової води у покладах колишніх газових родовищ, навіть тоді, коли родовище не мало явно вираженого руху пластових вод. На етапі проектування, та подальшої експлуатації ПСГ не був урахований вплив залишкової води, не були прогнозовані зміни в пористому середовищі під час циклічної експлуатації сховища за рахунок зміни водонасиченості. Очевидно, що слід провести наукові дослідження, які дали б змогу оцінити зміни в поровому просторі сховища за рахунок часткового осушення покладів від залишкової води, роздренування застійних зон сховища.

У другому розділі розроблено математичну модель зміни залишкової водонасиченості пористого середовища в процесі циклічної експлуатації ПСГ на базі основних положень підземної гідромеханіки. Запропонована математична модель дозволила встановити закономірності процесу осушення пористого середовища. Вихідними залежностями для розробки математичної моделі осушення пористого середовища були

залежність для визначення вологовмісту природного газу в стані повного насичення (формула Бюкачека), закон збереження маси та рівняння нерозривності потоку газу. Розв'язуючи спільно ці залежності за умови ізотермічної фільтрації газу в пористому середовищі для випадку плоскорадіальної фільтрації реального газу, було отримано такі математичні моделі:

- зміна водонасиченості на контурі живлення в процесі відбору газу визначається за такою залежністю:

$$S_{кин} = S_{ноч} - \frac{A' \cdot \mu_{ср} \cdot \Omega_0 \cdot T_0^2 \cdot Q}{k_0 \cdot F^2 m_0 \cdot T^2 \cdot (P_{ноч}^2 - P_{кин}^2)} \cdot \left( \frac{P_{кин}}{\sqrt{2 \cdot P_{кин}^2 - P_{ноч}^2}} - \frac{P_{ноч}}{P_{кин}} \right) - \frac{A' \cdot T_0}{T \cdot z_{ср} \cdot P_0 \cdot f} \cdot \ln \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кин}} \right); \quad (1)$$

- зміну водонасиченості на контурі живлення в процесі нагнітання газу можливо визначити за такою формулою:

$$S_{кин} = S_{ноч} + \frac{A' \cdot \mu_{ср} \cdot \Omega_0 \cdot T_0^2 \cdot Q}{k_0 \cdot F^2 m_0 \cdot T^2 \cdot (P_{кин}^2 - P_{ноч}^2)} \cdot \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кин}} - \frac{P_{кин}}{\sqrt{2 \cdot P_{кин}^2 - P_{ноч}^2}} \right) + \frac{A' \cdot T_0}{T \cdot z_{ср} \cdot P_0 \cdot f} \cdot \ln \left( \frac{P_{ноч}}{P_{кин}} \right), \quad (2)$$

де  $S_{ноч}$  – початкова водонасиченість покладу;  $S_{кин}$  – кінцева водонасиченість покладу;  $k_0$  – початкова фазова проникність по газу, м<sup>2</sup>;  $\mu_{ср}$  – середня динамічна в'язкість газу, Па·с;  $T$  – пластова температура, К;  $P_{ноч}$  – початковий середньозважений по об'єму пластовий тиск в ПСГ, Па;  $P_{кин}$  – кінцевий середньозважений пластовий тиск в ПСГ, Па;  $T_0$  – стандартна температура, К;  $m_0$  – відкрита пористість покладу, %;  $z_{ср}$  – коефіцієнт стисливості за середніх умов (середнього тиску та пластової температури);  $F$  – площа фільтрації, м<sup>2</sup>;  $\Omega_0$  – початковий газонасичений поровий об'єм, м<sup>3</sup>;  $f$  – коефіцієнт, що враховує збільшення об'єму газової фази внаслідок вмісту в природному газі водяних парів (за умов ПСГ  $f = 1,01$ );  $Q$  – загальний об'єм нагнітання (відбору) газу при зміні тиску від  $P_{ноч}$  до  $P_{кин}$ ;  $A'$  – коефіцієнт із залежності Бюкачека для визначення вологовмісту природного газу в стані повного насичення в залежності від температури;  $P_0$  – атмосферний тиск за стандартних умов, Па.

Розроблені математичні моделі дозволили встановити закономірності осушення пористого середовища на прикладі покладів Дашавського ПСГ. Розрахунок проводився по зонах фільтрації (активна зона, перехідна та застійна зони). Як вихідні дані використовуються дані циклічної експлуатації Дашавського ПСГ за період від його створення до сезону 2002 року. Результати розрахунку зміни порового об'єму активної зони Дашавського ПСГ представлені у вигляді графіків на рис.1.

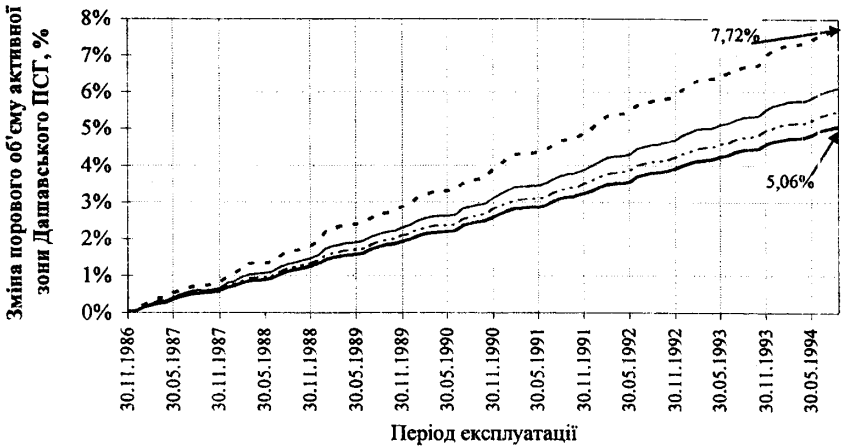


Рис. 1 Відносна зміна порового об'єму активної зони Дашавського ПСГ

--- k=225 — k=450 - · - · - k=750 — k=1335

На рис. 2 представлена закономірність відносної зміни порового об'єму перехідної зони Дашавського ПСГ.

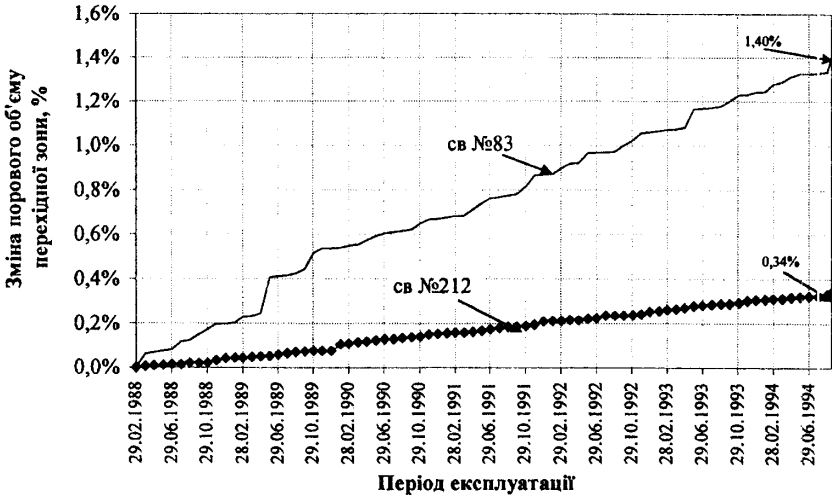


Рис. 2 Відносна зміна порового об'єму перехідної зони Дашавського ПСГ



На рис. 3 представлена закономірність відносної зміни порового об'єму застійної зони Дашавського ПСГ, в якості вихідних даних приймалися значення пластових тисків в зоні єдиної спостережної свердловини №165.

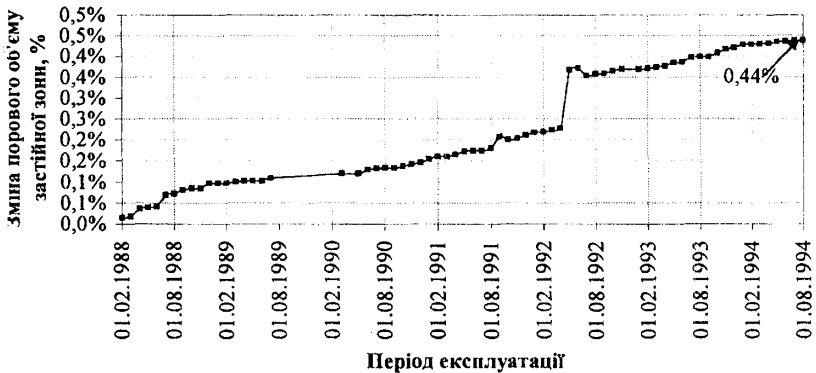


Рис. 3 Відносна зміна порового об'єму застійної зони Дашавського ПСГ

Результати аналітичного розрахунку процесу осушення порового простору сховища від залишкової 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 відчувають вплив ефекту осушення поклада хоч і в значно меншій степені. Так, поровий простір перехідної зони збільшується всього на 1 %, а поровий простір застійної зони на 0,44 %, тобто таким збільшенням можна знехтувати.

У третьому розділі роботи представлено результати експериментальних досліджень процесу осушення пористого середовища на дослідному стенді (рис.4).

В якості моделі продуктивного горизонту було використано kern продуктивних горизонтів реальних газових родовищ. Циліндрична частина керн діаметром 36 мм і довжиною 190 - 220 мм розміщувалась у корпусі, що являв собою трубу діаметром 42x3 мм і довжиною 250 мм з нарізаною внутрішньою трубною різьбою Ц 20. Наявність різьби і муфт дозволили надійно фіксувати взірцеві керн в трубі і запобігти його пересуванню під дією різниці тисків газу і води. Природний газ подавався з балонів у камери, тиск в яких вимірювався манометрами, а перепад тиску – ртутним дифманометром. Для регулювання тиску в камерах використовувались редуктори. Заповнення взірця водою проводилося з допомогою відцентрового насоса. Для вимірювання витрати газу використовувався газовий лічильник типу РД-5 і секундомір. Для вимірювання тисків у камерах газу і води були використані взірцеві манометри МТИ-П-5 з класом точності 0,5 і границями вимірювань від 0 до 6 бар. Ртутний дифманометр ДМР-100 дозволяє вимірювати перепад тисків до 0,2 бар з похибкою, що не перевищує 65 Па. Для досліджен-

ня впливу температури на процес осушення порового простору корпус з пористим середовищем розміщувався в ємності з водою, температура якої підтримувалася терморегулятором. Температура вимірялася термометром з точністю виміру до  $0,5^\circ$ . Для визначення маси взірця в дослідній установці використовувалася лабораторна вага з точністю виміру  $0,1$  г.

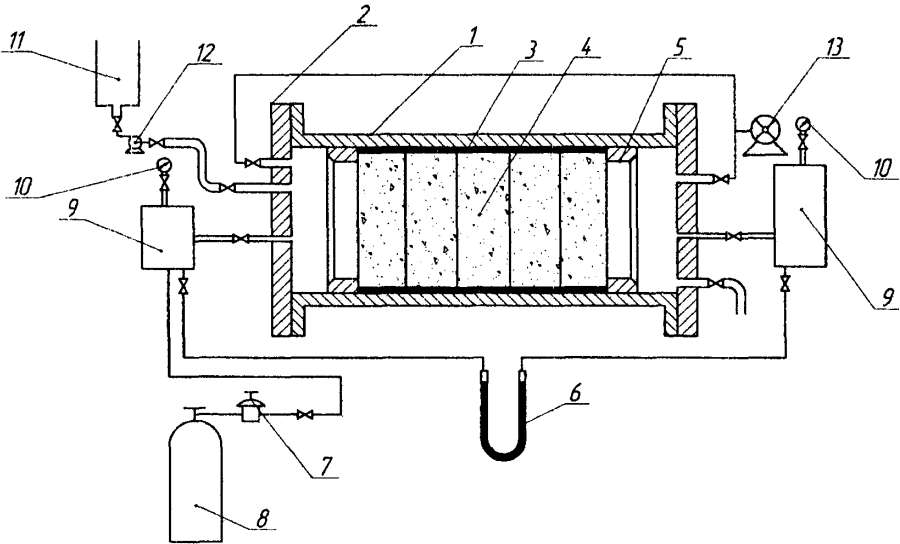


Рис. 4 - Схема експериментальної установки з дослідження процесу осушення пористого середовища

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

Метою проведення експериментів є визначення величини осушення порового простору 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 кернавого матеріалу реальних газових родовищ України.

Проведення експериментів з встановлення закономірностей осушення порового простору включали в себе такі етапи:

- визначення параметрів взірця до початку експерименту, тобто в сухому стані;
- насичення взірця водою до стану 100% насичення;
- продування взірця природним газом з різними темпами з метою витіснення вільної гравітаційної води з взірця, з визначенням одночасно фазової проникності взірця;

- моделювання циклічної роботи сховища з визначенням маси взірця після кожного циклу.

Результати визначення параметрів взірців у початковому стані та визначення залишкової водонасиченості взірців представлено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати визначення параметрів взірців у початковому стані.

№ взірця	Маса сухо-го взірця, г	Маса взірця при 100% насиченні, г	Маса взірця після циклу експериментів, 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

Метою четвертого етапу експериментів було моделювання циклічної експлуатації порового простору шляхом періодичного нагнітання та відбору певної кількості природного газу. Мета досягалася таким чином. У камеру 1 із встановленим взірцем ядерного матеріалу нагнітався природний газ до певного тиску. Тиск нагнітання фіксувався манометрами на камерах 9, температура – за допомогою термометра. При досягненні певного тиску подача газу припинялася, вентиля на балоні 8 перекривалися. Протягом двох годин підтримувалося постійне значення тиску та температури. Надалі тиск газу зменшувався шляхом випускання в атмосферу до мінімального рівня, після чого знову проводилось витримання в часі протягом двох годин. Таким чином було змодельовано режим циклічної експлуатації ПСГ.

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. Проведено цикл експериментів, при якому 8–10 разів моделювався процес циклічної експлуатації ПСГ. Після кожного з циклів взірць 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 вона відрізняється від маси сухого екстрагованого взірця на початку експерименту.

За результатами експериментів було розроблено емпіричну залежність для визначення максимальної зміни водонасиченості пористого середовища від проникності пласта-колектора та параметрів роботи пласта такого вигляду:

$$\alpha = 0,64675 \cdot P^{-0,1877} \cdot k^{0,0731} \cdot T^{0,5807} \quad (3)$$

У залежності (3) тиск  $P$  слід підставляти в МПа, температуру  $T$  в К, проникність  $k$  в мДс. Середньоквадратична похибка складас 0,0652, а коефіцієнт варіації – 0,0195 (1,95%).

Експериментальні дослідження осушення пористого середовища потоком газу дозволили встановити закономірності перерозподілу вологи в залежності від параметр-

рів режиму і отримати емпіричну залежність для визначення водонасиченості, використання якої підтверджує основні теоретичні положення і дозволяє оцінити стан продуктивного горизонту ПСГ в період циклів “нагнітання-відбір”.

Аналітичні дослідження процесу осушення газом порового простору від залишкової води, проведені для умов Дашавського ПСГ, дозволили встановити, що процес осушення активної зони продуктивного горизонту відбувається протягом перших 6-8 років циклічної експлуатації сховища. Процес осушення порового простору також має вплив на застійні зони сховища, хоча в значно меншій мірі.

У четвертому розділі роботи проведено аналіз статистичних показників роботи Дашавського ПСГ шляхом побудови стандартних годографів.

На основі аналізу статистичних даних експлуатації Дашавського ПСГ встановлено, що у сховищах, які працюють у газовому режимі, характерні три етапи формування газонасиченого порового об'єму: етап нагнітання буферного газу сховища, етап формування активного газонасиченого порового об'єму сховища, етап роботи сховища в установленому режимі експлуатації. Кожен з етапів має певні характерні риси.

Етап нагнітання буферного газу в сховище характеризується значними об'ємами нагнітання газу та відповідно малими об'ємами відбору газу, при цьому можна спостерігати значне зростання пластового тиску газу (рис. 5). Криві годографа при цьому мають тенденцію до руху праворуч та вгору.

Із жовтня 1975 року по травень 1976 року протягом першого циклу відбору газу лінія відбору газу була практично паралельна лінії нагнітання, що свідчило про роботу одного і того ж газонасиченого об'єму покладу. Більш активна експлуатація сховища розпочалася у 1981 році. Пластовий тиск у кінці періоду нагнітання 1981 року виріс до 4,77 МПа, а в кінці періоду відбору 1982 року знизився до 1,42 МПа. Відбір газу на 1 МПа падіння тиску в період 1981-1982 роки складав 90,3 млн.м<sup>3</sup>/МПа, при нагнітанні газу на 1 МПа підняття тиску в 96,5 млн.м<sup>3</sup>/МПа, тобто фактично спостерігалось зменшення приведенного об'єму відбору в порівнянні з циклом нагнітання за рахунок розтікання газу в покладі сховища. У наступний рік циклічної експлуатації сховища максимальний пластовий тиск збільшився до 6 МПа, однак, при цьому збільшився загальний об'єм газу в покладі до 757 млн.м<sup>3</sup>. Тенденція до змін спостерігалася і стосовно завершення періоду відбору газу. Так, у квітні 1984 року при загальному об'ємі газу в покладі в 308,7 млн.м<sup>3</sup> пластовий тиск складав 1,67 МПа, через цикл нагнітання-відбір (квітень 1985 року) після завершення відбору газу загальний об'єм у покладі виріс до 341,5 млн.м<sup>3</sup>, а мінімальний пластовий тиск знизився до 1,63 МПа.

Цей етап фактично завершується першим повним циклом “нагнітання – відбір”, при цьому об'єм відібраного за сезон газу приблизно є рівним об'єму газу, який нагнітався протягом сезону.

Другий етап – етап формування активного газонасиченого об'єму сховища характеризується такими ознаками: об'єм нагнітання-відбору газу практично однаковий, максимальний та мінімальний пластові тиски на початку етапу формування сховища дорівнюють проектним (рис.6).

Протягом цього етапу відбувається зменшення максимального пластового тиску газу при збереженні цілісності ПСГ за рахунок осушення порового простору сховища, при цьому відбувається заповнення газом застійних зон сховища. Активний газонасичений поровий об'єм сховища зростає, при цьому криві годографа мають тенденцію до руху вниз та праворуч.

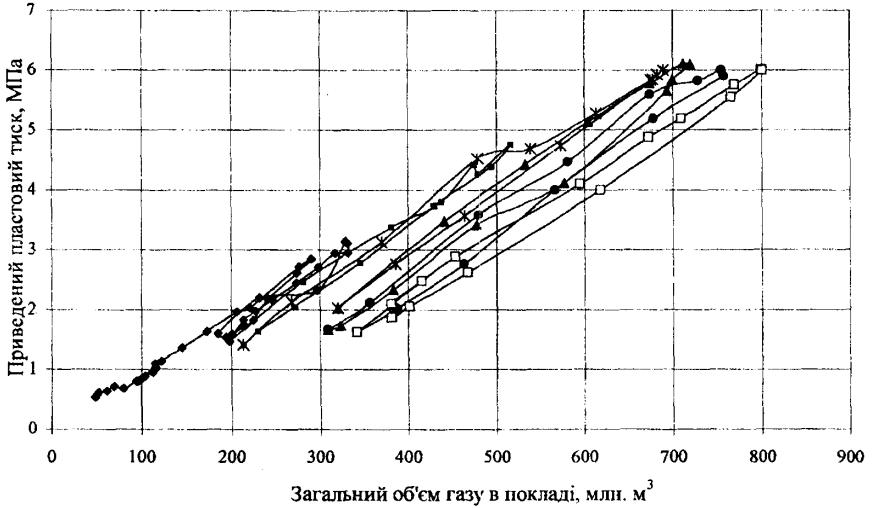


Рис. 5 Годограф циклічної експлуатації покладу "Г"  
Дашавського ПСГ за період 1973-1986 роки

◆— 1973-1981      ■— 1981-1982      \*— 1982-1983  
▲— 1983-1984      ●— 1984-1985      □— 1985-1986

Етап роботи сховища в усталеному режимі характеризується стабільними в часі параметрами роботи сховища, незмінними максимальними та мінімальними тисками в сховищі. Криві годографа повністю накладаються одна на одну.

Побудова стандартних годографів проводиться в координатах  $P_{зв} = f(V_{см})$ , де  $P_{зв}$  — зведений середньозважений пластовий тиск,  $V_{см}$  — загальний об'єм газу в покладі за стандартних умов. У процесі аналізу циклічної експлуатації методом годографа запропоновано рівняння стандартного годографа в такому вигляді:

$$P_{зв} = \frac{1}{\alpha} \cdot V_{заг} - \frac{\beta}{\alpha}. \quad (4)$$

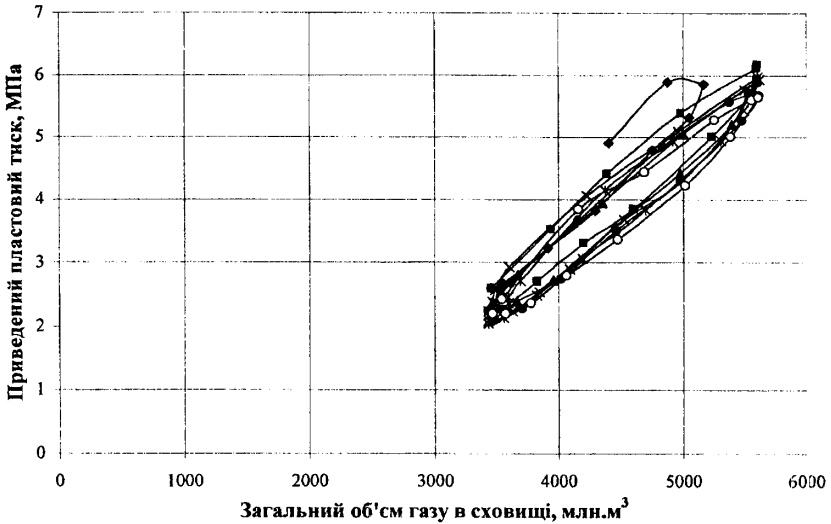


Рис. 6 Годограф циклічної експлуатації Дашавського ПСГ за період формування газонасиченого порового об'єму

◆ 86-87    ■ 87-88    ▲ 88-89    ✕ 89-90    \* 90-91    ● 91-92    ○ 92-93

Із математичної точки зору рівняння (4) є рівнянням прямої лінії виду  $y = k \cdot x + b$ .

Коефіцієнт  $\frac{1}{\alpha}$  обернено пропорційний газонасиченому поровому об'єму, який приймає участь у циклічній експлуатації сховища. Другий доданок рівняння (4) за своєю суттю характеризує об'єм газу в застійних зонах ( $V_3$ ). Так при  $P_{3\alpha} = 0$  з рівняння (4) видно, що  $V_{3\alpha} = \beta$  або  $V_{3\alpha} = V_3$ .

У роботі було проведено розрахунок активного газонасиченого порового об'єму сховища та об'єму газу в застійних зонах відносно періодів нагнітання та відбору газу. Результати розрахунку активного газонасиченого порового об'єму за періоди відбору газу представлені на рис. 7. Результати визначення об'єму газу в застійних зонах за періоди відбору газу представлені на рис.8. Встановлено, що починаючи з циклу 1996-1997 років, об'єм газу в застійних зонах для періоду відбору газу стабілізувався і становить  $\approx 2350$  млн.м<sup>3</sup> природного газу.

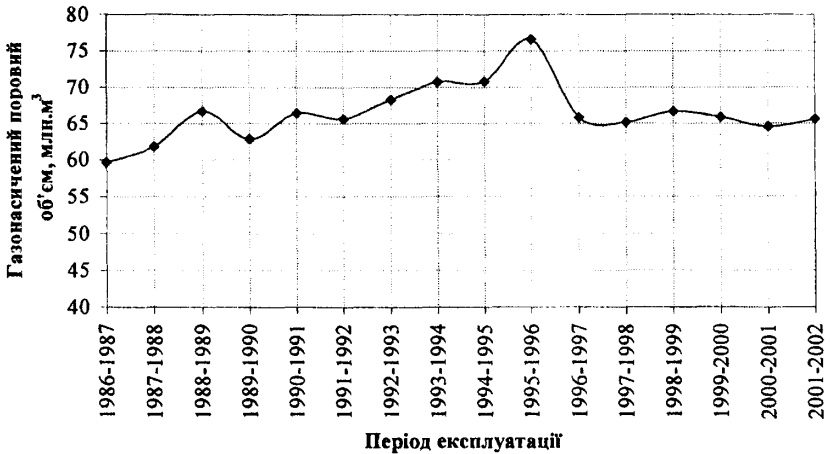


Рис. 7 - Динаміка зміни активного газонасиченого порового об'єму Дашавського ПСГ для циклу відбору газу

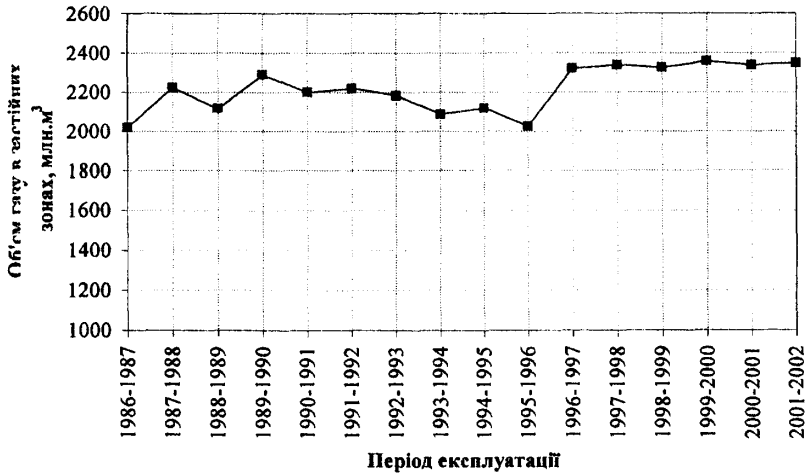


Рис. 8 - Динаміка зміни об'єму газу в застійних зонах для циклів відбору газу

## ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливу наукову задачу, яка полягає у встановленні закономірностей формування газонасиченого порового об'єму сховищ із газовим режимом роботи, осушення порового простору ПСГ в процесі циклічної експлуатації, визначення активного газонасиченого порового об'єму, об'єму газу в застійних зонах сховищ і дозволяє встановити етапи формування сховищ, наявність усталеного режиму, обґрунтувати збільшення обсягів активного газу в сховищах з газовим режимом роботи, а саме:

1. На основі закономірностей фільтрації газу в пористому середовищі створено і реалізовано математичну модель осушення продуктивного горизонту сховища, що дозволило прогнозувати збільшення газонасиченого порового простору в період циклів "нагнітання-відбір". Розрахунки, підтверджені фактичними даними в умовах експлуатації Дашавського ПСГ, показують, що в залежності від умов збільшення порового простору за рахунок осушення може бути досягнуто в межах 5-8%

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

3. Аналітичні дослідження процесу осушення газом порового простору від залишкової води проведені для умов Дашавського ПСГ, дозволили встановити, що процес осушення активної зони продуктивного горизонту відбувається протягом перших 6-8 років циклічної експлуатації сховища. Процес осушення порового простору також має вплив на застійні зони сховища, хоча в значно меншій мірі.

4. На основі аналізу статистичних даних експлуатації Дашавського ПСГ встановлено, що у сховищах, які працюють у газовому режимі, характерні три етапи формування газонасиченого порового об'єму: етап нагнітання буферного газу сховища, етап формування активного газонасиченого порового об'єму сховища, етап роботи сховища в усталеному режимі експлуатації. Етап нагнітання буферного газу в сховище характеризується значними об'ємами нагнітання газу та відповідно малими об'ємами відбору газу, при цьому можна спостерігати значне зростання пластового тиску газу. При цьому починається заповнення газом застійних зон сховища, без збільшення активного газонасиченого порового об'єму сховища. Етап формування активного газонасиченого об'єму сховища характеризується такими ознаками: об'єм нагнітання-відбору газу практично однаковий, максимальний та мінімальний пластові тиски, на початку етапу формування сховища, дорівнюють проектним. Протягом цього етапу відбувається зменшення максимального пластового тиску газу при збереженні цілісності ПСГ, за рахунок осушення порового простору сховища. Етап роботи сховища в усталеному режимі характеризується стабільними в часі параметрами роботи сховища, незмінними максимальними та мінімальними тисками в сховищі.



5. Розроблена методика розрахунку параметрів сховища на підставі даних аналізу циклічної експлуатації ПСГ дозволяє визначити величину активного газонасиченого порового об'єму сховищ, об'єму газу в застійних зонах. Застосування методики для умов Дашавського ПСГ дозволило встановити, що тепер сховище працює в установленому режимі, визначити активний газонасичений поровий об'єм сховища, оцінити величину об'єму газу в застійних зонах Дашавського ПСГ, яка складає  $\approx 53\%$ . У результаті застосування даної методики було доведено герметичність ПСГ, відсутність втрат газу, відсутність перетікань газу в застійні зони. Встановлено, що за рахунок осушення поровий об'єм активної зони Дашавського ПСГ збільшився на 6-8%, і відповідно можливо збільшити обсяги зберігання природного газу на 189,5 млн.м<sup>3</sup> в рік.

### Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано у таких працях:

1. Заяц В.В., Гебура М.Д., Гімер П.Р., Сусак О.М. Аналіз циклічної експлуатації Богородчанського ПСГ. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – №2(8).– Івано-Франківськ, Факел. – 2004. - С. 66-73.

2. Сусак О.М. Експериментальні дослідження процесу осушення пористого середовища. // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – №1(22).–Івано-Франківськ, Факел. - 2007. – С.91-94.

3. Сусак О.М. Розрахунок збільшення газонасиченого порового об'єму ПСГ за рахунок осушення покладів. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – №1(13).– Івано-Франківськ, Факел. – 2007. - С. 98-101.

4. Гімер Р.Ф., Гімер П.Р., Деркач М.П., Савків Б.П., Сусак О.М. Заміна азотом частини буферного газу Дашавського ПСГ. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – №2(8).– Івано-Франківськ, Факел. - 2004. - С. 42-44.

5. Галій П.П., Семчишин О.О., Сусак О.М., Пилипів Я.О., Штинда М.В. Аналіз ефективності заміни фонтанних труб свердловин Дашавського ПСГ. // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – №2(8).– Івано-Франківськ, Факел. - 2004. - С. 181-185.

6. Галій П.П., Гімер П.Р., Сусак О.М. Аналіз формування газонасиченого об'єму Дашавського підземного сховища газу (ПСГ). УНГА. Нафта і газ України -2000. Збірник наукових праць. // Матеріали 6-ої міжнародної науково-практичної конференції "Нафта і газ України-2000". Івано-Франківськ, 31 жовтня – 03 листопада 2000 р. у 3-томах. Івано-Франківськ, Факел. - 2000. - том 3.- С. 99-100.

7. Сусак О.М. Визначення приведеного пластового тиску при нагнітанні азоту в пласт. УНГА. Нафта газ України -2000. Збірник наукових праць. // Матеріали 6-ої міжнародної науково-практичної конференції "Нафта і газ України-2000". Івано-

Франківськ, 31 жовтня – 03 листопада 2000 р. у 3-томах. Івано-Франківськ, Факел. – 2000. - том 3.- С. 93-94.

8. Гимер П., Галий П., Сусак А. Эффект осушки пласта при циклической эксплуатации газохранилищ. // 13th International Scientific-Technical conference “New methods and technologies in petroleum geology, drilling and reservoir engineering” Cracow, 20-21 June 2002. - vol.1. Cracow.- 2002. - С. 113-118.

9. Гимер П., Сусак А., Печорин О. Использование нейтральных газов при эксплуатации истощенных газовых месторождений // Wydział konferencyjne. Problemy naukowo-badawcze i irozwojowe pozukiwan i eksploatacji zloz gazu ziemnego i ropy naftowej. – Krakow. - 2000.-С. 761-764

10. Чередниченко Д., Савкив Б.П., Деркач М.П., Гимер Р.Ф., Гимер П.Р., Сусак О.М. Проект замены азотом части буферного объёма газа Дашавского ПХГ. // Тезисы докладов на международной конференции “ВНИИГАЗ на рубеже веков – наука о газе газовые технологии”. Октябрь 2003. Москва, ВНИИГАЗ. - 2003. - С. 18-19.

## АНОТАЦІЯ

Сусак О.М. Закономірності формування газонасиченого порового об'єму сховищ з газовим режимом роботи. –Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2007.

Дисертація присвячена питанням раціональної експлуатації підземних сховищ газу України шляхом обґрунтування збільшення активного об'єму ПСГ, що працюють у газовому режимі роботи, за рахунок осушення порового простору. Обґрунтована закономірність осушення порового простору ПСГ, розроблена математична модель осушення порового простору сховища, проведена апробація отриманої залежності на прикладі покладів Дашавського ПСГ.

На базі експериментальних досліджень процесу осушення порового простору розроблено емпіричну залежність максимальної зміни залишкової водонасиченості від параметрів пористого середовища та від режимів роботи ПСГ, що дозволило для умов ПСГ України, що працюють у газовому режимі роботи, визначити зміну залишкової водонасиченості покладів та як наслідок зміну газонасиченого порового об'єму сховищ.

Проведено статистичний аналіз показників роботи Дашавського ПСГ шляхом побудови годографів циклічної експлуатації ПСГ. Удосконалення методики використання годографів циклічної експлуатації дозволило розробити методику визначення параметрів сховища на основі статистичних показників роботи ПСГ, що дало змогу визначити газонасичений поровий об'єм ПСГ, об'єм газу в застійних зонах сховища та встановити етапи формування газонасиченого порового об'єму сховищ із газовим режимом їх роботи.

Ключові слова: підземне сховище газу, газовий режим роботи, циклічна експлуатація, годограф циклічної експлуатації, поровий простір, осушення порового простору.

## АННОТАЦІЯ

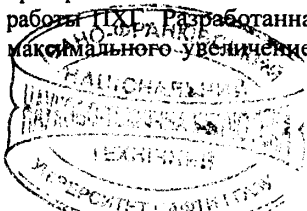
Сусак А.М. Закономерности формирования газонасыщенного порового объема хранилищ с газовым режимом работы. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти газа. Ивано-Франковск, 2007.

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка использованных источников и приложений.

В первом разделе проведен анализ общих тенденций развития системы подземного хранения газа в Европе и США, проведен анализ текущего состояния системы подземного хранения газа в Украине описаны основные проблемы и пути их решения. Проведен анализ разработки на истощение Дашавского газового месторождения, на базе которого создано Дашавское ПХГ. Показано, что в настоящее время Дашавское ПХГ работает в режиме “предельного цикла”. На основании анализа литературных источников установлено, что на стадии проектирования и эксплуатации ПХГ, работающих в газовом режиме, не учитывалась такая характеристика порового пространства, как наличие связанной воды. Показано, что на основании литературных источников, в пластах всегда содержится до 30% связанной воды.

Во втором разделе на основании теоретических положений подземной гидравлики разработана математическая модель осушки пористой среды, за счет нагнетания ненасыщенного влагой природного газа. Данная математическая модель разработана для режима нагнетания и отбора газа. На базе фактических данных эксплуатации Дашавского ПХГ проведена апробация полученных зависимостей. Установлена величина интенсивности осушки пластов ПХГ в зависимости от режима работы ПХГ. В процессе циклической эксплуатации хранилищ с газовым режимом работы наибольший эффект осушки порового пространства от связанной воды ощущает зона активной фильтрации (приблизительно 6-8%). Эффект осушки порового пространства также ощутим и в зонах пониженной фильтрации и застойных зонах, хотя и в значительно меньшей степени, так зона пониженной фильтрации осушается приблизительно на 1,44%, а застойная зона приблизительно на 0,44%.

В третьем разделе описана методика и экспериментальная установка для исследования процесса осушки порового пространства ПХГ. На основании экспериментов разработана эмпирическая зависимость максимальной величины осушки порового пространства от связанной воды в зависимости от проницаемости среды и параметров работы ПХГ. Разработанная математическая модель позволяет определять величину максимального увеличения порового пространства за счет осушки в зависимости от



проницаемости пластов и параметров эксплуатации хранилища. Установлена длительность осушки пластов ПХГ для условий газохранилищ Украины. Доказано, что процесс осушки порового пространства от связанной воды происходит в течении первых 6-8 циклов эксплуатации хранилища.

В четвертом разделе работы проведено статистический анализ параметров работы Дашавского ПХГ путем построения гистерезисных диаграмм эксплуатации хранилища. Установлено, что ПХГ с газовым режимом работы имеют три стадии формирования активного газонасыщенного порового объема ПХГ, сформулированы основные характеристики этапов формирования ПХГ. Разработана методика расчета параметров работы ПХГ на основании статистических характеристик газохранилища, что позволило определять газонасыщенный поровый объем ПХГ и объем газа в застойных зонах хранилища. В результате расчетов параметров хранилища доказано, что за счет осушки порового пространства газонасыщенный поровый объем хранилища увеличился на 6-8% и соответственно возможно увеличение объема хранения природного газу на 189,5 млн.м<sup>3</sup> в год.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, газовый режим работы, циклическая эксплуатация, годограф циклической эксплуатации, поровое пространство, осушка порового пространства.

## ABSTRACT

Susak O.M. Formation of the Gas-Saturated Void Volume of storages with Gas Operating Mode.

The thesis has been written to gain a Candidate of Science Degree according to the major 05.15.13 – Pipeline transportation, oil-and-gas storage. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2007.

The thesis is devoted to the rational exploitation of underground gas storage of Ukraine by the increase of active capacity of underground gas storages, which work in gas operating mode, at the expense of void volume desaturation. There has been proved the desaturation regularity of underground gas storage void volume. Besides, the author has developed a mathematical model for desaturation of storage void volume and has conducted the approbation of the received dependence taken as an example the deposits of Dashava underground gas storage.

On the basis of experimental research of the void volume desaturation process, it has been developed the empirical dependence of maximum change of residual water saturation on the void environment parameters and on the underground gas storage operation modes. The latter permits to determine the change of residual water saturation of deposits and, as a result, the change of gas saturation of storage void volume for the conditions of Ukrainian underground gas storages, which work in gas operating mode.

A statistic analysis of the operation indices of Dashava underground gas storage has been conducted by means of locus function (hodograph) construction of the cyclic underground gas storage operation. The improvement of usage methods of cyclic storage operation hodographs permits to develop the methods for determining the storage parameters on the basis of statistic operation indices of underground gas storage. It, in its turn, gives the possibility to define the gas-saturated void volume of underground gas storage, gas volume in the storage dead zone and to establish the stages of formation of gas-saturated storage void volume with gas operating mode.

Key words: underground gas storage, gas operating mode, cyclic storage operation, cyclic storage operation hodograph (locus function), void volume, void volume desaturation.