

622.691.24 (4т)
Ш 61

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

ШИМКО РОМАН ЯРОСЛАВОВИЧ

УДК 622.691.24

МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ПРОЦЕСІВ ФОРМУВАННЯ І
ЕКСПУАТАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ
УКРАЇНИ

Спеціальність 05.15.13 - Нафтогазопроводи, бази і сховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук



Івано-Франківськ- 2003

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

Грудз Володимир Ярославович, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтоосховищ, м. Івано-Франківськ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

Середюк Марія Дмитрівна, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри транспорту і зберігання нафти і газу, м. Івано-Франківськ.

кандидат технічних наук **Говдяк Роман Михайлович**, голова правління ВАТ "Укргазпроект", м. Київ

Провідна організація: ВАТ ІВП **ВНІШ**трансгаз, м. Київ.

Захист відбудеться 17 вересня 2003 р. о 10 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:

Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

технічної бібліотеці

Івано-Франківського технічного університету нафти і газу

вул. Карпатська, 15.

ВСТУП

Актуальність теми. Підземні сховища газу (ПСГ) є невід'ємною частиною складного газотранспортного комплексу України. Режим роботи ПСГ залежить від режиму роботи газотранспортної системи в цілому і з іншого боку характер роботи сховищ має вплив на режим роботи газопроводів.

До складу газотранспортного комплексу як обов'язковий елемент входить підземне сховище газу, яке виконує функції вирівнювання сезонної нерівномірності газоспоживання і забезпечує надійність газопостачання. Для умов України комплекс ПСГ представляє собою систему, що забезпечує дотримання міжнародних угод по реалізації газотранспортних потоків в країні Західної Європи. Тому від якості роботи ПСГ залежить надійність забезпечення споживачів газом.

Найбільш поширеними і економічно вигідними є сховища газу в виснажених газових родовищах, історія експлуатації яких може бути використана для прогнозування режимів роботи ПСГ. Крім того, сховище має певний фонд свердловин. Однак, за час експлуатації родовища продуктивні горизонти обводнились, що утруднює формування газового покладу підземного сховища газу. З іншого боку, наявність ПСГ в системі транспорту газу призводить до збільшення затрат на транспорт, що в кінцевому результаті веде до зростання ціни на газ. Тому експлуатація ПСГ повинна бути настільки ефективною, щоб економічно виправдати додакові затрати на зберігання газу.

З технічної точки зору ПСГ є надзвичайно складною системою, основними елементами якої є пласт-колектор, зв'язаний з поверхневим обладнанням свердловинами. Режими роботи цих об'єктів на відміну від газових родовищ нестабільні в часі, що ускладнює їх надійну експлуатацію. Тому наукові дослідження особливостей експлуатації ПСГ в умовах пружноводонапірного режиму їх розробки, спрямовані на вивчення формування газонасиченого об'єму покладу, виявлення особливостей прояву пружноводонапірного режиму при циклічній експлуатації сховища, визначення впливу покладу на водоносну зону пласта є актуальними проблемами підвищення надійності газопостачання. Крім того це один з шляхів економії енергоресурсів країни, що має особливу актуальність з точки зору рішень Кабінету міністрів та Верховної Ради.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК "Нафтогаз України", спрямованих на розробку і удосконалення методів розрахунку технологічних параметрів ПСГ на стадії їх формування

ІНТБ

ІНТУНГ



as1007

та циклічної експлуатації і окреслених Національною програмою "Нафта і газ України до 2010 року".

Мета і задачі досліджень. Вивчення закономірностей і особливостей протікання гідрогазодинамічних процесів в пористому середовищі на основі їх математичного моделювання для прогнозування процесів формування і циклічної експлуатації підземних сховищ газу в водоносних структурах.

Поставлена мета реалізується через вирішення наступних задач:

- формування газонасиченого об'єму газосховища в покладах з пружноводонапірним режимом роботи на основі математичного моделювання гідрогазодинамічних процесів в продуктивному горизонті,
- дослідження фазових проникностей пористого середовища при витисненні води газом;
- оцінка впливу штучного газового покладу на водоносну зону пласта в період технологічних процесів закачки і відбору газу;
- оцінка впливу переміщення газоводяного контакту на динаміку зміни технологічних параметрів експлуатації сховища;
- визначення межі можливого застосування спрощених залежностей для розрахунку основних технологічних параметрів роботи сховища;
- розробка та вдосконалення методів моделювання міжпластових перетоків води при створенні і експлуатації сховищ газу у відповідних структурах.

Об'єкт досліджень - ПСГ України, створені у виснажених газових покладах, з пружноводонапірним режимом експлуатації.

Предмет дослідження - гідрогазодинамічні процеси в пористому середовищі покладу ПСГ при його формуванні і циклічній експлуатації.

Методи дослідження: математичне моделювання нестационарних процесів в покладах ПСГ, статистичні та експериментальні дослідження процесів взаємного витиснення води газом в пористому середовищі.

Наукова новизна проведених досліджень полягає в наступному:

1. Побудована математична модель процесу формування ПСГ в водоносній структурі в умовах пружного режиму дозволила встановити характерні залежності між ростом пластового тиску і обсягом закачаного газу, а також характер руху газоводяного контакту (ГВК) при цьому;
2. На основі проведених експериментальних досліджень вивчення фазових проникностей пористого середовища встановлено вплив залишкової водонасиченості на газову проникність середовища;
3. Дано оцінку можливості і доцільності застосування спрощених математичних залежностей для розрахунків параметрів гідрогазодинамічних процесів в сховищі.
4. Запропонована адаптивна математична модель формування і циклічної експлуатації ПСГ в умовах пружноводонапірного режиму, яка дозволяє

прогнозувати параметри роботи сховища в період циклів "відбір-закачка", на основі використаної передісторії.

Практичне значення одержаних результатів. Теоретичні дослідження дозволили розробити методику розрахунку технологічних режимів роботи ПСГ в водоносних структурах та регулювання їх в процесі циклу "відбір-закачка". За результатами їх реалізації розроблено і випущено галузеву методику.

Розроблені рекомендації з регулювання режимів роботи ПСГ впроваджено в практику на об'єктах УМГ "Львівтрансгаз" та "Прикарпаттрансгаз"

Особистий вклад автора в одержанні наукових результатів.

1. Автором запропоновано і створено математичні моделі гідрогазодинамічних процесів в продуктивному горизонті ПСГ в водоносних структурах для умов пружного і водонапірного режиму [1,2].
2. Автором розроблено адаптивний метод моделювання процесу формування газонасиченого об'єму сховища [2,7].
3. На основі аналітичних досліджень автором дано оцінку можливості і доцільності застосування спрощених математичних залежностей для розрахунків параметрів гідрогазодинамічних процесів в сховищі [2,4].
4. На основі проведених експериментальних досліджень вивчення фазових проникностей пористого середовища встановлено вплив залишкової водонасиченості на газову проникність середовища [6,7,8].
5. Здобувач брав безпосередню участь у впровадженні результатів досліджень, одержаних в роботі, складанні галузевих керівних документів. При його безпосередній участі розроблено та впроваджено галузеву методику [3,5,6].

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи висвітлено в доповідях і повідомленнях на :

- 6-тій міжнародній конференції "Нафта і газ України - 2000" (Івано-Франківськ, 2000);
- науково-практичній конференції "Шляхи підвищення надійності і ефективності роботи трубопровідного транспорту".(Івано-Франківськ, 2000);
- науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2002)
- нараді фахівців НАК "Нафтогаз України" та ОАО "Газпром" з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування природного газу (Яремче, 2002)
- 13-тій міжнародній науково-технічній конференції "нові методи і технології в нафтовій геології, бурінні, експлуатації нафтобаз і газосховищ" (Краків, 2002)

В повному обсязі результати досліджень доповідалися і обговорювалися на розширеному засіданні кафедри транспорту і зберігання нафти і газу та науково-технічному семінарі факультету нафтогазопроводів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Публікації. За темою дисертації опубліковано 8 друкованих праць, з них 4 у фахових виданнях України.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, підсумкових висновків та переліку використаних джерел, що містить 106 найменувань. Основний зміст викладено на 163 сторінках машинописного тексту і містить 17 рисунків, 4 таблиці і 4 додатки.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

В першому розділі наведена основна характеристика підземних сховищ газу України і проаналізовано концепції її розвитку підземного зберігання газу в світі і в Україні.

Базовим об'єктом для проведення аналізу вибрано Опарське ПСГ, створене на основі виснаженого газового родовища, що є одним з найбільш характерних сховищ з пружноводонапірним режимом роботи.

На основі аналізу статистичних даних експлуатації Опарського газового родовища (рис.1) показано, що в залежності від параметрів роботи покладу можливі різні його режими.

Приведений аналіз показників експлуатації Опарського родовища дозволяє стверджувати, що на початкових етапах розробки родовища режим роботи продуктивного пласта близький до газового. Залежність приведенного пластового тиску від об'єму відібраного газу є прямолінійною. Розрахунки основних технологічних параметрів роботи сховища підпорядковані відносно простим газовим законам, що дозволяє прогнозувати режими відбору і закачки газу. Починаючи з певного моменту експлуатації родовища, проявляються ознаки водонапірного режиму, про що свідчить відхилення залежності між приведеним тиском і об'ємом відібраного газу від лінійного закону. Виникає питання: чи справедливі раніше використовувані розрахункові залежності для прогнозування режиму роботи покладу? Відхилення залежності між приведеним тиском і об'ємом відібраного газу від лінійного закону свідчить про обводнення покладу. Це внесе певну похибку в результати розрахунків за моделями, в яких прийнято цей об'єм сталим. Тоді слушним є запитання: до якої міри можна використовувати спрощені моделі розрахунків? Тому необхідні додаткові дослідження, які вимагають побудови математичної моделі гідрогазодинамічних процесів в покладі, що адекватно їх відтворюватиме.

Класичною математичною моделлю гідрогазодинамічних процесів в сховищах газу, створених в водоносних горизонтах, вважається модель

І.А. Чарного . Згідно з запропонованою моделлю період відбору чи закачки газу розбивається на дві фази, що характеризують нестационарну фільтрацію газу в пористому середовищі покладу.

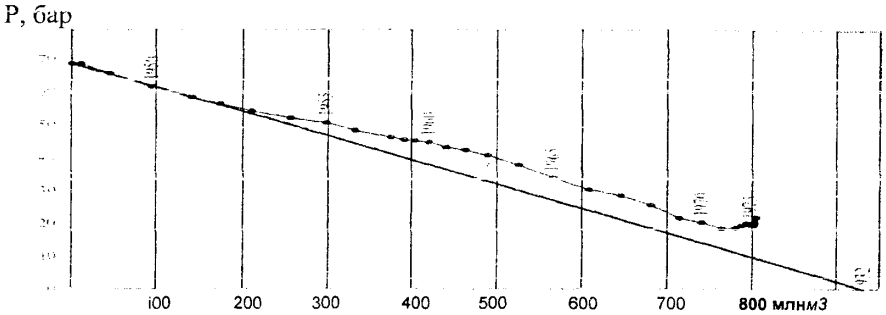


Рис. 1. Графік роботи покладу IV-го горизонту Опарського родовища

Перша фаза нестационарної фільтрації характеризується тим, що збурення, викликане роботою свердловини, розповсюджується від вибою свердловини вздовж радіусу до контуру газонесності. Друга фаза нестационарної фільтрації характеризується переміщенням ГВК і відповідним збільшенням об'єму газової області. Для кожної з фаз створено відповідні математичні моделі, які стикаються між собою на границі ГВК. Вказується, що для першої фази фільтрації закон розповсюдження збурення вздовж радіуса можна вважати лінійним, а розрахунок основних параметрів процесу можна вести за формулами, справедливими для газового режиму роботи покладу. Для другої фази нестационарної фільтрації вказані залежності не справедливі. Математична модель має складну структуру. Ряд припущень, прийнятих при її побудові і реалізації спотворюють реальну картину процесу.

Такий підхід до рішення складної задачі нестационарної фільтрації газу в пласті був на той час оправданим і давав задовільні прогностичні результати. Однак, на сьогоднішній день, враховуючи розвиток обчислювальної техніки, математична модель Чарного І.А. не дає результатів, що від неї очікуються. Це в першу чергу стосується умовного розбиття неперервного процесу на дві фази, які штучно відокремлені одна від одної. Тому неперервний природний процес не сприймається як єдине ціле, що не дозволяє глобально оцінити загальну фізичну картину.

Окремо слід зупинитися на моделі переміщення газоводяного контакту в період відбору чи закачки газу в сховище. Класичною в цьому плані вважається відома задача Стефана. Однак умови постановки і реалізації задачі в значній мірі ідеалізовані, а сама задача переміщення ГВК

розглядається як математична задача з умовами на рухомих границях. Реалізація такого класу задач вкрай складна, а розв'язки характеризуються нестійкістю. Окрім того, дана задача незадовільно вписується в загальну картину протіканні гідрогазодинамічних процесів в покладі.

Виходячи з сказаного, можна стверджувати, що назріла необхідність створення математичної моделі гідрогазодинамічних процесів с продуктивному горизонті ПСГ в водоносних масивах, яка б об'єднала розрізнені задачі і дозволила глобально оцінити реальну фізичну картину в пласті з метою рішення ряду практично важливих задач.

Другий розділ присвячено аналізу існуючих математичних моделей фільтрації рідини і газу в пористому середовищі продуктивного горизонту і розробці нових математичних моделей нестационарних гідрогазодинамічних процесів ПСГ.

На основі класичних законів лінійної фільтрації газу в пористому середовищі (закону Дарсі) та збереження речовини (закону нерозривності) показано принципи побудови математичних моделей гідрогазодинамічних процесів в продуктивному горизонті. Приводяться умови спрощення рівнянь та їх реалізація такими класиками як Чарний І.А., Левикін Е.В., Лур'є М.В. На основі аналізу отриманих рішень зроблено висновки і визначено засади математичного моделювання гідрогазодинамічних процесів в пласті.

Для умов пружного режиму роботи покладу розрахункова схема процесу представлена наступним чином. В центрі кругового продуктивного пласта радіусом контуру R розміщено укрупнену свердловину діаметром d , через яку в пласт нагнітається газ з масовою витратою Q_m . Газоводяний контакт знаходиться на відстані ℓ від осі свердловини вздовж радіуса. На контурі продуктивний горизонт закритий. Початковий тиск в пласті вирівняний і в кожній точці складає P_0 . Тиск в водоносній частині P_g розкладається як функція лінійної координати x (вісь OX спрямована від контуру до осі свердловини) і часу t .

Таким чином формалізована постановка задачі має вигляд:

Знайти розв'язок системи рівнянь

$$\begin{cases} \frac{\partial P_g}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_g}{\partial x^2} \\ \frac{\partial P_c}{\partial t} = \frac{\partial^2 P_c}{\partial y^2} \end{cases} \quad (1)$$

на інтервалах $0 \leq t \leq \infty$, $0 \leq x < R - \ell$, $0 < Ly < \ell$; $x + y = R$ при початкових умовах $P_g(x, 0) = P_c(y, 0) = P_0$.

Граничні умови мають вигляд

$$\left. \frac{\partial P_e}{\partial x} \right|_{x=0} = 0; \left. \frac{\partial P_e}{\partial y} \right|_{y=0} = - \left(\frac{Q_m}{\rho_e} \right) \frac{\eta_e}{\kappa_e \pi d h} = const \quad (2)$$

Умови на рухомій границі виражають рівність лінійних швидкостей води і газу та рівність тисків в кожному з середовищ на межі ГРК і мають вигляд

$$\left. \frac{\kappa_e}{\eta_e} \frac{\partial P_e}{\partial x} \right|_{x=R-\ell} = \left. \frac{\kappa_g}{\eta_g} \frac{\partial P}{\partial y} \right|_{y=\ell}; P_e(\ell, t) = P_g(R-\ell, t) \quad (3)$$

Крім того необхідно побудувати закон руху газоводяного контакту $\ell = \ell(t)$.

Реальний режим роботи сховища можна охарактеризувати як пружно-водонапірний, для якого характерний і пружний стиск рідини, і її відтік з продуктивного горизонту.

На практиці пружноводонапірний режим зустрічається при створенні ПСГ в водоносних структурах з розвантаженням води на поверхню. В таких випадках в центрі покладу пробурюються експлуатаційно-нагнітальні газові свердловини, а по контуру – водяні розвантажувальні. Крім вказаного випадку пружноводонапірний режим забезпечується, якщо великий водоносний поклад має декілька “газових шапок”. В такому випадку, при закачуванні газу в одну з них вода переміщається, стискаючи газ в іншій.

Існують також сховища, в яких пружно-водонапірний режим забезпечують перетоки води в інший горизонт. Математичне моделювання різних варіантів створення ПСГ є надзвичайно складним як в плані побудови, так і в плані реалізації моделі. Найбільш простим з точки зору створення математичної моделі є варіант ПСГ з розвантаженням води на поверхню. Тому тут побудовано модель для варіанту ПСГ з розвантаженням води на поверхню з наступним узагальненням її для всіх інших випадків.

Таким чином, поставлена задача зводиться до наступної математичної моделі. Знайти розв’язок системи диференціальних рівнянь (1) для вказаних діапазонів зміни координат і часу і при вказаних умовах (2) і (3).

Граничні умови включають дебїти експлуатаційно-нагнітальної газової та розвантажувальної водяної укрупнених свердловин, розміщених відповідно в центрі покладу і на його контурі, і мають вигляд

$$\left. \frac{\partial P(y, t)}{\partial y} \right|_{y=0} = - \frac{Q_m \eta_g}{\kappa_g \pi d_g h}; \left. \frac{\partial P(x, t)}{\partial x} \right|_{x=0} = \frac{Q_a \eta_a}{\kappa_a \pi d_a h} \quad (4)$$

Умови на рухомій границі відповідають постановці попередньої задачі.

Розв'язком поставленої задачі є функції $P(y,t)$ і $P_0(x,t)$, що визначають розподіл тиску в газовій і рідинній області продуктивного горизонту в процесі закачування чи відбору газу при умові розвантаження води на поверхню. Крім того, використовуючи рівняння Дарсі, можна отримати розподіл витрати або швидкості фільтрації газу і води в залежності від лінійної координати і в часі.

Третій розділ присвячено експериментальним дослідженням фазових проникностей пористого середовища і встановленню впливу залишкової водонасиченості на газову проникність середовища.

Як показано численними, при закачуванні газу у водонасний пласт газ не цілком витісняє воду, а як більш рухливий флюїд при своєму русі обганяє воду, при цьому утвориться зона двофазного руху флюїдів. З наявністю зони двофазної течії приходиться рахуватися при створенні підземного сховища (при закачуванні газу в пласт), а також і при відборі газу зі сховища.

На основі теорії двофазної фільтрації рідин у пористому середовищі, загальновідомої як теорія Баклея-Лeverетта, розроблено методику проведення дослідів з визначення фазової проникності пористого середовища і її залежності від його газонасиченості. У відповідності до цієї методики створено лабораторний стенд, в якому модель продуктивного пласта імітувалася за допомогою керна, вмонтованого в металевий корпус, через який прокачувалася вода і газ. В процесі проведення дослідів вимірювалися всі параметри, необхідні для розрахунків фазової проникності і газонасиченості. В результаті побудовано графіки залежності між фазовими проникностями і газонасиченістю.

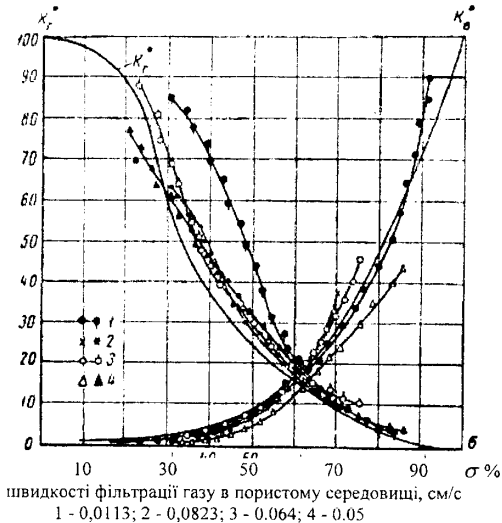


Рис. 2. Криві проникність — насиченість

Запропонована методика визначення фазових проникностей при витисненні води газом ґрунтується на припущенні про те, що розрахунок витиснення води газом можна виконувати по відомих формулах теорії двофазного плинину нестисливих рідин, замінюючи швидкість фільтрації рідини, що витісняє, об'ємною швидкістю фільтрації газу, приведеної до середньоарифметичного тиску в пласті. При обробці результатів дослідів за даною методикою виходить універсальна стосовно швидкості фільтрації крива фазових проникностей. Це непрямым чином виправдує прийняте припущення і вказує на можливість користування ним для проведення практичних розрахунків.

В четвертому розділі викладено методи реалізації запропонованих математичних моделей, проведено аналіз результатів розрахунків і на основі узагальнення характеристик процесів розроблено методикою розрахунків процесів формування та експлуатації ПСГ в водоносних структурах.

Аналітичний розв'язок математичної моделі формування сховища в умовах пружного режиму шукався на основі модифікованого методу Фур'є і має вигляд:

- для розподілу тиску в газоносній частині покладу

$$P_z(y, t) = P_n(t) - \frac{\eta}{k_s} \frac{Q_m}{\rho F} y + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{P_0}{\lambda_n l} (1 - \cos \lambda_n l) + \frac{\eta}{k_s} \frac{Q_m}{\rho F} \left(\frac{1}{\lambda_n^2 l} \sin \lambda_n l - \frac{1}{\lambda_n} \cos \lambda_n l \right) \right] \exp(-\lambda_n^2 \kappa_s t) \sin \lambda_n y$$

- для швидкості фільтрації газу

$$W_z(y, t) = \frac{Q_m}{\rho F} - \frac{2 k_s}{\eta} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{P_0}{\lambda_n l} (1 - \cos \lambda_n l) + \frac{\eta}{k_s} \frac{Q_m}{\rho F} \left(\frac{1}{\lambda_n^2 l} \sin \lambda_n l - \frac{1}{\lambda_n} \cos \lambda_n l \right) \right] \exp(-\lambda_n^2 \kappa_s t) \cos \lambda_n y \quad (5)$$

- для розподілу тиску в водоносній частині покладу

$$P_g(x, t) = P_0 - 2P_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos \lambda_n (R - l)}{\lambda_n (R - l)} \exp(-\lambda_n^2 \kappa_g t) \cos \lambda_n (R - x)$$

Числова реалізація приведених залежностей вимагає визначення параметра λ_n і тому не може бути виконана за лінійним алгоритмом. Для одержання числової моделі пропонується наступний алгоритм:

1. при заданому початковому положенні ГВК, яке характеризується радіусом $l(t) = l_0$, знаходять корені рівняння

$$\cos \lambda_n R (1 + \operatorname{tg} \lambda_n R \cdot \operatorname{tg} \lambda_n l) = \exp(\kappa_n - \kappa_n z) \quad (6)$$
2. Заданою проміжком часу Δt , на кінець якого визначають розподіл тисків і лінійних швидкостей газу вздовж радіуса.
3. Якщо при цьому швидкість фільтрації газу на віддалі l_0 $W(l_0, \Delta t) = 0$ (газодинамічне збурення не дійшло до ГВК), то задаються новим проміжком часу Δt і розрахунок повторюють, починаючи з п.2.
4. Якщо на кінець j -того проміжку часу $W(l_0, j\Delta t) \neq 0$, то визначають віддаль, на яку перемістився ГВК за час Δt $\Delta l = W(l_0, j\Delta t)\Delta t$ і нове значення радіуса ГВК $l = l_0 + \Delta l$.
5. Знаходять нове значення параметра λ_n , і будують розподіл тисків та лінійних швидкостей в газовій і рідинній зонах пласта, за яким знаходять нове значення лінійної швидкості газу на границі ГВК. Використавши це значення, повертаються до п.4 і роблять новий часовий крок.
6. Закон переміщення ГВК будують на основі даних про величини Δl на кінець кожного проміжку часу Δt .

Реалізація математичної моделі формування ПСГ в умовах пружноволонепірного режиму дозволила одержати розв'язки в вигляді:

- для тисків в газовій і водоносній області покладу

$$P_a(x, t) = P_0 - \frac{\eta}{k_s} \frac{Q_m}{\rho F} (R - x) + \\ + \frac{2}{R-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^{R-l} \left(P_0 + \frac{v_s}{k_s} \left(\frac{Q_m}{F} \right) \right) (R-x) \sin(\lambda_n x) dx \right] \exp(-\lambda_n^2 \kappa_s t) \cos(\lambda_n (R-x))$$

$$P_b(x, t) = P_0 - \frac{v_B}{B} \frac{Q_B}{F} x + \\ + \frac{2}{1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^l \left(P_0 + \frac{v_B}{k_B} \left(\frac{Q_B}{f} \right) \right) x \sin(\lambda_n x) dx \right] \exp(-\lambda_n^2 \kappa_B t) \cos(\lambda_n x)$$

- для швидкості фільтрації газу (7)

$$W_s(y, t) = \frac{Q_m}{\rho F} - \\ - 2 \frac{k_s}{\eta} \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{2}{R-1} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^{R-l} \left(P_0 + \frac{v_s}{k_s} \left(\frac{Q_m}{F} \right) \right) (R-x) \sin(\lambda_n x) dx \right] \exp(-\lambda_n^2 \kappa_s t) \cos(\lambda_n (R-x)) \right\}$$

Запропонована математична модель є адаптивною і може адаптуватися до умов роботи конкретного сховища газу шляхом підбору фіктивного дебіту розвантажувальної водяної свердловини. Алгоритм реалізації моделі має наступний вигляд:

1. Використовуючи передісторію експлуатації ПСГ, вибирають пластові тиски на певний момент часу закачки газу і, використовуючи рівняння системи (7), визначають фіктивний дебіт водяної розвантажувальної свердловини Q_v для кожного з моментів часу.
2. В залежності від мети розрахунку визначенні фіктивний дебіт розвантажувальної свердловини як адаптивний параметр можна усереднити, або побудувати функцію його зміни в часі.
3. Використовуючи одержані результати, адаптують рівняння системи (7) до реальних умов за методом найменших квадратів.
4. При заданому початковому положенні ГВК, яке характеризується радіусом $l(t) = l_0$, знаходять корені рівняння (6).
5. Задаються проміжком часу Δt , на кінець якого з рівнянь (7) визначають розподіл тисків і лінійних швидкостей газу вздовж радіуса.
6. Якщо при цьому швидкість фільтрації газу на віддалі l_0 $W(l_0, \Delta t) = 0$ (газодинамічне збурення не дійшло до ГВК), то задається новим проміжком часу Δt і розрахунок повторюють, починаючи з п.5.
7. Якщо на кінець j -того проміжку часу $W(l_0, j\Delta t) \neq 0$, то визначають віддаль, на яку перемістився ГВК за час Δt $\Delta l = W(l_0, j\Delta t)\Delta t$ і нове значення радіуса ГВК $l = l_0 + \Delta l$.
8. Використовуючи рівняння (6), знаходять нове значення параметра λ_n , і будують розподіл тисків та лінійних швидкостей в газовій і рідинній зонах пласта, за яким знаходять нове значення лінійної швидкості газу на границі ГВК. Використавши це значення, повертаються до п.7 і роблять новий часовий крок.
9. Закон переміщення ГВК будують на основі даних про величини Δl на кінець кожного проміжку часу Δt .

Числова реалізація запропонованих математичних моделей за вказаними алгоритмами дозволила побудувати графіки нестационарної депресії тиску і швидкостей фільтрації газу для умов гіпотетичного покладу, умови і характеристики якого можна міняти. Приклади графіків подано на рис. 3 і 4.

Аналіз результатів, одержаних для різних умов експлуатації покладу при різних його характеристиках дозволив зробити висновок, що узагальнюючим параметром, що характеризує газогідродинаміку процесу є безрозмірний час

$$\tau = \frac{\chi l}{l^2} \quad (8)$$

де χ – п'єзопровідність пористого середовища; t – реальний час;
 l – радіус контуру газоносності.

За характером розподілу тисків в газонорсній частині покладу визначались середньозважені значення приведенного тиску, що дало змогу побудувати залежності середньозваженого приведенного тиску від об'єму газу в сховищі для періоду закачки. Ці графіки приведені на рисунку 5. Їх аналіз показує, що відхилення побудованої залежності від лінійного закону, який характерний для газового режиму роботи покладу, на величину, що перевищує 5% по об'єму газу, досягається у всіх випадках при значеннях безрозмірного часу $\tau = 0,5$. Тому цю величину можна вважати границею можливості застосування в розрахунках спрощених формул, характерних для газового режиму експлуатації сховища. Якщо для певного моменту роботи покладу безрозмірний час $\tau < 0,5$, то використання спрощеної методики розрахунків призведе до похибки в результатах, яка не перевищить 5%.

Результати досліджень і зроблені висновки покладено в основу розробленої методики розрахунку формування та експлуатації сховищ газу в водоносних структурах.

Суть методики полягає в тому, що для періоду відбору чи закачки визначають безрозмірний час за реальною їх тривалістю. Якщо $\tau > 0,5$, то для початкової стадії, де безрозмірний час не перевищує критичне значення, розрахунки технологічних процесів ведуть за спрощеними залежностями, характерними для газового режиму, тобто прояви водонапірності не враховують. Для решти періоду, де безрозмірний час перевищує критичну величину необхідно використовувати рівняння нестационарної фільтрації в формі (6) чи (7) і відповідні алгоритми. Якщо для всього періоду відбору чи закачки зберігається умова $\tau < 0,5$, то рекомендується використання тільки спрощених залежностей для розрахунків, при цьому похибка результатів не перевищить 5%.

Методика дозволяє проводити розрахунки характеру розподілу тисків в покладі при формуванні сховища газу та в період його циклічної експлуатації; характеру переміщення газоводяного контакту в період закачки чи відбору газу та його вплив на технологічні параметри режиму; процесу стабілізації тисків в покладі; міжпластових перетоків води при створенні і експлуатації ПСГ в водоносних структурах.

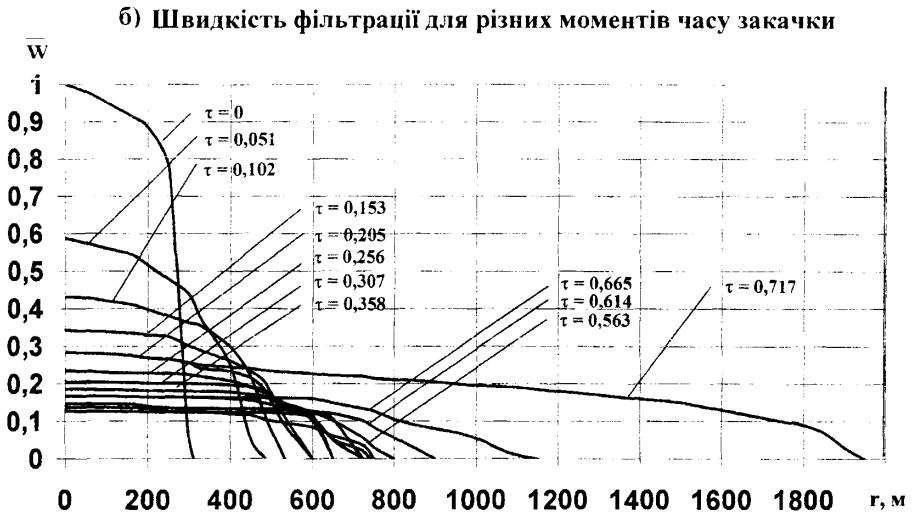
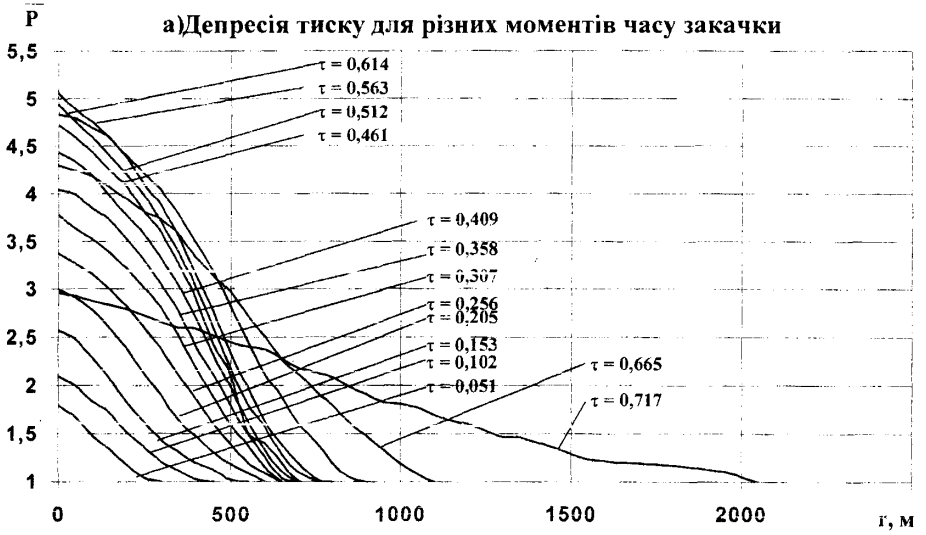
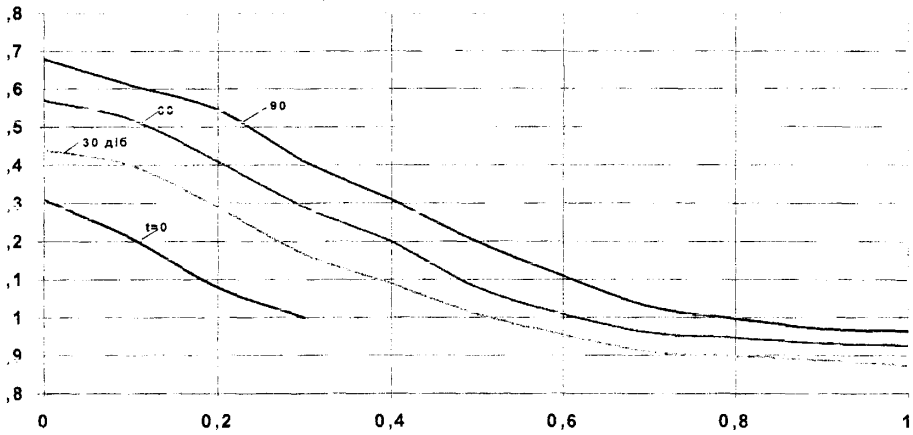


Рис. 3. Депресія тиску (а) і розподіл швидкостей фільтрації (б) для умов пружного режиму роботи покладу

\bar{p}

а)

Відносний радіус контуру, r/R

б)

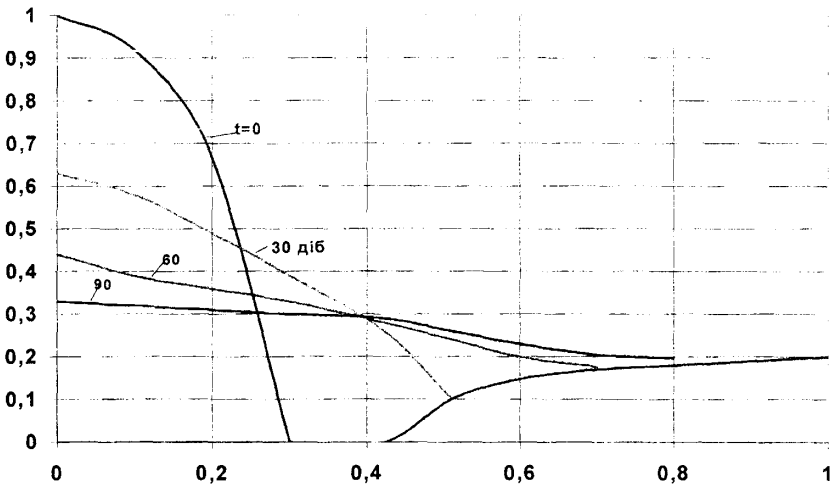
 w Відносний радіус контуру, r/R

Рис. 4. Депресія тиску (а) і розподіл швидкостей фільтрації (б) для ПСГ з розвантаженням води на поверхню

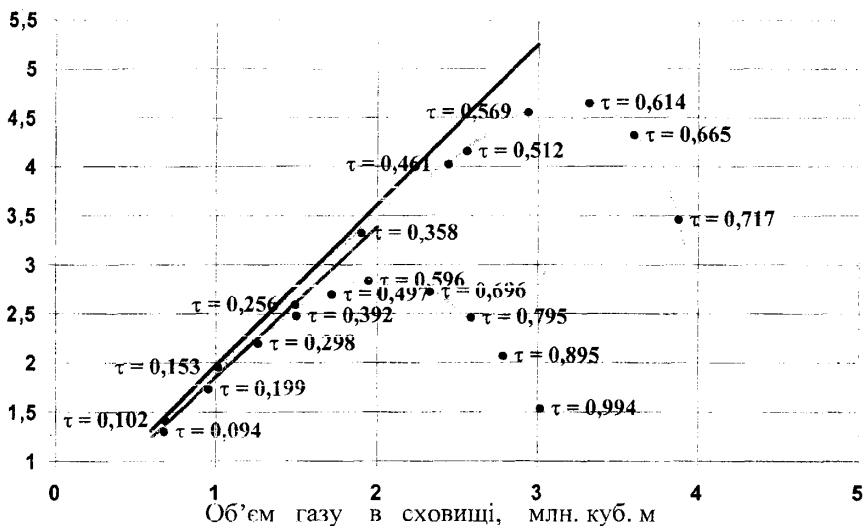


Рис. 5. Залежність середньозваженого пластового приведенного тиску від об'єму газу в сховищі

ВИСНОВКИ

1. На основі проведених досліджень вирішена важлива науково-технічна задача, що має значне народногосподарське значення, і полягає в розробці і конкретизації методів технологічних розрахунків формування і циклічної експлуатації підземних сховищ газу для умов пружного і пружноводонапірного режимів роботи.

2. Створено математичні моделі протікання гідрогазодинамічних процесів в водоносних покладах при формуванні та циклічній експлуатації підземних сховищ газу дозволяють прогнозувати депресію тиску і швидкість фільтрації флюїду, а також характер переміщення газоводяного контакту, що має важливе значення для визначення кількості газу в пласті, прогнозування застійних зон та міжпластових перегоків.

3. На основі проведених серій лабораторних досліджень з визначення фазових проникностей пористого середовища встановлено їх залежності від залишкового водонасичення, що має місце при витісненні води газом. Запропонована методика визначення фазових проникностей при витісненні води газом ґрунтується на припущенні про те, що розрахунок витіснення води газом можна виконувати по відомих формулах теорії двофазного плинунестисливих рідин, замінюючи швидкість фільтрації рідини, що витісняє, об'ємною швидкістю фільтрації газу, приведеної до середньоарифметичного

тиску в пласті. При обробці результатів дослідів за даною методикою побудована універсальна стосовно швидкості фільтрації крива фазових проникностей. Це непрямым чином виправдує прийняте допущення і вказує на можливість користування ним для проведення практичних розрахунків

4. Показано, що критерієм адекватності технологічних режимів являється безрозмірний час, що визначається через коефіцієнт п'єзопровідності пористого середовища, і який визначає характер нестационарності фільтрації газу. Встановлено, що для величини безрозмірного часу до $\tau = 0,5$ хвиля газодинамічного збурення не доходить до границі газодляного контакту, і розрахунки параметрів режиму роботи сховища в цьому випадку можна вести за спрощеними залежностями без врахування ефекту водонапірного режиму.

5. На основі проведених досліджень розроблено методику розрахунку параметрів режиму формування і циклічної експлуатації ПСГ, створених в водоносних структурах, яка забезпечує отримання прогнозних показників з похибкою, що не перевищує 5%. Дана методика є керівним документом і впроваджена для розрахунків режимів роботи ПСЗ в УМГ "Львівтрансгаз" і "Прикарпаттрансгаз".

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних працях:

1. Шимко Р.Я., Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Грудз Я.В. Моделювання нестационарного газодинамічного процесу в ПСГ за умов пружного режиму закачки газу// «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». - 2002. - №2(3). - С.52-53.
2. Шимко Р.Я., Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Грудз Я.В. Адаптивна модель процесу закачки газу в ПСГ//Науковий вісник ІФНТУНГ. - 2002.- №2.- С. 74-75.
3. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Шимко Р.Я. Пропускна здатність трансукраїнської системи газопроводів// Нафтова і газова промисловість.- 2002.-№2.-С.32.
4. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Шимко Р.Я. Оптимізація використання підземних сховищ газу для забезпечення надійності газопостачання// Державний міжвід.наук.-техн. збірник "Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ". Серія "Транспорт і зберігання нафти і газу".- Вип. 38.- 2001.- С. 83-86.
5. Шимко Р.Я, Вечерік Р.І., Хаєцький Ю.М. та ін. Забезпечення надійного функціонування ПСГ ДК "Укртрансгаз"// Нефть и газ Украины.- 2002.- №4.- С. 40-43.
6. Грудз В.Я., Тимків Д.Ф., Шимко Р.Я. Методология оптимизации эксплуатации оборудования магистральных газопроводов в условиях неполной информации// 13 Международная конференция «Новые методы и

технологии в нефтяной геологии, добыче, бурении, эксплуатации газоснабжения».- т.2.- Краков.- 2002.- С.125-128.

7. Шимко Р.Я. Принципи адаптації математичної моделі до реальних умов циклічної експлуатації ПСГ// Тези доповіді на конференції професорсько-викладацького складу ІФДТУНГ.- Івано-Франківськ.- 2002.-С.40.

8. Шимко Р.Я. Експериментальні дослідження фазових проникностей при витісненні води газом з пористого середовища. Матеріали наук.-практ. конф. "Шляхи підвищення надійності і ефективності роботи трубопровідного транспорту.-Івано-Франківськ.- 2000.- С. 29-30.

АНОТАЦІЯ

Шимко Р.Я. Методи розрахунку процесів формування і експлуатації підземних сховищ газу в водоносних структурах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 - нафтогазопроводи, бази та сховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу. Івано-Франківськ, 2003.

Дисертацію присвячено розробці математичних моделей процесів формування і експлуатації підземних сховищ газу, створених в водоносних структурах в умовах пружного і пружноводонапірного режимів роботи. Проведено дослідження проникності пористого середовища на лабораторній моделі з врахуванням залишкової водонасиченості породи. Розроблено математичні моделі гідрогазодинамічних процесів в покладі для умов пружного і пружноводонапірного режимів роботи і розроблено методи їх реалізації. На основі аналізу результатів досліджень встановлено, що характерною ознакою режиму роботи покладу є безрозмірний час експлуатації. Запропоновано методіку розрахунку режимів формування і циклічної експлуатації сховищ в водоносних структурах.

Ключові слова: депресія тиску, швидкість фільтрації, проникність.

THE SUMMARY

Shymko R.Ya. Methods of account of processes of forming and exploitation of underground farms of gas Ukraine.- Manuscript.

Thesis on competition of a scientific degree of the candidate of engineering science on a specialty 05.15.13-Oil and gas pipelines, plants and storages.- Ivano - Frankivsk national engineering university of oil and gas. Ivano-Frankivsk, 2003.

The thesis is devoted to development of mathematical models of processes of forming and exploitation of underground gas storage created in patterns with movable contour waters in conditions of elastic water drive of modes of operations. The permeability surveys of a porous medium on laboratory model are

held in view of residual **water saturation** of formation. The mathematical models of **hydrogasodynamic** of processes in reservoir for conditions of elastic water drive of modes of operations are designed and it is offered methods of their realization. On the basis of analysis of results of studies is established, that the characteristic attribute of mode of operations of reservoir is dimensionless time of exploitation. The method of application of account of conditions forming and cyclic exploitation of farms in patterns with movable contour waters is proposed.
 Key words: depression of stress, filtration rate, penetrability.

АННОТАЦИЯ

Шимко Р.Я. Методы расчета процессов формирования и эксплуатации подземных хранилищ газа Украины.- Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 - нефтегазопроводы, базы и хранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2003.

Диссертация посвящена разработке математических моделей процессов формирования и эксплуатации подземных хранилищ газа, созданных в структурах с подвижными контурными водами в условиях упругого и упруговодонапорного режимов работы.

Построена математическая модель процесса фильтрации воды и газа в пористой среде продуктивного горизонта залежи и предложены методы ее реализации. Разработана адаптивная математическая модель формирования и циклической эксплуатации подземного хранилища газа в условиях упругого и упруговодонапорного режимов.

Проведены экспериментальные исследования проницаемости пористой среды на лабораторной модели с учетом остаточной водонасыщенности породы. Установлены зависимости фазовых проницаемостей пористой среды от остаточной водонасыщенности.

На основании проведенных аналитических и экспериментальных исследований гидрогазодинамических процессов в залежи для условий упругого и упруговодонапорного режимов работы установлены характерные показатели, определяющие работу хранилища газа в период циклов "отбор-закачка". На основе анализа результатов исследований установлено, что характерным признаком режима работы залежи является безразмерное время эксплуатации, которое определяется через коэффициент пьезопроводности пористой среды, геометрические характеристики продуктивного горизонта и реальное время технологического процесса. Определено критическое значение безразмерного времени, численно равное 0,5, превышение которого в технологическом процессе отбора или закачки требует для расчета прогнозных показателей применения методики расчета нестационарной

фильтрации жидкости и газа. При значениях безразмерного времени, которые не превышают критической величины, возможно и оправдано применение упрощенной методики прогнозирования, базирующейся на уравнениях стационарной фильтрации жидкости и газа. Исходя из сказанного, предложены методы расчета прогнозных параметров работы подземного хранилища газа для условий упругого или упруговодонапорного режимов для процессов стабилизации давления в хранилище, закачки газа в пласт или его отбора.

Предложена методика расчета режимов формирования и циклической эксплуатации хранилищ в структурах с подвижными контурными водами, которая утверждена в качестве руководящего документа НАК "Нафтогаз України" Прогнозирование режимов работы подземных хранилищ газа на основании предложенной методики производится в УМГ "Львовтрансгаз" и "Прикарпаттрансгаз".

Ключевые слова: депрессия давления, скорость фильтрации, проницаемость.