

Міністерство освіти і науки України

**Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу**

На правах рукопису

ЗАЄЦЬ ВІКТОР ОЛЕКСАНДРОВИЧ

УДК 621.438:622

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПІДЗЕМНИХ
СХОВИЩ ГАЗУ В БАГАТОПЛАСТОВИХ ПОКЛАДАХ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ

Дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: **Тимків Дмитро Федорович** доктор технічних наук, професор, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри інформатики.

Офіційні опоненти:

Капцов Іван Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації газових і теплових систем Харківського національного університету міського господарства ім. О. М. Бекетова, м. Харків;

Братах Михайло Іванович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділом транспортування газу Українського наукового дослідного інституту природних газу (УкрНДІгаз), м. Харків

Захист відбудеться «22» жовтня 2015 р. о 15 год 00 хв на засіданні спеціалізованої вченої ради в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою:
76019, Україна, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

З дисертацією можна ознайомитись в науково-технічній бібліотеці Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, Україна, Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий «11» вересня 2015 року

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
кандидат технічних наук, доцент

Л. Д. Пилипів

ВСТУП

Актуальність теми. Одним із найважливіших технологічних елементів газотранспортної системи України, який забезпечує її надійну та безперервну роботу, є створені на базі виснажених газових і газоконденсатних родовищ, водоносних пластів підземні сховища газу (ПСГ), розташовані в усіх нафтогазових провінціях країни на глибині від 400 до 2000 м.

На сьогодні Україна має розвинуту мережу підземних сховищ природного газу, потенційні можливості якої є значними. Загально досягнута активна ємність підземних сховищ становить більше 24 млрд. м³ газу, що відповідає 70 % проектної величини, а їх сумарна можлива максимальна продуктивність на початок сезону відбирання дорівнює близько 327 млн. м³/доб. Проте, мережа сховищ у системі газопостачання України розосереджена нерівномірно. Західноукраїнський комплекс підземних сховищ газу (ПСГ) є найбільш потужним комплексом сховищ в Україні, який задовольняє потреби Західного регіону країни як з точки зору необхідних об'ємів зберігання газу, так і з точки зору їх продуктивності. Він забезпечує надійність постачання газу не тільки в західному регіоні, а й транзитних поставок експортного газу в країни Західної та Східної Європи. В той же час в інших регіонах України (Північному, Центральному, Східному та Південному) існує значний дефіцит потужностей підземного зберігання газу. Особливо це стосується Східного регіону та Подніпров'я, де зосереджений найбільший промисловий потенціал країни, а надійність постачання газу в осінньо-зимовий періоди недостатня.

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, які спрямовані на вивчення формування газонасиченого об'єму покладу, виявлення особливостей прояву пружноводонапірного режиму під час циклічної експлуатації сховища, визначення впливу покладу на водоносну зону пласта є актуальними проблемами підвищення надійності газопостачання.

Враховуючи геостратегічне положення України та впровадження в її економіку ринкових відносин, наявність значної потужності сховищ в західному регіоні дає можливість створювати в майбутньому необхідні резерви природного газу для країн Східної Європи, де є обмежені можливості для його підземного зберігання.

На основі викладеного стає нагальною необхідністю розробка концепції функціонування і розвитку системи підземних сховищ природного газу України, зокрема, в її східному, центральному та південному регіонах, тому дана проблема є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів Національної акціонерної компанії "Нафтогаз України" та ПАТ «Укртрансгаз», спрямованих на розробку і удосконалення методів розрахунку технологічних параметрів ПСГ на стадії їх формування та циклічної експлуатації і окреслених Національною програмою "Нафта і газ України до 2030 року".

Мета і задачі досліджень. Вивчення закономірностей протікання гідрогазодинамічних процесів в пористому середовищі з метою підвищення ефективності експлуатаційних параметрів для якісного прогнозування процесів формування і циклічної експлуатації підземних сховищ газу в виснажених газових, газоконденсатних покладах і водоносних пластах в убагаченопластових ПСГ.

Поставлена мета реалізується через вирішення наступних задач:

- 1 Провести аналіз роботи існуючих однопластових і багатопластових підземних сховищ газу
2. Дослідити теоретичні передумови розробки методів моделювання багатопластових підземних сховищ газу.
3. Розробити режими роботи для ефективного використання підземних сховищ газу.
4. Провести промислову апробацію оптимізаційних режимів роботи підземних сховищ газу на основі розроблених методів і способів.

Об'єкт досліджень – підземні сховища газу України, створені в виснажених газових, газоконденсатних покладах та водоносних пластах із пружноводонапірним режимом експлуатації.

Предмет дослідження - газогідродинамічні процеси в пористому середовищі багатопластового покладу ПСГ під час його формування та циклічної експлуатації.

Методи дослідження: математичне моделювання нестационарних процесів у покладах ПСГ, статистичні й експериментальні дослідження процесів взаємного витиснення води газом у пористому середовищі. диференційні й інтегральні обчислення, симплекс - метод.

Положення, що виносяться на захист. Закономірності впливу основних параметрів циклічної експлуатації в багатопластових газосховищах на створення оптимальних режимів.

Наукова новизна проведених досліджень полягає в наступному:

вперше

- розроблено математичну модель оптимізації основних параметрів циклічної експлуатації багатопластового сховища в водоносній структурі;

- на основі експериментальних досліджень проведено моделювання процесів експлуатації підземних сховищ;

- проведено моделювання режимів роботи при нагнітанні та відборі газу в багатопластових покладах.

удосконалено

- адаптивну математичну модель формування та циклічної експлуатації ПСГ в умовах пружноводонапірного режиму, яка дозволяє прогнозувати параметри роботи сховища в період циклів "відбирання-нагнітання";

- дослідження теоретичних передумов для розробки методів формування багатошарових покладів;

- методи та способи підвищення техніко – економічних показників ефективності роботи газосховищ.

Практичне значення одержаних результатів.

Задачі, які розв'язувались у дисертаційній роботі, а також отримані результати дозволили розробити методи та способи створення й експлуатації підземних сховищ газу, методичку розрахунку технологічних режимів роботи ПСГ, створених у газових, газоконденсатних покладах і водоносних структурах та регулювання їх у процесі циклу "відбирання - нагнітання". За результатами досліджень газосховищ розроблено та видано комплексну галузеву методичку «Методи розрахунку оптимальних техніко-економічних показників експлуатації підземних сховищ газу України ».

Розроблені рекомендації з регулювання режимів роботи ПСГ впроваджено в практику на об'єктах ПАТ «Укртрансгаз»

Особистий вклад автора в одержанні наукових результатів.

1. Автором запропоновано та створено математичну модель оптимізації технологічних параметрів циклічної експлуатації підземних сховищ газу при газовому режимі їх роботи. Для цього визначена цільова функція, котра виражає необхідну потужність компресорної станції для нагнітання газу в сховище. Мінімізація її дозволить знайти необхідні технологічні параметри, витрату та шаровий тиск, що змінюються в часі [1,3,9, 15].

2. Автором розроблено модель перетікання газу при одночасному розкритті в експлуатаційних свердловинах перфорацією двох потенційних об'єктів для підземного зберігання газу, при якому відбувається сполучення між горизонтами, внаслідок чого проходить перетікання газу [5,6,8]; можливість перетікання газу з вищезалігаючого в нижчезалігаючий горизонт, яка визначається різницею їх початкових шарових тисків із додаванням тиску, що утворюється стовпом газу з верхнього горизонту в нижній; геогідродинамічний контроль режимів роботи при експлуатації багатошарових підземних сховищ газу [2,17].

3. На основі аналітичних досліджень автором доведено, що при створенні підземного сховища газу в виснажених газоносних або водоносних пластах на етапі промислового розбурювання необхідно проводити уточнення геологічної моделі об'єкта. Це дозволяє визначити колекторські та фільтраційно-ємнісні властивості продуктивного пласта, характер поведінки водонапірної системи, а також динаміку руху газоводяного контакту (ГВК) на об'єкті підземного зберігання газу. Отримані геолого-промислові дані дозволяють більш якісно прогнозувати основні показники створеного ПСГ, визначити напрямки робіт по якісному розкриттю пласта-колектора та

підвищенню продуктивності експлуатаційних свердловин, розробляти оптимальну технологічну схему дослідно-промислового нагнітання газу[3,4,20].

4. Автором розроблено математичну модель експлуатації підземних сховищ газу, створених у водоносних пластах в умовах проявлення пружноводнапірного режиму експлуатації для утримання постійної величини газонасиченого порового простору й унеможливлення обводнення або розширення (розтікання) штучного газового покладу. Модель дозволяє прогнозувати та проводити коригування тривалості нейтрального періоду з урахуванням зміни проектних показників – максимального та мінімального пластового тиску, активного та загального об'ємів зберігання газу[31,14,69].

5. Здобувач брав участь у впровадженні результатів досліджень одержаних в роботі на підземних газосховищах Південного та Східного регіонах.

6. При безпосередній участі автора розроблено чотири патенти на винахід [7,9,10,11], чотири патенти на корисну модель [8,12,13,14], чотири деклараційних патенти на винахід [15,16,17,18].

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

- Міжнародній науково - практичній конференції "40 років підземному зберіганню газу в Україні " (Яремче, 2 – 4 червня, 2004);
- - Международной научной конференции "ПХГ: надежность и эффективность".(Москва, ВНИИГАЗ, 21-22 мая 2008 г.);
- Техническом совещании по вопросу «Ход выполнения работ по обеспечению промышленной безопасности объектов подземного хранения газа ОАО «Газпром» в 2008 году. Задачи на 2009-2013 гг.» (Санкт-Петербург, Стрельна, 17-20 июня 2008 года);
- Міжнародній науковій конференції “Нафтогазовий комплекс України як складова енергетичної безпеки Європи»(Київ, 04-06 листопада 2008 р.);
- 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)
- Матеріали науково – практичного семінару НАК «Нафтогаз України» - Чиказький інститут газових технологій: Перспективи співробітництва, Київ. 3 – 4 березня 2005 р.
- Матеріали виробничої наради «Виконання затвердженої НАК «Нафтогаз України» дострокової «програми реконструкції, модернізації та переозброєння підземних сховищ газу ДК «Укртрансгаз»», Яремче 17-20 квітня 2007 р.
- Матеріали Міжнародної конференції «Нафтогазовий комплекс України: надійність, стабільність і перспективи», Київ, 7-8 листопада 2007 р.

- Матеріали 8-ої міжнародної науково-практичної конференції «Нафта і газ України-2004. – Судак, 29 вересня – 1 жовтня 2004р. – том 2. – Київ 2004. – С. 148-150.

- Материалы совещания «Обеспечение промышленной безопасности объектов подземного хранения газа ОАО «Газпром». Результаты работы в 2007 г. и ход выполнения работ в 2008г.». – Санкт-Петербург. – июнь 2008г., Москва. – 2008. – С. 56-59.

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

Публікації. За темою дисертації опубліковано 6 друкованих праць, із них 6 у фахових виданнях України (одна одноосібна та одна зарубіжна, що входить до наукометричної бази даних SCOPUS), 2 у матеріалах конференцій, чотири патенти на винахід, чотири патенти на корисну модель, чотири деклараційних патенти на винахід.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, 4 розділів, підсумкових висновків та переліку використаних джерел, що містить 102 найменувань. Основний зміст викладено на 129 сторінках машинописного тексту і містить 22 рисунки, 21 таблицю і 5 додатків.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, подано зв'язок роботи з науковими програмами, викладено новизну та практичне значення досліджень, особистий внесок, апробацію та її структуру.

В першому розділі зроблено аналіз світового досвіду підземного зберігання газу, приведено дані кількості світових сховищ і їх основні характеристики, основою яких є мережі у вичерпаних нафтогазових покладах (86,4% активної ємності) і які забезпечують найбільшу сумарну подачу газу, що складає 74,2% добової продуктивності. Проведено аналіз формування газосховищ в Україні, в якому виділено 4 регіони зберігання газу: західний, центральний, східний і південний. Подано аналіз можливостей кожного з газосховищ по всіх регіонах.

Досвіду створення газосховищ, а також особливостям їх експлуатації з метою специфікації досліджень експлуатаційно-нагнітальних свердловин, оптимізації параметрів і режимів роботи присвячені роботи як вітчизняних так і зарубіжних вчених. Серед них слід виділити роботи: Б. Б. Лапука, І. А. Чарного, Г. І. Задори, Є. М. Мінського, Ю. П. Коротаєва, Г. А. Зотова, А. І. Ширковського, Ю. П. Желтова, С. Н. Закірова, К. С. Баснієва, С. Н. Бузінова, Д. Катца, Д. Корнелла, А. В. Баранова, С. Н. Бузінова, В. П. Карпова, І. Я. Фурмана, Л. Н. Паллера, Б. Д. Карлінського, Р. Ф. Гімера, Б. П. Савківа, Г. І. Солдаткіна, М. В. Сидоренко, А. Н. Федутенкова, Г. Д. Лебедева, Р. Рейніша, Є. О., Пінчука, М. Р. Тека, Г. Г. Гершановича, Е. В. Левикіна, М. І. Філінова та інших дослідників.

Результати аналізу газосховищ України показали, що одним із основних критеріїв стабільної експлуатації ПСГ є відповідність величини поточного пластового тиску, визначеного після завершення сезону відбирання або закачування газу, величині мінімального (наприкінці сезону відбирання) або максимального (наприкінці сезону закачування) проектного пластового тиску. Виникнення невідповідності величини поточного пластового тиску щодо величини мінімального або максимального проектного пластового тиску пов'язане, зокрема, з геолого-літологічними та газогідродинамічними особливостями експлуатації газосховища. А зниження тиску від циклу до циклу при незмінній величині буферного об'єму газу в пласті-колекторі призводить до порушення технологічного режиму експлуатації ПСГ. На ПСГ, які експлуатуються на базі виснажених газових або газоконденсатних покладів, найбільш розповсюдженим негативним явищем, що призводить до зниження величини поточного пластового тиску наприкінці сезону відбирання (закачування) газу порівняно з проектною величиною, є утворення слабодренованих, так званих "застійних" зон. Слабодреновані зони поступово акумулюють активний об'єм газу за рахунок його відтоку з активнодренованої зони під час циклічної експлуатації ПСГ. На ПСГ, створених у водоносних пластах, основним негативним фактором, що призводить до зниження величини поточного пластового тиску наприкінці сезону відбирання (закачування) газу, є збільшення величини газонасиченого порового простору або поточного коефіцієнту газонасиченості в пласті-колекторі.

В другому розділі проведено дослідження для розробки методології формування багатопластових підземних сховищ газу (ПСГ).

В умовах складної літологічної будови газовміщуючих колекторів і багатопластовості об'єктів ПСГ інтерпретація геолого-промислових матеріалів за результатами розробки родовища ускладнена недостатністю вихідних даних; інформація є неповною для якісного прогнозування основних показників створюваного ПСГ у зв'язку з малою кількістю свердловин, що експлуатували поклади.

Крім того, при зниженні пластового тиску в покладі можливий прояв структурних змін у породах пласта-колектора, зміна газонасиченого порового об'єму, рух і підняття контурних і пластових вод, а також виникнення інших геологічних і фізико-хімічних змін, зафіксувати які в процесі розробки не вдається.

Щодо умов створення газосховища на базі багатопластових покладів і з урахуванням методів отримання геолого-промислової інформації для прогнозування показників експлуатації ПСГ необхідно виділити чотири категорії даних: геологічні, геофізичні, гідрогеологічні і газогідродинамічні.

Дотримуючись цієї класифікації при проведенні дослідно-промислового закачування газу за результатами геофізичних, газогідродинамічних досліджень і структурно-геологічних побудов отримують дані, за допомогою яких необхідно уточнювати літологічну, геолого-промислову, фільтраційно-ємнісну та газогідродинамічну

характеристики багатопластового покладу. На основі дослідних даних можна проводити розрахунки темпів створення та прогнозних показників циклічної експлуатації, визначати напрямки та розробляти ефективні газогідродинамічні методи експлуатації штучних газових покладів складної геологічної будови, а також розробляти нові способи створення й експлуатації багатопластових підземних газосховищ.

Проводились дослідження особливостей циклічної експлуатації багатопластового Пролетарського сховища. Одночасно з газодинамічним моделюванням підземного зберігання газу постійно здійснювалась оперативна оцінка запасів газу в продуктивному горизонті М-7. Для цього застосовувався метод годографа, який характеризується відносною простотою та наочністю.

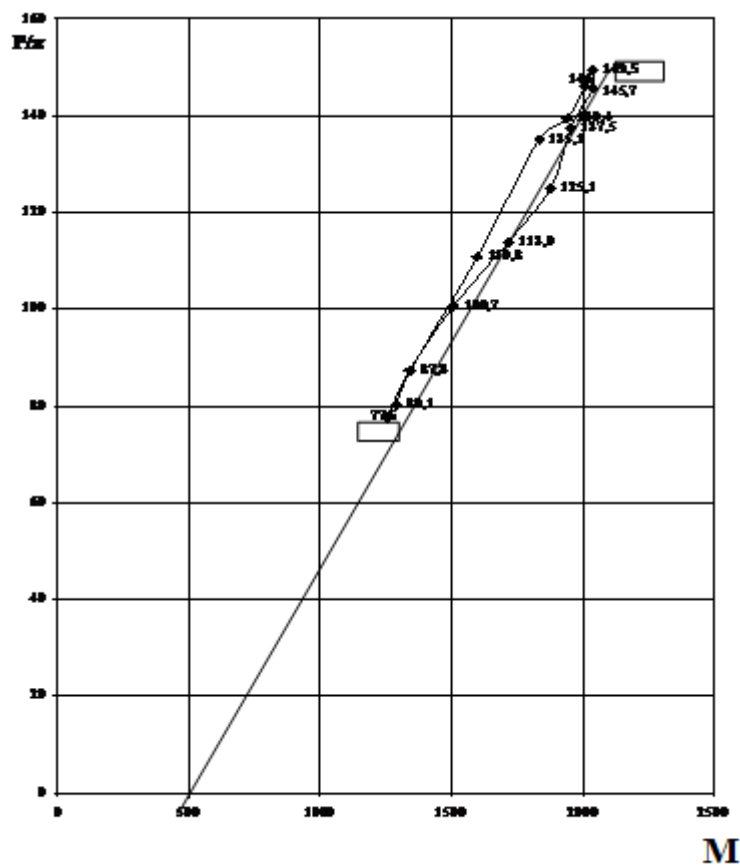


Рисунок 1 – Годограф Пролетарського ПСГ за 2000-2001 рр

Метод годографа базується на використанні балансової моделі штучного газового покладу в цілому або його модифікацій для окремих частин покладу. Він дозволяє проводити деяку інтегральну оцінку величини, розподілу та стану дренажних (недренажних) об'ємів газу по окремих частинах газового покладу та сховища в цілому. Для побудови графіка залежності $M = f \left[\frac{P}{z} \right]$ використовуються балансові об'єми газу в сховищі та середньозважені пластові тиски наприкінці кожного місяця (рисунок 1).

Одночасно проводились дослідження процесів зміни тиску під час нагнітання та відбирання газу з ПСГ. Згідно цих результатів отримано математичні моделі у вигляді поліноміальних залежностей:

$$\text{для нагнітання } P/z = -11,753242 + 0,013198 \cdot Q - 2,547419 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2$$

$$\text{для відбирання } P/z = 5,222301 - 2,927933 \cdot 10^{-3} \cdot Q + 1,168073 \cdot 10^{-6} \cdot Q^2$$

За результатами геофізичних досліджень, отриманих під час буріння свердловин, уточнено положення газоводяного контакту та газонасичений об'єм.

Дослідження гідродинамічно невідосконалених свердловин показало, що на їх продуктивність впливає ступінь розкриття, а також визначення коефіцієнта невідосконалості; виявлено, що величина коефіцієнта невідосконалості істотно зменшується в інтервалі відносного розкриття:

$$\bar{h} \geq 0.5; \quad \left(\bar{h} = \frac{h_p}{h_e} \right), \quad (3)$$

де h – величина відносного розкриття, м., h_p – розкрита газонасичена товщина, м., h_e – ефективна газонасичена товщина, м.

Тому, дебіт невідосконалої свердловини при $\bar{h} = 0.5 - 0.6$ становить 80% дебіту досконалої свердловини. В результаті проведення експериментальних робіт із виявлення впливу невідосконалості розкриття пласта за характером і ступенем на продуктивність газових свердловин, було встановлено, що відносний дебіт прямопропорційно зростає зі збільшенням площі перфорації лише до досягнення певної величини.

Тому, рекомендується використовувати меншу кількість перфораційних отворів, але більшого діаметра; розкривати не більше 50% всієї газонасиченої товщини за відсутності пластової води і до 35 % – за її наявності

Третій розділ присвячено розробці оптимальних параметрів режимів циклічної експлуатації в багатошарових покладах підземних сховищ газу на основі розроблених математичних моделей.

При створенні газосховища в будь-яких гірничо-геологічних умовах його параметри визначаються верхньою та нижньою межею пластового тиску. Враховуючи особливості будови пласта-колектора, характер розміщення експлуатаційних свердловин по площі, обладнання сховища системою підготовки газу та параметри роботи компресорної станції, показники циклічної експлуатації розраховані для багатошарових підземних сховищ газу.

Розрахунки основних технологічних параметрів експлуатації багатошарових сховищ, створених у виснаженому газоконденсатному покладі при газовому режимі, виконані методом послідовної зміни стаціонарних умов, що полягає в спільному розв'язуванні системи рівнянь. А саме: рівняння матеріального балансу, припливу газу до вибою свердловини, руху газу по стовбуру свердловини, руху газу по шлейфах (рисунк 2).

Рівняння матеріального балансу визначає динаміку пластового тиску в процесі відбирання чи закачування газу:

$$V(t) = \frac{\bar{P}_1 \sigma_1}{Z_1 P_{am}} \Omega_1 + \frac{\bar{P}_2 \sigma_2}{Z_2 P_{am}} \Omega_2, \quad (5)$$

де $V(t)$ – об'єм газу, приведений до нормальних умов на момент часу t ;

\bar{P}_1, \bar{P}_2 – середні пластові тиску в першій і другій зонах;

Z_1, Z_2 – коефіцієнти стисливості, відповідні тискам \bar{P}_1, \bar{P}_2 ;

$\sigma_1, \Omega_1, \sigma_2, \Omega_2$ – газонасичені обсяги порового простору в першій і другій зонах.

Дебіт свердловини розраховуються за умовами поточних коефіцієнтів фільтраційних опорів, депресії та пластового тиску шляхом вирішення рівняння фільтрації газу в при вибійній зоні свердловини:

Рівняння руху газу по вертикальних трубах дає можливість визначити втрати тиску в ліфтових трубах і в загальному вигляді воно має вид:

Алгоритм оптимізації основних параметрів циклічної експлуатації підземних багатопластових газосховищ наступний:

1. Диференціюючи рівняння (5) за часом і відобразивши отримані функції дебіту газу та пластового тиску в кусково-лінійній формі, отримуємо рівняння (6) у лінеаризованій формі:

$$\alpha_1(\ell) \cdot q(\ell) + \alpha_2(\ell) \cdot q(\ell + 1) + \alpha_3(\ell) \cdot P(\ell) + \alpha_4(\ell) \cdot P(\ell + 1) = 0, \quad (6)$$

де $\alpha_1(\ell), \alpha_2(\ell), \alpha_3(\ell), \alpha_4(\ell)$ – деякі коефіцієнти (далі всі коефіцієнти будемо позначати через α із деяким символом); ℓ – номер інтервалу розбивки.

2. Обмеження забійного тиску:

$$P_3(\ell) = P(\ell) + a_5(\ell)q(\ell) \leq P_{3.макс}. \quad (7)$$

У даному прикладі максимальний забійний тиск визначався відповідно до межі міцності свердловинного обладнання.

3. Обмеження тиску на виході компресорної станції при закачуванні газу:

$$P_4(\ell) = \alpha P(\ell) + a_6(\ell)q(\ell) \leq P_{4.макс}, \quad (8)$$

де α – коефіцієнт, що характеризує втрати тиску по стовбуру свердловини; визначається за відомою формулою руху газу по вертикальній трубі. Тут обмеження вибиралося аналогічно обмеженню п. 3.

4. Обмеження пропускної здатності КС:

$$q \leq \frac{N_{уст}}{f(P_H, P_B)}, \quad (9)$$

де $N_{уст}$ – установочна потужність КС;

$f(P_H, P_B)$ – функція, що характеризує зв'язок потужності КС, витрати газу через неї й тиску нагнітання та всмоктування (P_H, P_B). Приймалося за умову адіабатичне стискування.

Функцію $f(P_H, P_B)$ потрібно розкласти в ряд Фур'є, в якому вона (з урахуванням того, що функція тиску є кусково-лінійною функцією) визначається номером інтервалу розбиття функції пластового тиску по циклу

роботи сховища (у нашому випадку по періоду закачування газу). Після деяких перетворень отримуємо вираз

$$a_7(l) \cdot P(l) + a_8(l) \cdot q(l) \geq a_9(l). \quad (10)$$

5. Обмеження на витрату газу знизу і зверху:

$$q(l) \leq q_{\max}(l); \quad q(l) \geq q_{\min}(l). \quad (11)$$

Ці обмеження зумовлюють зв'язок роботи ПСГ із вимогами споживача та постачальника (магістрального газопроводу). Значення $q_{\max}(l)$ і $q_{\min}(l)$ вважаємо заданими (максимальний дебіт при закачуванні визначався ресурсами газу в постачальника, а при відборі були обмеження у відповідності до вимог споживачів).

6. Умова подачі газу споживачеві:

$$P_4 \geq P_5, \text{ якщо у відборі не бере участі КС};$$

$$P_5 \geq P_6, \text{ якщо у відборі бере участь КС};$$

Виражаючи в цій нерівності $P_5(P_4)$ через пластовий тиск (P) і витрату газу (q) і враховуючи, що $P_6(P_5)$ задано, отримуємо цю нерівність у вигляді

$$\alpha \cdot P(l) + a_{10}(l) \cdot q(l) \leq a_{11}(l) \quad (12)$$

7. Умова циклічності експлуатації сховища:

$$\sum_{l=1}^{l=5} q(l) = \sum_{l=s+1}^{l=2N} q(l) \quad (13)$$

Ця умова характеризує рівність обсягів закачування та відбирання газу. У формулі (9) $2 \cdot N$ – число розбиття циклу роботи підземного сховища газу на інтервали кусково-лінійної функції витрат газу та тиску в пласті.

Отже, рівняння та нерівності (5)– (13), об'єднані в систему, визначають обмеження оптимізації, яку для завершеності задачі слід доповнити цільовою функцією. Всі витрати на зберігання газу визначаються необхідною потужністю КС:

$$Nkc(t) = \frac{m}{m-1} P(t)q(t)(\varepsilon^{\frac{m-1}{m}} - 1), \quad (21)$$

де $m = 0,3 \div 0,4$, ε – ступінь стиску газу.

Виконані розрахунки дозволили знайти оптимальну витрату (рисунок 3) і тиск у ПСГ (рисунок 4). Активний обсяг газу склав 660 млн. м³ при обсязі газу в пласті 835 млн.м³. Такий значний відсоток активного об'єму (80%) відносно загального визначився завдяки низькому тиску в магістральному газопроводі (2,0, МПа) при відборі та високому тиску, наприкінці закачки (10,5 МПа).

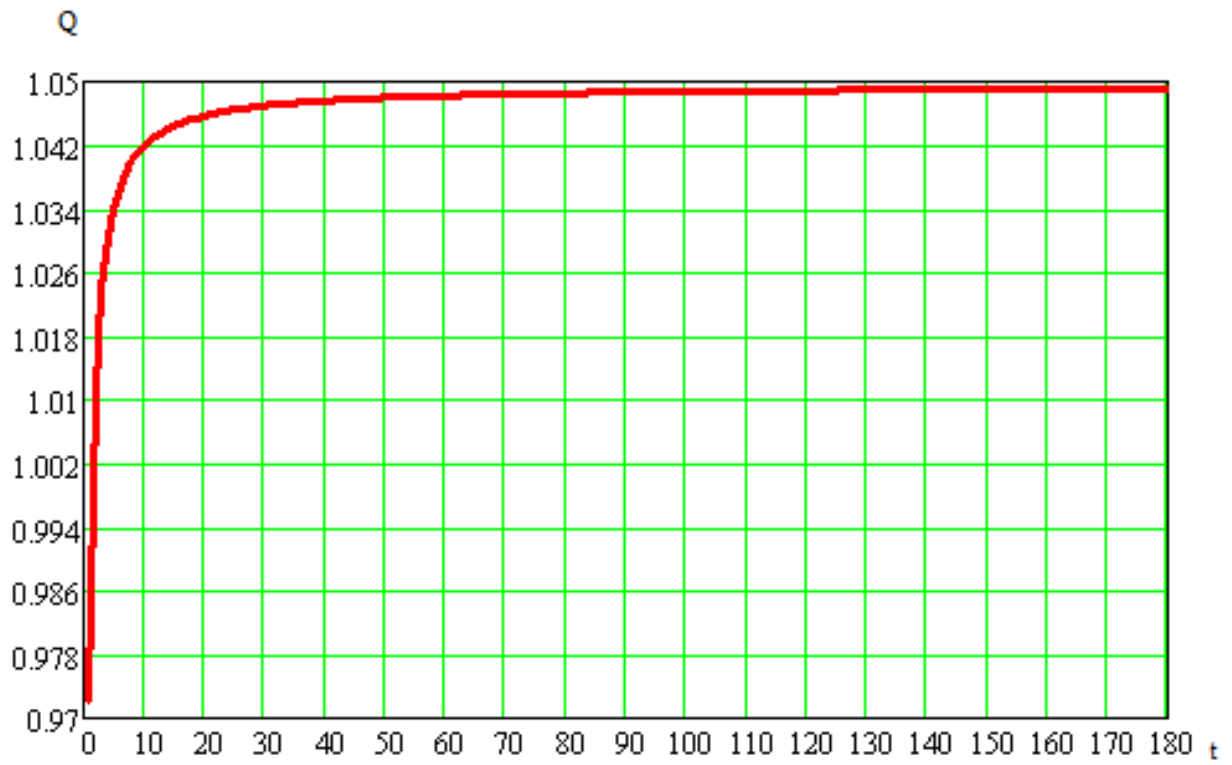


Рисунок 3 – Зміна витрати газу при нагнітанні

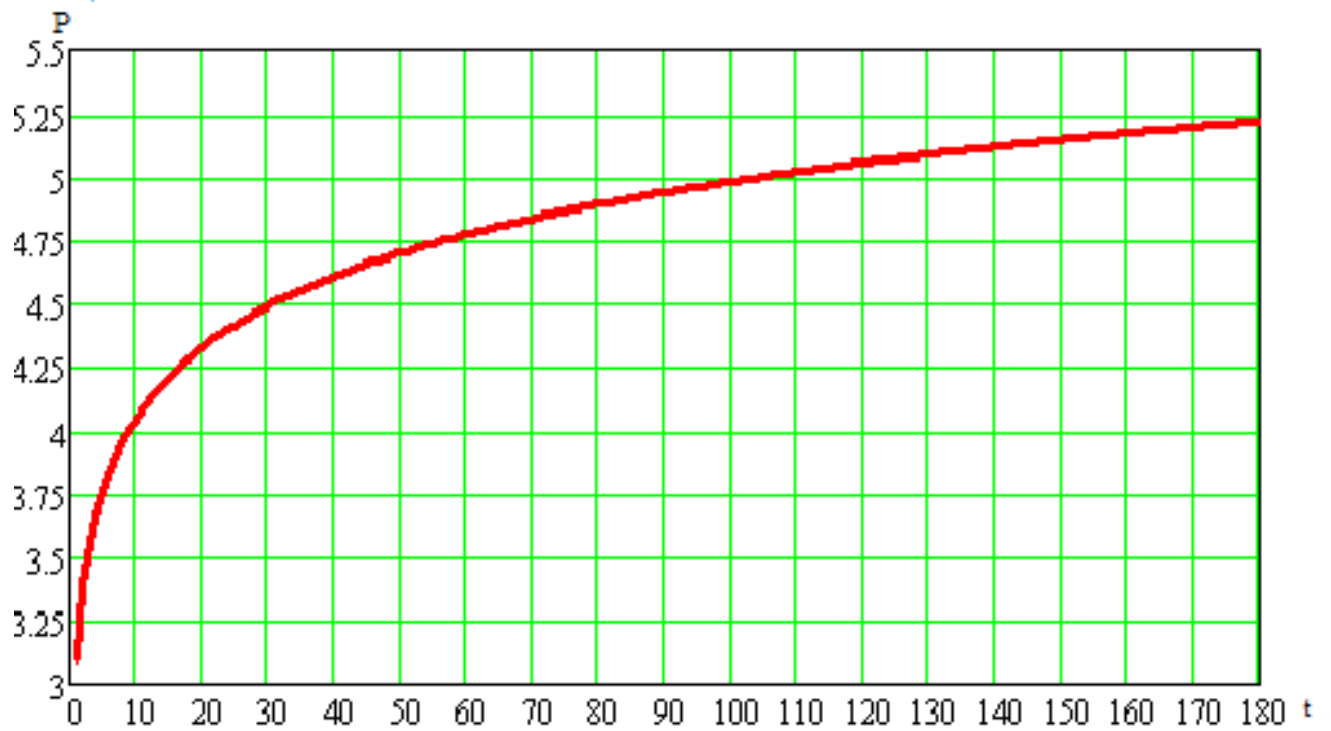


Рисунок 4 – Зміна тиску газу при нагнітанні

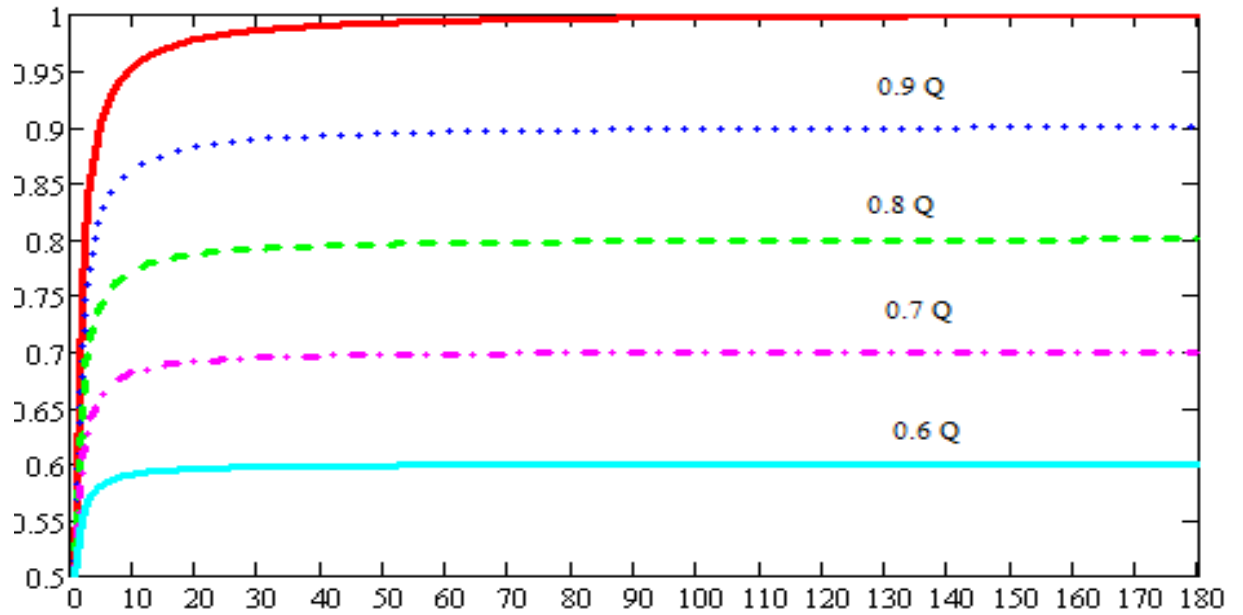


Рисунок 5 – Зміна витрати газу при нагнітанні газу на Пролетарському ПСГ

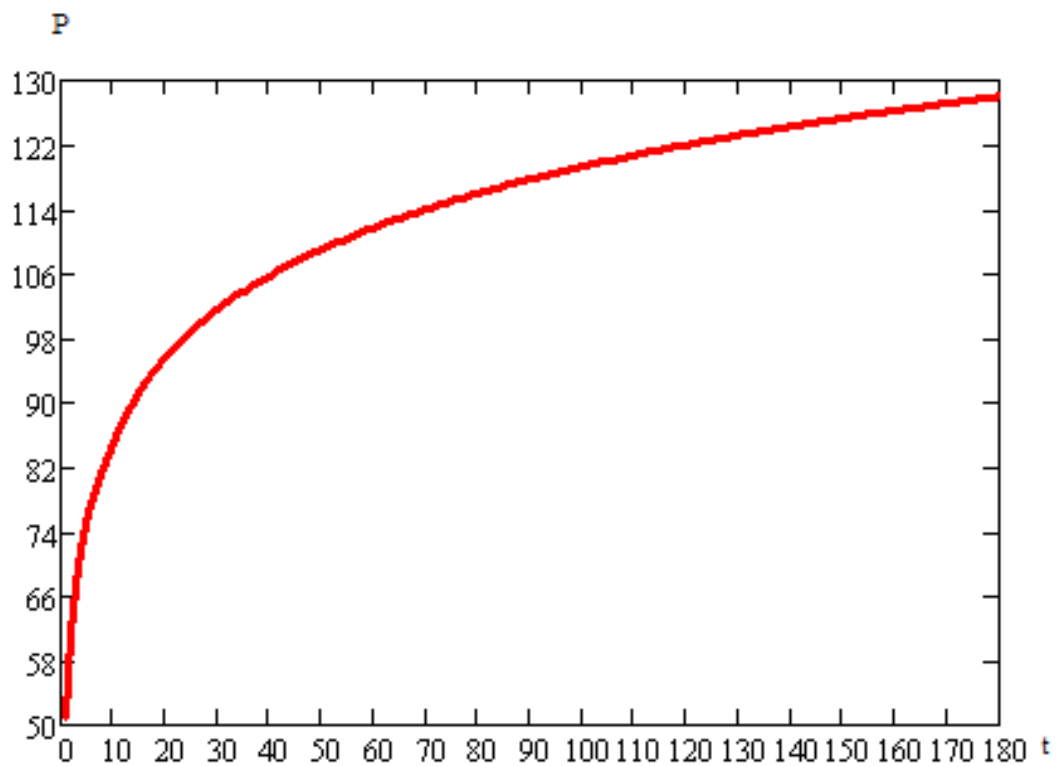


Рисунок 6 – Зміна тиску газу при нагнітанні на Пролетарському ПСГ

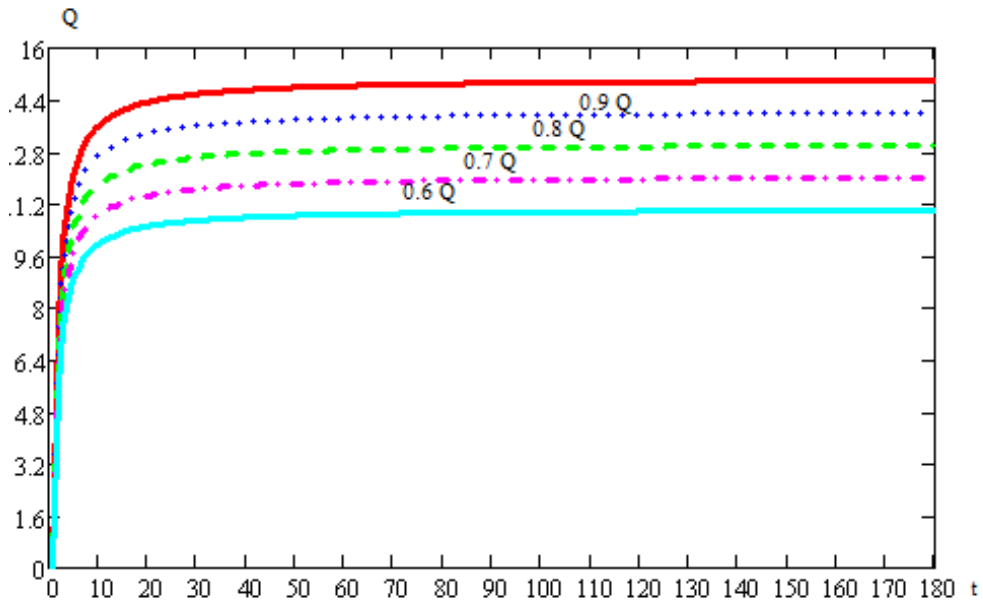


Рисунок 7 – Зміна витрати газу при нагнітанні газу на Червонопартизанському ПСГ

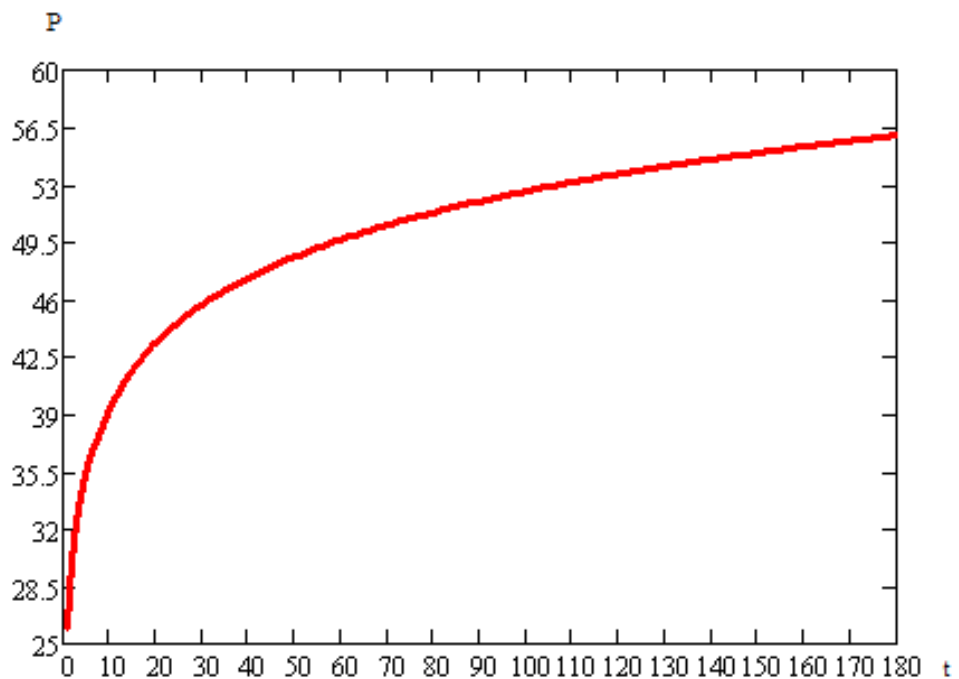


Рисунок 8 – Зміна тиску газу при нагнітанні на Червонопартизанському ПСГ

Запропонована модель дозволяє визначати оптимальні технологічні показники підземного газосховища на час його циклічної експлуатації. Її можна використовувати для розрахунку показників газосховищ, що експлуатуються в газовому режимі.

Вдосконалено метод кількісної оцінки об'єму перетікань газу в багатошарових сховищах, в основу якого покладено визначення добового дебіту газу під час перетікань у свердловинах для спільної експлуатації, з наступним визначенням щомісячного обсягу і далі за весь час існування перетоків, який ґрунтується на різниці значень трубного і затрубного тисків, при відомому коефіцієнті гідравлічного опору λ . Розширено геогідродинамічний контроль експлуатації багатошарових сховищ, який базується на уточненні геологічної побудови покрівлі штучного покладу за даними про міграцію газу в його осередку розсіювання і запобіганні ризику його негерметичності. Розроблено модель процесу експлуатації сховищ газу. Даний процес починається в умовах пружно-водонапірного режиму і включає в себе закачування буферного й активного об'ємів газу в підземне сховище, створене у водоносній структурі, для стабілізації порового тиску при мінімальному тиску за час, після якого починається нейтральний період, що триває протягом часу, необхідного за технологічними та технічними показниками. Після цього починається період відбирання активного об'єму газу від максимального тиску до величини пластового гідростатичного тиску, за яким настає нейтральний період. Його термін визначається шляхом розрахунків. Коригування проводиться як після закачування, так і після періоду відбирання газу.

В четвертому розділі вдосконалено методи та способи підвищення техніко – економічних показників експлуатації сховищ газу. Одним із таких методів є введення регульованого закачування інертного газу у низькопроникну частину пласта-колектора. Додаткові об'єми природного газу, які одержують в результаті закачування інертного газу як буферного, відбирають із високопроникної частини пласта-колектора. Це дає можливість відбирати додаткові об'єми природного газу, мінімізувати процес дисперсії газів і забезпечити необхідну якість природного газу, який відбирають із ПСГ у процесі експлуатації.

Другим таким методом є метод оптимального регулювання об'ємів нагнітання та відбирання газу, а також пластових тисків усіма свердловинами в будь-який період створення чи експлуатації багатошарових сховищ. Цей метод включає виділення в геологічному розрізі декількох пластів-об'єктів для зберігання газу, буріння експлуатаційно-нагнітальних свердловин, обладнання їх обсадною, експлуатаційною та ліфтовою колонами, нагнітання у виділені пласти і відбирання з них з газу. Відрізняється тим, що експлуатаційну колону перфорує в інтервалах усіх виділених пластів і встановлюють пристрій для спільно-роздільної експлуатації; нагнітання газу та його відбирання проводять одночасно по всіх пластах через експлуатаційно-нагнітальні свердловини, а регулювання об'ємів нагнітання чи відбирання газу по кожному пласту здійснюють за допомогою пристрою для спільно-роздільної експлуатації.

Способи створення і експлуатації підземних сховищ газу у виснажених газоносних і водоносних пластах полягають в наступному. При створенні й експлуатації сховищ газу в виснаженому газоносному пласті,

бурять експлуатаційні, спостережні та контрольні свердловини, будують компресорну станцію. Експлуатаційні свердловини повинні розкривати пласт–об’єкт і нижчезалягаючий водоносний горизонт. Для забезпечення можливості перепускання води, перфорацією розкривають водоносний горизонт і нижню частину газоносного пласта–об’єкта. В експлуатаційних свердловинах, над нижнім інтервалом перфорації газоносного горизонту, встановлюють герметичний пакер або висячий цементний міст і розкривають перфорацією верхню частину газонасиченого пласта–об’єкта. Ліфтову колону спускають до середини інтервалу перфорації верхньої частини газоносного пласта, через який здійснюють експлуатацію газосховища. При відбиранні газу по експлуатаційних свердловинах, за рахунок перепускання води з водоносного горизонту в газоносний пласт–об’єкт через нижній інтервал перфорації в експлуатаційній колоні, відбудеться підвищення пластового тиску в штучному газовому покладі.

ОТРИМАНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених у дисертаційній роботі експериментальних і теоретичних досліджень вирішена задача розробки концепції функціонування та визначення основних параметрів для оптимального керування роботою підземних сховищ газу, створених у газових, газоконденсатних покладах і водоносних пластах, із урахуванням складної будови газоміщуючих колекторів і багатопластовості об’єктів. На основі результатів розроблена концепція, яка характеризується наступними висновками:

1. Удосконалено методи годографа для визначення геотехнологічної еволюції продуктивного горизонту в умовах пружноводонапірного режиму з метою отримання інтегральної оцінки розподілу та стану дренажних об’єктів газу в окремих частинах пласта та сховища в цілому.

2. На основі аналізу геолого-промислових досліджень створених багатопластових сховищ показано, що оптимальний інтервал розкриття продуктивного пласта повинен складати не більше 50% газонасиченої потужності за відсутності пластових вод і не більше 35% за їх наявності, при цьому раціональна кількість перфораційних отворів знаходиться в межах 20-24 од./п.м.

3. Удосконалено метод кількісної оцінки об’єму перетікань газу в багатопластових сховищах для коректування дебіту свердловин спільної експлуатації пластів і оцінки довготривалого обсягу перетоків, який ґрунтується на результатах вимірювання тисків у передтрубному та затрубному просторі, коригуванні коефіцієнтів фільтраційного опору кожного з продуктивних горизонтів.

4. З метою забезпечення раціональних режимів експлуатації багатопластових газосховищ створено математичну модель технологічного ланцюга від пласта-колектора до магістрального газопроводу, який включає

дотискувальну компресорну станцію, що забезпечує ефективну експлуатацію комплексу і дозволяє збільшити продуктивність у процесі відбору до 15%.

5. При експлуатації підземних сховищ газу в умовах пружно-водонапірного режиму задля підтримання сталої величини газонасиченого порогового простору та запобігання розтіканню штучного покладу запропоновано прогнозувати і коректувати тривалості нейтрального періоду з урахуванням змін проектних потужностей максимального та мінімального пластового тиску активного й загального об'ємів зберігання газу, використовуючи адаптивну математичну модель і комплекс алгоритмів та програм для її реалізації

Основний зміст дисертації опубліковано в наступних працях:

1. Заєць В. О. Оптимізація основних параметрів циклічної експлуатації підземних газосховищ/ В. О. Заєць, Д. Ф. Тимків, М. В. Крихівський// Scientific journal “ScienceRise”. - №4/2(9). – 2015. – С. 45-48

2. Заєць В. О. Пролетарське багатопластове підземне сховище газу - стан і перспективи розвитку / В. О. Заєць // Науковий вісник. ІФНТУНГ -№ 2(8). – 2004. – С. 32 – 37

3. Заєць В. О. До питання створення підземних сховищ газу у пластах кам'яної солі / В. О. Заєць, Савків Б. П., Ткачук І. В. // Нафтова і газова промисловість № 2. – 2011. – С. 44 – 46

4. Сторчак С. О. Питання застосування інертного газу на підземних сховищах газу України / С. О. Сторчак, В. О. Заєць // Нафтова і газова промисловість № 5, 2012. – С. 45 - 47

5. Заєць В. О. Моделювання процесу експлуатації підземних сховищ газу / В. О. Заєць, Д. Ф. Тимків // Нафтогазова енергетика. Всеукраїнський науково – технічний журнал № 2(22) – 2014. – С.51 -56

6. Заєць В. О. Дослідження теоретичних передумов методології формування багатопластових покладів підземних газових сховищ/ В.О. Заєць, Д. Ф. Тимків//Науковий вісник ІФНТУНГ. - №1(38). – 2015. – С. 15-20

7. Пат. №91275 С2 Україна, МПК В65G 5/00 Спосіб очищення привибійної зони свердловин та навколо свердловинного порового простору пласта-колектора від проміжних і важких компонентів машинного масла при експлуатації підземного сховища газу / Марчук Я. С., .. Клюк Б. О., Шимко Р. Я., Деркач М. П., Зарубін Ю. О., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Заєць В. О. – № 2008 12918; заявл. 05 11 2008, опубл. 12.07.2010, Бюл. № 14. – 8с.

8. Пат. №34177 Україна, МПК В65G 5/00. Спосіб експлуатації підземного сховища газу/ Клюк Б. О., Шимко Р. Я., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Заєць В. О., Зарубін Ю. О., Галій П. П.. –№ 2008 04184; заявл. 02.04.2008, опубл.25.07.2008., Бюл.№14. – 14 с.

9. Пат. №101191 Україна, МПК В65G 5/00. Спосіб поліпшення роботи підземного сховища газу/ Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Галій П. П., Заєць В. О.; Заявник і патентовласник ПАТ «Укртрансгаз». – № 2010 13867; заявл. 22.11.2010, опубл. 25.05.2012, Бюл. № 10. – 5 с.

10. Пат. №45629 Україна, В65G 5/00. Спосіб створення і експлуатації підземних сховищ газу у виснажених газоносних пластах/Заєць В.О., Федутенко А.М., Ткач О.І., Вечерік Р.Л., Хаєцький Ю. Б.; Заявник і патентовласник ДК «Укргазвидобування» Український НДІ природних газів (філія). – № 2001 053180; заявл. 14.05.2001, опубл. 15.03.2015, Бюл. №3. – 4с.

11. Пат №89107 Україна, МПК В65G 5/00. Спосіб експлуатації підземного сховища газу / Марчук Я. С, Клюк Б. О., Шимко Р. Я., Деркач М. П., Зарубін Ю. О., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Заєць В. О. – № 2008 04183; заявл. 02 04 2008, опубл. 05.12.2009, Бюл. № 7. – 16 с.

12. Пат №40544 Україна, МПК В65G 5/00. Спосіб експлуатації підземного сховища газу / Клюк Б. О., Шимко Р. Я., Зарубін Ю. О., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Заєць В. О. – заявл. 05. 07.09, опубл. 16.10.2009, Бюл. № 7. – 6 с.

13. Пат. 40167 Україна, В65G 5/00. Спосіб експлуатації підземного сховища газу/ Марчук Я. С., Клюк Б. О., Шимко Р. Я., Деркач М. П., Зарубін Ю. О., Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Заєць В. О. – заявл. 05.11.2008., опубл. 25.03.2009., Бюл.№6. – 8с.

14. Пат. 60653 Україна, В65G 5/00. Процес поліпшення роботи підземного сховища газу/ Вечерік Р. Л., Хаєцький Ю. Б., Галій П. П., Заєць В. О.; Заявник і патентовласник ДК «Укртрансгаз» НАК «Нафтогаз України». – заявл. 30.11.2010, опубл. 25.06.2011, Бюл №12. – 10 с.

15. Декларативний патент на винахід № 59938 Спосіб регулювання об'ємів нагнітання та відбирання газу при експлуатації багатопластових підземних сховищ газу / Савків Б. П., Федутенко А. М., Юрченко В. П., Заєць В. О. Заявл. 09 12 2002, Опубл. 15.09.2003, бюл. № 9.

16. Декларативний патент на винахід № 62101 А Спосіб експлуатації підземних сховищ газу, створених у водоносних пластах / Заєць В. О., Федутенко А. М., Криницька Д. А.. Заявл. 09 12 2002, Опубл. 15.12.2003, бюл. № 12.

17. Декларативний патент на винахід № 62283 А Спосіб розробки газових і газоконденсатних родовищ / Заєць В. О., Федутенко А. М., Юрченко В. П.. Заявл. 24. 02 2003,опубл. 15.12. 2003.

18. Декларативний патент на винахід № 66078 А Спосіб створення та експлуатації підземних сховищ газу / Коломеєв В. м., Дячук В. В., Саприкін С. О., Горностаєв Г. П., Федутенко А. М., Юрченко В. П., Шимко Р. Я., Педько Б. І., Слесар П, Ф., Ткач О. І., Заєць В. О. Заявл. 09 12 2003, Опубл. 15.04.2004, бюл. № 4.

19. Заєць В. О. Перспективи розширення і виведення Пролетарського газосховища на проектні показники/ В. О. Заєць, Б. П. Савків, С. О. Саприкін, Ф. М. Федутенко// Матеріали 8-ої міжнародної науково-практичної конференції «Нафта і газ України-2004. – Судак, 29 вересня – 1 жовтня 2004р. – том 2. – Київ 2004. – С. 148-150.

20. Заец В. А. Н. Научное обеспечение развития подземного хранения газа в Украине/ А. Н. Заец// Материалы совещания «Обеспечение промышленной безопасности объектов подземного хранения газа

ОАО «Газпром». Результаты работы в 2007 г. и ход выполнения работ в 2008г.» – Санкт-Петербург. – июнь 2008г., Москва. – 2008. – С. 56-59.

АНОТАЦІЯ

Заєць В. О. Підвищення ефективності експлуатації підземних сховищ газу в багатопластових покладах – 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, 2015.

Дисертація присвячена питанням вивчення закономірностей протікання гідрогазодинамічних процесів у пористому середовищі в багатопластових підземних сховищах газу для підвищення ефективності експлуатаційних параметрів для якісного прогнозування процесів формування та циклічної експлуатації газосховищ у виснажених газових покладах і водоносних структурах. Математична модель розроблено для оптимізації параметрів циклічної експлуатації багатопластових газосховищ, для розрахунку основного технологічного ланцюга від пласта-колектора до магістрального газопроводу під час процесів нагнітання та відбирання газу. Методи кількісної оцінки об'єму перетікань газу в багатопластових сховищах для визначення добового дебіту газу під час перетікань у свердловинах спільної експлуатації з подальшим визначенням щомісячного обсягу за час існування перетоків вдосконалені.

Геогідродинамічний контроль експлуатації багатопластових сховищ розширено, який заснований на уточненні геологічної побудови покрівлі штучного покладу за даними про міграцію газу в осередку його розсіювання, щоб запобігти ризику виникнення негерметичності в ньому.

Модель процесу експлуатації сховищ газу пружно-водонапірного режиму розроблена і передбачає закачування буферного й активного об'ємів газу в підземне сховище, яке створене в водоносній структурі, щоб стабілізувати поровий тиск.

Ключові слова: геолого–промислові дослідження, оптимізація режимів, нагнітання, відбирання, дебіт газу, математична модель, багатопластові сховища, геогідродинамічний контроль, пружно-водонапірний режим, пластовий тиск, спостережні та контрольні свердловини

ABSTRACTION

Zayets V. O. Improving of operation efficiency of underground gas storage facilities in multilayer reservoirs – Manuscript.

The dissertation is for obtaining the degree of candidate of technical sciences in specialty 05.15.13 - Pipeline transportation, oil and gas underground

storage facilities. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. Ivano-Frankivsk, 2015.

The thesis is devoted to the study of hydrogasdynamic processes flowing patterns in porous media of multilayer underground gas storages in order to improve operational parameters for qualitative prediction of the formation processes and cyclic operation of the gas storage facilities in depleted gas fields and aquifer beds. A mathematical model was developed for optimizing the parameters of cyclic operation of multilayer gas storage facilities and to calculate basic process chain from reservoir to gas pipeline during injection and gas withdrawal processes. Were improved the methods of quantitative estimation of the gas crossflow volumes in the multilayer storages to determine daily output of gas during crossflows between wells of joint operation, followed by determination of monthly volume in a time of crossflows existence.

Geohydrodynamic control of multilayer storages was expanded, based on refinement of the geological cap construction of artificial deposit according to the data on gas migration in his scattering cell to prevent the risk of leaks in it.

Model of the operation process of the gas storage with elastic-water drive mode was developed. It provides for injection of buffer and active gas volumes in the underground storage, created in the aquifer structure, to stabilize its the pore pressure.

Keywords: geological and industrial research, process optimization, injection, withdrawal, gas output, mathematical model, multilayer storage facilities, geohydrodynamic control, elastic-water drive, reservoir pressure, observation and control wells

АНОТАЦИЯ

Заец В. О. Повышение эффективности эксплуатации подземных хранилищ газа в многопластовых залежах. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – Трубопроводной транспорт, нефтегазохранилища. Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. Ивано-Франковск, 2015.

Диссертация посвящена вопросам изучения закономерностей протекания гидрогазодинамических процессов в пористой среде в многопластовых подземных хранилищах газа для повышения эффективности эксплуатационных параметров для качественного прогнозирования процессов формирования и циклической эксплуатации газохранилищ в истощенных газовых залежах и водоносных структурах. Анализ результатов исследования в скважинах показал, что имеет место постепенное поступление воды в горизонт, что приводит к уменьшению газонасыщенной залежи. Рассмотрены методы повышения эффективности эксплуатационных параметров газохранилищ. Проведенные геолого-промышленные исследования разрешают качественно прогнозировать основные показатели создаваемого газохранилища, определять направления работ по

качественному раскрытию пласта-коллектора и повысить продуктивность скважины.

Разработана математическая модель для оптимизации параметров циклической эксплуатации многопластовых газохранилищ, для расчёта основной технической цепи от пласта-коллектора к магистральному газопроводу во время процессов нагнетания и отбора газа. Усовершенствованы методы количественной оценки объёма нагнетания и отбора газа в многопластовых хранилищах для определения суточного дебита газа во время перетекания в скважинах общей эксплуатации, с дальнейшим определением ежемесячного оборота за время существования перетоков.

Для оптимизации эксплуатационных режимов при минимальных затратах ресурсов необходимо регулировать объёмы нагнетания и отбора газа, что позволит осуществлять как одновременную (общую) эксплуатацию всех объектов, так и только отдельных объектов через скважины, в зоне которых необходимо увеличить или уменьшить объём нагнетания или отбора. При создании и эксплуатации ПСГ в водоносном или истощенном газоносном пласте с целью повышения технико-экономических показателей производят бурение эксплуатационно-нагнетальных, наблюдательных и контрольных скважин, а также строят компрессорную станцию.

Расширен гидродинамический контроль эксплуатации многопластовых хранилищ, основанный на уточнении геологического строения кровли штучной залежи за данными о миграции газа в его очаге рассеивания во избежание риска возникновения в нем негерметичности.

Разработана модель процесса эксплуатации хранилищ газа. Данный процесс начинается в условиях упруго-водонапорного режима и включает в себя закачивание буферного и активного объёмов газа в подземное хранилище, созданное в водоносной структуре, для стабилизации порового давления при минимальном давлении за время, после которого начинается нейтральный период, длящийся на протяжении времени, необходимом по технологическим и техническим параметрам. После этого начинается период отбора активного объёма газа от максимального давления до величины пластового гидростатического давления, после которого наступает нейтральный период. Его длительность определяется путем расчетов. Корректирование процессов производится как после закачивания, так и после периода отбора газа.

Ключевые слова: геолого-промышленные исследования, оптимизация режимов, нагнетание, отбор, дебит газа, математическая модель, многопластовые хранилища, геогидродинамический контроль, упруго-водонапорный режим, пластовое давление, исследовательские и контрольные скважины.