

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
НАФТИ І ГАЗУ

**Кизимишин Ярослава Василівна**

УДК 621.51.004

**РАЦІОНАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ГАЗОТРАНСПОРТНИМ КОМПЛЕКСОМ З  
УРАХУВАННЯМ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ**

Спеціальність 05.15.13 – трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня

кандидата технічних наук

Івано-Франківськ – 2020

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор Тимків Дмитро Федорович, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу Міністерства освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент **Говдяк Роман Михайлович**, генеральний директор інжинірингової компанії «Машекспорт» (м. Київ).  
доктор технічних наук **П'янило Ярослав Данилович**, директор центру математичного моделювання інституту прикладних проблем механіки і математики (ІППММ) ім. Я.С. Підстригача НАН України (м. Львів).

Захист відбудеться 29 січня 2021 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу за адресою: 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

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

Автореферат розісланий 28 грудня 2020 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д  
доктор технічних наук, доцент

20.052.04

А. П. Джус

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Україна, яка географічно розташована в центрі Європи є потужним транзитером природного газу з регіонів Росії та Середньої Азії, де найбільше видобування природного газу, до країн Європейського Союзу, економіка яких вимагає значних обсягів споживання даного ресурсу. Крім того, наша газотранспортна система має значні запаси потужностей.

Територією нашої держави проходить унікальна система транзитних газопроводів, таких як: Союз, Уренгой-Помари-Ужгород, Братерство, Прогрес, які з'єднані з магістральними газопроводами всіх сусідніх держав Європи. А наявність великого комплексу підземних сховищ газу робить її основним гравцем в транзиті газу до Європи. Завдяки такій системі трубопроводів наша держава здійснює транзит газу до 18 країн Європи.

Відомо, що трубопроводи є найбезпечнішим і найдешевшим способом його транспортування, тому для них є дуже важливими вимоги до безперебійної роботи.

Особливістю роботи магістральних газопроводів є неусталений процес руху газу, при якому тиск і витрата змінюється як за його довжиною у часі, так і в графіку постачання.

Другим завданням забезпечення надійності газотранспортної системи є реакція на виникнення нештатних ситуацій при аварійних ситуаціях, коли припиняється відбір, або аварій на лінійних ділянках, коли змінюються режими та об'єм поставок.

Основна функція системи газопостачання – це забезпечення споживача природним газом згідно заздалегідь визначеного графіку постачань. Складність даного завдання полягає в тому, що графік постачань нерівномірний у часі, тоді як сама газотранспортна система (ГТС) є досить протяжною і час її реакції на зміни, що відбуваються, майже завжди набагато більший, ніж періодичність цих змін.

Крім того, забезпечення надійності безпосередньо пов'язане з виникненням нештатних ситуацій. Наприклад, припинення відбору газу споживачем або аварія на лінійній ділянці газопроводу.

Варто зауважити, що проблема старіння газопроводів і компресорних станцій набуває все більшого значення з кожним роком, у результаті чого можливе значне скорочення транспортування природного газу державною мережею трубопроводів. Тому підвищення ефективності роботи ГТС України є першочерговим завданням у рамках її модернізації та переоснащення згідно з національною концепцією.

Газотранспортна система України (ГТС) є складним об'єктом, який складається з густої мережі газових комунікацій, що служать як для подачі газу внутрішнім споживачам, так і для транзиту палива в країни Західної Європи.

Складність структури складних газотранспортних систем створює додаткові вимоги до умов їхньої експлуатації. Функціонування газопроводу в заданому гідравлічному режимі вимагає узгодженості роботи всіх елементів мережі, особливо в нештатних ситуаціях.

Газотранспортна система постійно працює в нестационарному режимі, що зумовлює змінність її паливно-енергетичних затрат. Ці затрати є значними, і тому важлива її робота в режимах, близьких до оптимальних. Оптимальна робота газотранспортної системи пов'язана з багатьма факторами: наявністю достатнього

об'єму акумульованого газу в трубопроводах і підземних газосховищ (ПСГ), сезонністю роботи газосховищ, нерівномірністю відборів із системи та надходження в систему газу тощо. Вагомим фактором є людський. Вчасне прийняття рішення про зміну режиму транспортування газу може дати значний економічний ефект. Для швидкого оцінювання діючого режиму, за наявності певного прогнозу на параметри газу на його входах і виходах, потрібно мати заздалегідь проведені дослідження на встановлення ділянки оптимальної роботи магістральних газопроводів (МГ). Зазвичай, прогнози справджуються далеко не повністю, і тому ділянка оптимальності повинна формуватися з використанням мінімальної інформації, в умовах існування невизначеності. Тому питання оптимізації режимів роботи ГТС при різній її загрузці із використанням газосховищ є актуальними.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота носить науково-прикладний характер і входить у комплекс тематичних планів НАК "Нафтогаз України", спрямованих на розробку й удосконалення методів оптимізації режимів роботи складної газотранспортної системи для розрахунку технологічних параметрів при різних режимах її повної та неповної загрузки і окреслених Національною програмою "Нафта і газ України до 2030 року".

**Мета і задачі досліджень.**

Мета роботи полягає в розробленні енергоефективних режимів роботи складної газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу за умови змінного їх завантаження.

Вказана мета реалізується через вирішення наступних завдань:

1 Провести аналіз літературних джерел із проблематики раціонального керування газотранспортним комплексом при різних режимах завантаження та здійснити постановку задач досліджень

2 Розробити математичну модель прогнозування стаціонарних режимів роботи складних газотранспортних систем при неповному завантаженні.

3 Розробити математичну модель втрат і нормування газу в підземних газосховищах.

4 Розробити стратегію енергоефективного керування режимами роботи газотранспортної системи з використанням підземних сховищ газу.

**Об'єкт дослідження.** Складні системи газотранспортних магістралей великої протяжності в поєднанні з роботою газосховищ.

**Предмет дослідження.** Стаціонарні енергоефективні режими роботи в газотранспортних системах у комплексі з підземними сховищами газу при різних ступенях їх завантаження.

**Методи дослідження.** Математичне моделювання нестационарних процесів у складних газотранспортних системах і газосховищах, статистичні та експериментальні дослідження режимів роботи магістральних газопроводів. диференційні й інтегральні обчислення.

**Положення, що виносяться на захист.** Конкретизація дослідження закономірностей і пропускну здатності складної газопровідної системи як функції параметрів режиму – основного показника, що характеризує ступінь використання газопроводів при різній завантаженості.

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

*вперше*

- На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної газотранспортної системи побудовано математичну модель, яка дозволяє за умов нестационарного режиму роботи системи визначити її пропускну здатність і параметри режиму експлуатації. В результаті реалізації моделі показано можливість виконувати регулювання продуктивності системи шляхом виключення з режиму роботи окремих компресорних станцій. Встановлено ступінь впливу параметрів роботи КС на режим експлуатації системи. Запропонована математична модель може бути використана для прогнозування роботи газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу при різних режимах загрузки і оптимізувати її роботу.

- На основі експериментальних досліджень та диспетчерських даних роботи газотранспортної системи розроблено алгоритм та програмний модуль рішення створеної математичної моделі для визначення параметрів оптимізації із використанням газосховищ.

- Розроблено математичну модель газодинамічних розрахунків технологічних показників експлуатації багато пластових газосховищ.

*удосконалено*

- методологію розрахунку та нормування пластових втрат газу при зберіганні його в підземних сховищах газу.

### **Практичне значення одержаних результатів.**

Задачі які розв'язувались в дисертаційній роботі, а також отримані результати дозволили розробити

Розроблені методики з регулювання оптимізаційних режимів при різних загрузках роботи складної газотранспортної системи із підключенням підземних газосховищ реалізовано на об'єктах ПАТ «Укртрансгаз»:

### **Особистий вклад автора в одержанні наукових результатів.**

1. Автором запропоновано і створено математичну модель оптимізації технологічних параметрів циклічної експлуатації підземних сховищ газу в газовому режимі. Для цього визначена цільова функція, що виражає необхідну потужність компресорної станції для нагнітання газу в сховище. Мінімізація її дозволить знайти необхідні технологічні параметри, витрату та пластовий тиск, що змінюються в часі.

2. Автором розроблено концепцію функціонування та розвитку системи підземних сховищ газу України для підвищення їх ефективності функціонування рекомендовано скоротити термін закачування до 30% .

3. Розроблено геогідродинамічний контроль режимів роботи при експлуатації багатопластових підземних сховищ газу.

4. На основі аналітичних досліджень автором доведено, що при створенні підземного сховища газу у виснажених газоносних або водоносних пластах на етапі промислового розбурювання необхідно проводити уточнення геологічної моделі об'єкта. Такі уточнення дозволяють визначити колекторські та фільтраційно-ємнісні властивості продуктивного пласта, характер поведінки водонапірної системи, динаміку руху ГВК на об'єкті підземного зберігання газу, що дозволяє прогнозувати основні показники створюваного ПСГ.

5. При безпосередній участі автора розроблено комплексну галузеву методичку «Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах», яку впроваджено на об'єкті ПАТ «Укртрансгаз» Управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз».

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

- Міжнародній науково-практичній конференції "50 років підземному зберіганню газу в Україні " (Яремче, 2 – 4 червня, 2014);
- Міжнародній науково-технічній конференції "Машини, обладнання і матеріали для нарощування вітчизняного видобутку та диверсифікації постачання нафти і газу ".(Івано – Франківськ, ІФНТУНГ, 16-20 травня, 2016р.).

В повному обсязі результати досліджень доповідалися і обговорювалися на науковому засіданні кафедри спорудження та ремонту та розширеному засіданні кафедри транспорту і зберігання нафти і газу та науково-технічному семінарі інституту Нафтогазової інженерії Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**5. Публікації.** За темою дисертації опубліковано 6 друкованих праць, з них 6 у фахових виданнях України (одна одноосібна та одна зарубіжна, що входить до наукометричної бази даних SCOPUS), 2 – у матеріалах конференцій.

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, підсумкових висновків і переліку використаних джерел, що містить 116 найменувань. Основний зміст викладено на 156 сторінках машинописного тексту і містить 17 рисунків, 4 таблиці і 4 додатки.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми досліджень, наведено зв'язок роботи з науковими програмами, планами, роботами, визначено мету, об'єкт і предмет дослідження, завдання досліджень. Аргументовано наукову новизну одержаних результатів дисертаційної роботи, зазначено практичну цінність результатів дисертаційної роботи і вказано особистий внесок у них здобувача. Наведені дані про апробацію отриманих результатів, публікації, які відображають основний зміст дисертаційної роботи, структуру та обсяг дисертаційної роботи.

**Перший розділ** присвячено дослідженням стану проблеми на основі аналізу літературних джерел, формуванню та конкретизації задач досліджень. розглядаються питання, пов'язані з аналізом способів вдосконалення енергоефективності трубопровідного транспорту газу за умов неповного завантаження газотранспортної системи.

Дослідженню режимів роботи магістральних газопроводів та їх оптимізації присвячено роботи Галіулліна З.Т., Грудза В.Я., Девічева В.В., Жидкової М.О., Тимківа Д.Ф., Яковлева Є.І. та ін. Ними розроблено методи прогнозування режимів роботи магістральних газопроводів, можливості регулювання динаміки роботи, вивчені аспекти оцінки гідравлічної ефективності та методів її підвищення, запропоновано принципи вибору критеріїв оптимальності і побудови функції мети,

розрахунку оптимальних параметрів режиму. Однак, в умовах неповного завантаження газотранспортної системи вказані підходи суттєво змінюються, оскільки задається обсяг перекачування газу і характерними являються нестационарні перехідні процеси, викликані частою зміною продуктивності

Наведено короткі характеристики підземних сховищ газу у світі, в Україні, зокрема на Прикарпатті, які містять відомості про технологічні показники експлуатації сховищ, їхню геологічну характеристику, фізико-хімічні властивості пластового газу, а також стан фонду свердловин та величини коефіцієнтів фільтраційного опору. Зазначено, що для підтримання оптимальних параметрів роботи газопроводу в заданих режимах необхідно розробити математичні моделі оперативного керування складними газотранспортними системами з урахування підземних сховищ газу.

Досвід створення підземних газосховищ, особливості їх експлуатації і специфікації досліджень експлуатаційно-нагнітальних свердловин, оптимізація параметрів і режимів роботи приведені в працях С.Н. Бузинова, А.В.Баранова, В.П.Карпова, Е.Л.Гусева, І.Я. Фурмана, І.Н. Паллера, Б. Д. Карлінського, В. П. Войціцького, Р.Ф.Гімера, Б.П.Савківа, Г.І.Солдаткіна, М.В.Сидоренко, А. Н. Федутенкова, Г.Д.Лебедева, та ін.

Перший період розвитку підземного зберігання газу в Україні практично збігається з світовими тенденціями в підземному зберіганні газу при проектуванні і розвитку великих систем газопостачання в США (штати Іллінойс і Айова), у Франції (р-н Парижа), в Росії (біля Москви і Ленінграда), дещо пізніше в Латвії, Білорусії, Узбекистані.

Другий період створення ПСГ в Україні охоплює приблизно 1969-1985 роки. В цей період, разом із розширенням згаданих сховищ, починається створення ПСГ на базі вироблених покладів газових родовищ, з використанням їх для забезпечення надійності експортних поставок газу в країні Центральної України.

Третій період розвитку підземного зберігання газу починається з середини 80-х років і триває до сьогодні. Особливо значна робота була проведена щодо значного збільшення ємності ПСГ та відбору газу з них в другій половині 80-х років.

Підземні сховища газу, створені в виснажених родовищах Прикарпаття (Угерське, Опарське, Дашавське, Богородчанське і Угерсько-Більче-Волицьке) призначені для забезпечення надійності експортних поставок газу в країні Західної Європи і газопостачання споживачів Західного економічного району країни через постійне зниження видобутку газу із родовищ Західних областей України.

Загальний активний об'єм газу в цих газосховищах в 1990 році склав 10,75 млрд.м<sup>3</sup>, із них 7,86 млрд. м<sup>3</sup> – для забезпечення об'ємів експортних поставок (без урахування резерву нерозподіленого активного об'єму газу).

У результаті аналізу літературних джерел показано, що у більшості наукових розробок робота лінійних ділянок газопроводів і робота підземних сховищ газу досліджується окремо; для ефективного та якісного керування режимами ГТС необхідно розглядати складну газотранспортну систему як єдине ціле, в яке входить лінійна частина разом із компресорними станціями та підземні сховища газу.

У **другому розділі** побудовано характеристики лінійних ділянок і компресорних станцій складної газотранспортної системи, розроблено математичну

модель прогнозування режимів роботи складних газотранспортних систем, проаналізовано результати реалізації цієї моделі.

Пропускна здатність складної системи газопроводів як функція параметрів режиму є основним виробничим показником, який характеризує ступінь використання газопроводів за призначенням.

Енергетична ситуація, що склалась в Україні, вимагає економного використання енергоносіїв. Тому проблема раціонального використання паливного газу на газових магістралях потребує детальних розрахунків параметрів роботи обладнання газотранспортних систем з метою її оптимального прогнозування.

Основним керуючим елементом системи транспорту газу слід вважати компресорні станції. Від режиму їх роботи і його зміни залежить, в основному, режим експлуатації всієї системи газопостачання. Крім того, компресорні станції на магістральному газопроводі є об'єктом значної енергоємності, внаслідок чого режим їх експлуатації визначає енергозатрати на транспорт газу. Для оперативного керування режимами роботи компресорних станцій і з метою оптимізації режимів важливо знати області допустимих режимів і граничні області енергозатрат КС, а також реальний стан їх лінійної частини й обладнання, визначений діагностичними методами.

Складна газотранспортна система містить ряд газопроводів, що утворюють лінійну частину, та ряд компресорних станцій, які в сукупності представляють послідовно та паралельно з'єднані ланки і від характеристик яких залежить величина пропускної здатності. В зв'язку з цим на величину пропускної здатності мають вплив характеристики кожної з компресорних станцій і кожної з лінійних ділянок.

Визначення пропускної здатності простого однопіткового газопроводу є складною з точки зору обчислень задачею, оскільки ряд параметрів, що входять в основне рівняння газопроводів, залежать від величини витрати газу (коефіцієнт гідравлічного опору, середня температура газу, коефіцієнт стисливості). Тому для визначення величини пропускної здатності простих газопроводів запропоновано користуватися ітераційною процедурою.

Для складних газотранспортних систем задача значно ускладнюється, оскільки кожна лінійна ділянка характеризується своїм значенням пропускної здатності, а продуктивність кожної з компресорних станцій, що залежить від їх основного обладнання, схеми та параметрів режиму роботи, повинна відповідати пропускній здатності системи. Тому найбільш перспективним методом реалізації поставленої задачі є метод характеристик.

На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної газотранспортної системи побудовано математичну модель, яка дозволяє за умов квазістаціонарного режиму роботи системи визначити її пропускну здатність і параметри режиму експлуатації. В результаті реалізації моделі показано можливість виконувати регулювання продуктивності газотранспортної системи шляхом виключення з режиму роботи окремих компресорних станцій. Встановлено ступінь впливу параметрів роботи КС на режим експлуатації системи.

Запропонована математична модель може бути використана для прогнозування роботи газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу.



Для умов стаціонарного процесу руху газу в трубопроводі тиски на кінцях лінійної ділянки зв'язані з її пропускною здатністю основним рівнянням газопроводів, на основі якого характеристика лінійної ділянки представляється у вигляді

$$P_{Hj} - P_{Kj} = C_j Q^2, \quad (1)$$

де:

$$C_j = \frac{\lambda_i \Delta z T_j L_j}{(0.326 \cdot 10^{-6} d_j^{2.5})^2}$$

$P_{Hj}, P_{Kj}$  - тиски на початку і в кінці лінійної ділянки;  $Q$  - пропускна здатність за стандартних умов.

Характеристика компресорної станції, обладнаної відцентровими нагнітачами, побудована на базі двочленного рівняння характеристики газоперекачувального агрегату з урахуванням схеми їх паралельного і послідовного з'єднання і має вигляд

$$P_{Hj} = A_j P_{Bj} - \bar{B}_j Q^2 \quad (2)$$

де:  $P_{Hj}, P_{Bj}$  - тиски нагнітання і всмоктування.

Суперпозиція характеристик всіх працюючих КС газотранспортної системи і лінійної її частини дає систему алгебраїчних рівнянь для визначення пропускної

$$Q = \sqrt{\frac{\prod_{j=1}^n A_j P_{Bj}^2 - P_k^2}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^n A_{j+1} (\bar{B}_j + C_j)}} \quad (3)$$

В одержаній моделі коефіцієнти  $C_j$  знаходяться через коефіцієнт гідравлічного опору газопроводу, який в свою чергу є функцією продуктивності  $Q$ ; тому для реалізації (3) пропонується ітераційний метод.

На основі одержаного значення продуктивності з побудованої системи рівнянь знаходяться тиски на вході і виході кожної з працюючих КС. Однак, на вказану систему рівнянь слід накласти обмеження у вигляді граничних тисків

$$P_{Hj} \leq P_{\max} \quad P_{Bj} \geq P_{\min}, \quad (4)$$

де  $P_{\max}$  - максимально можливий тиск з точки зору міцності трубопроводу;

$P_{\min}$  - мінімально допустимий тиск з точки зору нормальної роботи ГПА на КС.

Запропонована математична модель дозволяє розв'язати ряд практично важливих технологічних задач, пов'язаних із визначенням пропускної здатності системи в умовах неповного завантаження, регулювання режимів її роботи та визначенням параметрів.

Реалізація математичної моделі прогнозування режимів роботи складних газотранспортних систем проведена на основі розрахунків пропускної здатності та режиму роботи газопроводу «Союз» на ділянці, що проходить територією України, за умови закриття міжниткових перемичок із іншими газопроводами трансукраїнської газотранспортної системи. Результати розрахунків у вигляді графіка приведено на рисунку 1. Їх аналіз показує, що відключення КС «Борова», яка має №2 в системі, призводить до зниження пропускної здатності на величину 14,2% від номінальної.

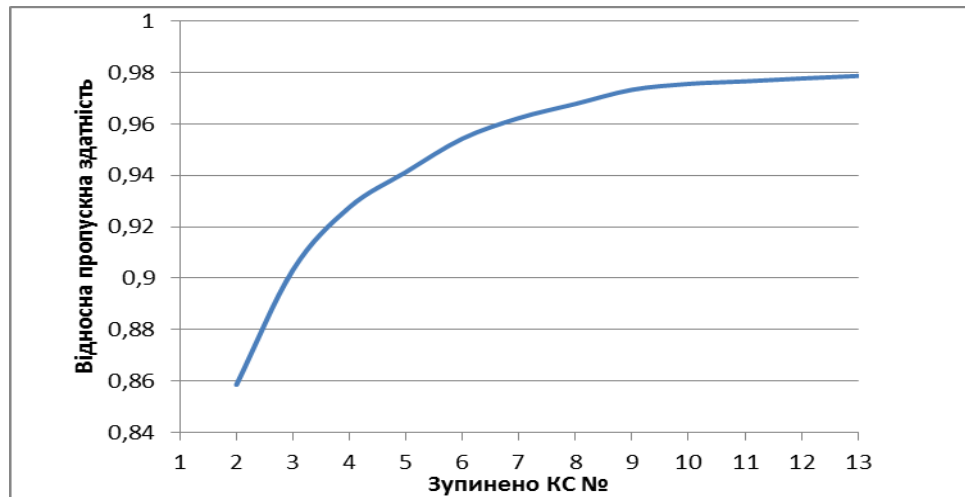


Рисунок 1 – Вплив відключення КС 2 на пропуску здатність системи

На рисунку 2 наведено результати розрахунків регулювання продуктивності системи шляхом зміни швидкості обертання роторів нагнітачів на компресорних станціях системи КС-1 «Новопсков», КС-2 «Борова» і КС-3 «Першотравнева».

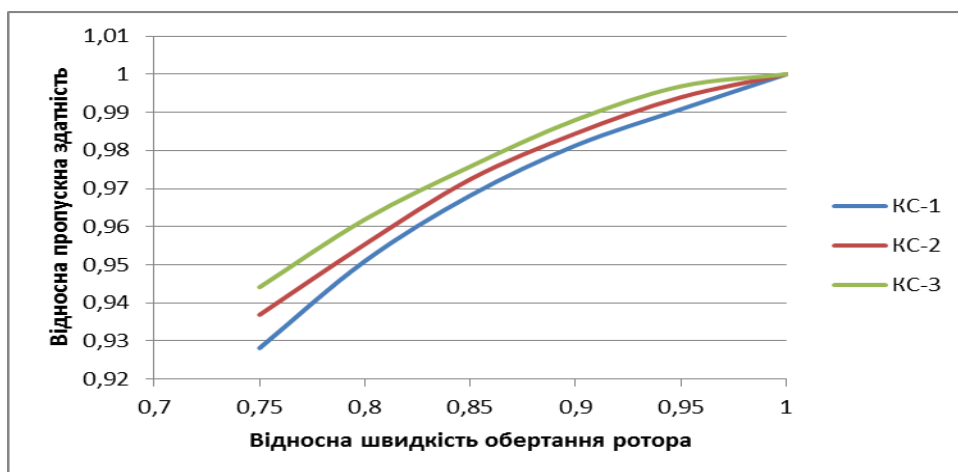


Рисунок 2 – Регулювання продуктивності системи шляхом зміни швидкості обертання ротора нагнітача

Запропонована математична модель дозволяє прогнозувати режим роботи газотранспортної системи зі шляховими відборами (підкачками) газу, наприклад, у комплексі з підземними сховищами газу

У третьому розділі приведено результати дослідження ефективності використання підземних газосховищ за критеріями максимальної продуктивності в період відбору і мінімальних втрат газу при зберіганні.

Використання підземних сховищ газу при експлуатації газотранспортної системи з неповним завантаженням дозволить, окрім вирівнювання сезонної нерівномірності транспортування газу, підвищити надійність забезпечення газом споживачів і енергоефективність газотранспортного комплексу. За таких обставин зберігання газу в ПСГ, умови його закачування і відбору повинні забезпечити мінімальні затрати енергоресурсів на експлуатацію газотранспортної системи в цілому.

Найперше використання ПСГ повинно розвантажити газотранспортну систему в моменти зростання подачі газу на її початку та зменшення його відбору в кінці.

Найперше слід звернути увагу на географічне розміщення кожного з ПСГ і на його технологічні характеристики, до яких слід віднести активний об'єм сховища, максимальний пластовий тиск, допустиму депресію тиску на пласт, і які визначають максимальну продуктивність ПСГ.

Продуктивність ПСГ в період відбору газу визначалася для кожного сховища за умови нелінійної фільтрації газу в продуктивному горизонті і середніх значеннях коефіцієнтів фільтраційного опору. Загальна продуктивність ПСГ визначалася як сума дебітів експлуатаційних свердловин, тобто

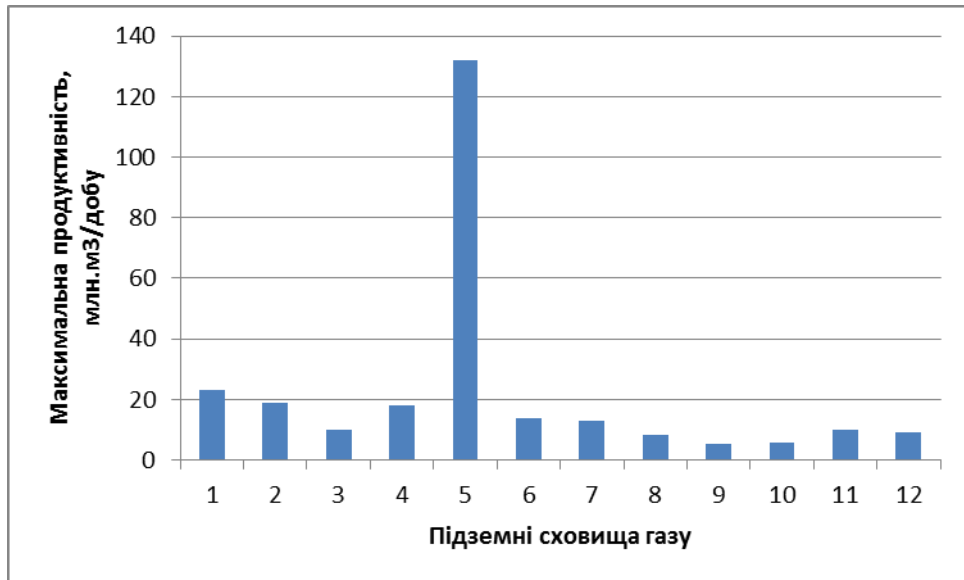
$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = nq$$

При відомих тисках в пласті і трубопроводі дебіт свердловини визначався за формулою

$$q = -\frac{a}{2(b - c_{\text{сист.}}^2 e^{2s})} + \sqrt{\frac{a^2}{4(b - c_{\text{сист.}}^2 e^{2s})^2} + \frac{P_{\text{п}}^2 - P_{\text{к}}^2 \cdot e^{2s}}{b - c_{\text{сист.}}^2 e^{2s}}} \quad (5)$$

Задача визначення максимальної добової продуктивності сховища є частиною більш загальної задачі прогнозування режимів ГТС у цілому з метою їх подальшого порівняння за певними критеріями оптимальності. Тому реалізація поставленої задачі можлива тільки аналітичними методами.

Оскільки середній дебіт свердловини залежить від коефіцієнта газодинамічного опору системи  $c_{\text{сист.}}$ , який своєю чергою, є функцією гідравлічної ефективності кожного елемента системи, то дебіт свердловини можна представити функцією гідравлічної ефективності системи за кожним її елементу, а продуктивність ПСГ визначити на основі (5). На рисунку 3 дана порівняльна характеристика ПСГ України за критерієм добової продуктивності.



1-Богородчанське; 2-Дашавське; 3-Опарське; 4- Угерське;  
 5-Більче-Волицьке; 6-Червонопартизанське; 7- тСолохівське;  
 8-Кегечівське; 9-Краснопоповське; 10 – Вергунське;  
 11- Пролетарське; Олішевське.

Рисунок 3.1 – Максимальна розрахункова продуктивність ПСГ

Іншою важливою характеристикою сховища, яку слід враховувати при формуванні критерію оптимальності, являються втрати газу при зберіганні.

Утримування розчиненого газу в пластових водах, які прилягають до газових покладів, має велике значення в процесах їх формування та експлуатації. Газ, що розчинився у пластовій воді, далі вже дифундує в ній. Переміщення молекул газових компонентів внаслідок теплового руху, або дифузія, є одним із найбільш розповсюджених процесів розсіювання газів. Дифузія проходить в напрямку падіння концентрації газу веде до вирівнювання його хімічного потенціалу, тому дана проблематика є нагальною необхідністю для розробки методології функціонування і розвитку системи підземних сховищ природного газу України.

Для визначення пластових втрат газу через його дифузію пропонується використати основну формулу в загальному вигляді:

$$Q_D = \frac{D \cdot S_D \cdot K_p (\bar{P}_K - \bar{P}_\Phi) \tau}{l} \quad (6)$$

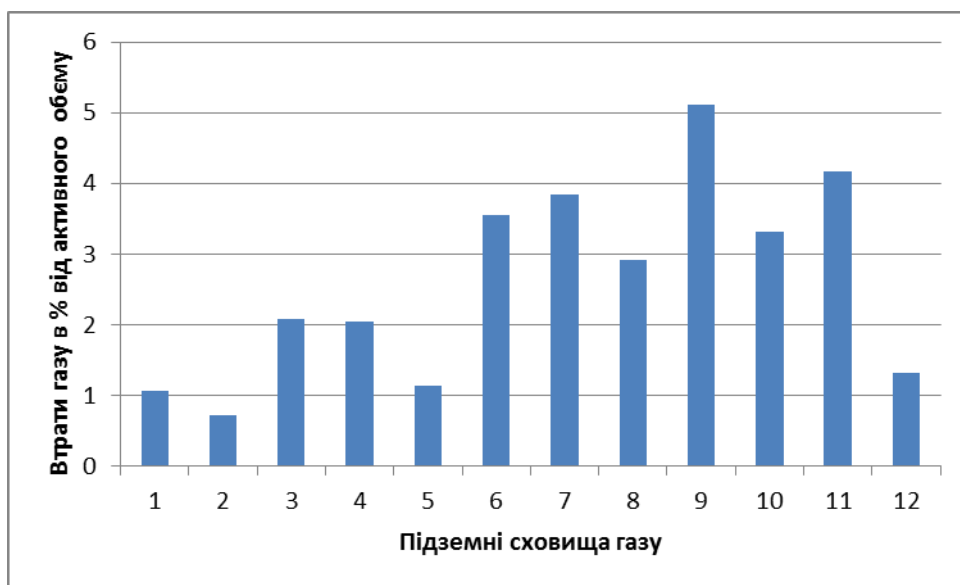
якщо прийняти  $K_p \cdot P_K - K_p \cdot P_{cp} = C_K - C_\Phi$  тоді:

$$Q_D = \frac{D \cdot S_D (C_K - C_\Phi) \tau}{l} \quad (7)$$

де  $Q_D$  об'єм газу, що дифузував, млн.м<sup>3</sup>;  $S_D$  – площа, через яку дифузував газ, млн.м<sup>2</sup>;  $l$  – відстань, на яку дифузував газ в породі, м;  $D$  – коефіцієнт дифузії через породу, насичену пластовою водою відповідної мінералізації, м<sup>2</sup>/с;  $K_p$  – коефіцієнт розчинності газу в пластовій воді відповідної мінералізації, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup> · МПа;  $\bar{P}_K$  та  $\bar{P}_\Phi$  – наведений пластовий тиск на площині ГВК та

фоновий тиск відповідно, МПа;  $K_p \bar{P}_K = C_K$  – концентрація газу на площині ГВК,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  
 $K_p \bar{P}_\phi = C_\phi$  – фонові або фронтальні концентрації газу,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\tau$  – час дифузії за період існування ПСГ.

На рисунку 4 приведена порівняльна характеристика ПСГ України за критерієм втрат газу при зберіганні.



1-Богородчанське; 2-Дашавське; 3-Опарське; 4- Угерське;  
 5-Більче-Волицьке; 6-Червонопартизанське; 7- тСолохівське;  
 8-Кегечівське; 9-Краснопоповське; 10 – Вергунське;  
 11- Пролетарське; Олішевське.

Рисунок 4 – Розрахункові втрати газу при зберіганні

. Розглядаючи пластові частини ПСГ при їх розрахунках необхідно враховувати не передбачені і неконтрольовані процеси такі як защемлення, і розчинність газу, дифузії в навколишні води, різні породи, які приводять до пластових втрат

У **четвертому розділі** розглянуто принципи оптимального керування режимами роботи газотранспортної системи з використанням ПСГ.

Газотранспортна система Україна включає в комплекс 12 підземних сховищ газу, використання яких може призвести до зростання енергетичних витрат на транспортування газу, або на їх зниження. Очевидно, з точки зору оптимізації керування режимами роботи газотранспортної системи найбільш раціональним є режими, що мінімізують енерговитрати на транспортування газу.

Слід зауважити, що мінімум енерговитрат на транспорт газу є не єдиним критерієм оптимальності режиму при використанні ПСГ в комплексі перекачування газу. До критеріїв, що утворюють функцію мети в даному випадку слід віднести мінімізацію втрат газу при зберіганні, підвищення надійності газозабезпечення споживачів, питання екологічної безпеки та ін. Однак, енерговитрати на транспортування газу в цьому комплексі повинні відігравати першочергову роль,

оскільки сьогодні вони визначають ефективність енергопостачання. Цей підхід повинен базуватися на сучасних методах прогнозування та оптимізації режимів роботи газопроводів і попередженні аварійних ситуацій.

Пропускна здатність системи газопроводів з урахуванням ПСГ як функція параметрів режиму є основним виробничим показником, який характеризує як ступінь використання газопроводів, так і підземних сховищ газу за призначенням.

Збільшення чи зменшення газоспоживання дозволяє регулювання продуктивності газотранспортної системи шляхом використання ПСГ. Маючи широкий вибір сховищ газу, що характеризуються різними експлуатаційними параметрами, різними обсягами активного газу і різним розташуванням трасою газотранспортної системи, можна виробити принципову стратегію використання ПСГ у кожному конкретному випадку, яка б призводила в кінцевому рахунку до зниження енерговитрат на транспортування газу.

В основу стратегії раціонального використання підземних сховищ газу при трубопроводному транспорті з точки зору мінімізації енерговитрат покладено дослідження впливу розміщення сховища газу на трасі газотранспортної системи на величину енерговитрат.

З метою аналітичного дослідження залежності енерговитрат на транспортування газу від розміщення ПСГ на трасі розглядається гіпотетична газотранспортна система, що складається з трьох компресорних станцій і трьох лінійних ділянок з заданими їх технічними і режимними характеристиками. Вважається, що підземне сховище газу може розміщуватися після КС-2 (варіант 1), або після КС-3 (варіант 2). Підземні сховища газу вважаються однотипними як за фільтраційними характеристиками пласта, так і за обсягами активного та буферного газу. Газ у ПСГ закачується з виходу відповідної КС, а відбір здійснюється безкомпресорним способом.

При побудові математичних моделей лінійної частини і компресорних станцій газотранспортної системи вважалося, що режим руху газу в газопроводах стаціонарний.

Запропонована математична модель дозволяє прогнозувати режим роботи газотранспортної системи зі шляховими відборами (підкачками) газу, наприклад, у комплексі з підземними сховищами газу. Якщо на вході КС- $j$  здійснюється відбір газу з витратою  $q$ , то характеристика станції має вигляд

$$P_{H_j}^2 = A_j P_{B_j}^2 - B_j (Q - q)^2$$

або

$$P_{H_j}^2 = A_j P_{H_j}^2 - B_j Q^2 \left(1 - \frac{q}{Q}\right)^2 = A_j P_{B_j}^2 - B_j Q^2 (\delta Q)^2 \quad (8)$$

де  $\delta Q = 1 - \frac{q}{Q}$  - відносне зменшення продуктивності.

Використовуючи рівняння характеристики кожної з КС і характеристики кожної з лінійних ділянок, отримано значення тисків на вході і виході кожної з КС.

За даними розрахунків побудовано лінії депресії тисків, представлені у вигляді графіків на рисунку 5 (синій колір).

В період відбору газу з ПСГ продуктивність системи після КС-2 зростає. Використавши побудовану модель, знайдемо пропускну здатність системи в період відбору, і тиски на вході і виході кожної КС. Лінії депресії тиску показані на рисунку 5 червоним кольором.

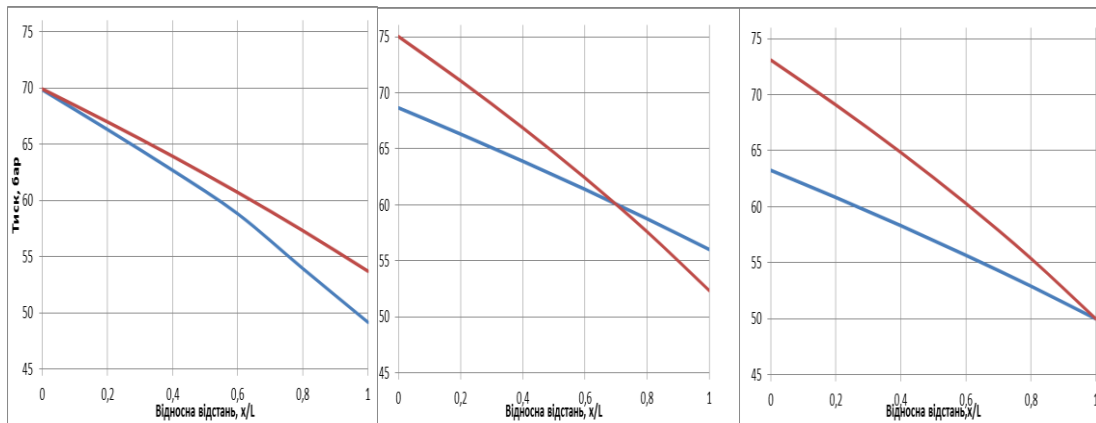


Рисунок 5 – Режим роботи газотранспортної системи при закачуванні і відборі газу з ПСГ після КС-2

Розглядаючи варіант 2 роботи системи, в якому закачування і відбір газу в ПСГ здійснюються після КС-3, побудовано математичну модель і отримано значення тисків на вході і виході кожної з КС. Лінії депресії тисків, побудовані за даними розрахунків, представлені у вигляді графіків на рисунку 6 (синій колір).

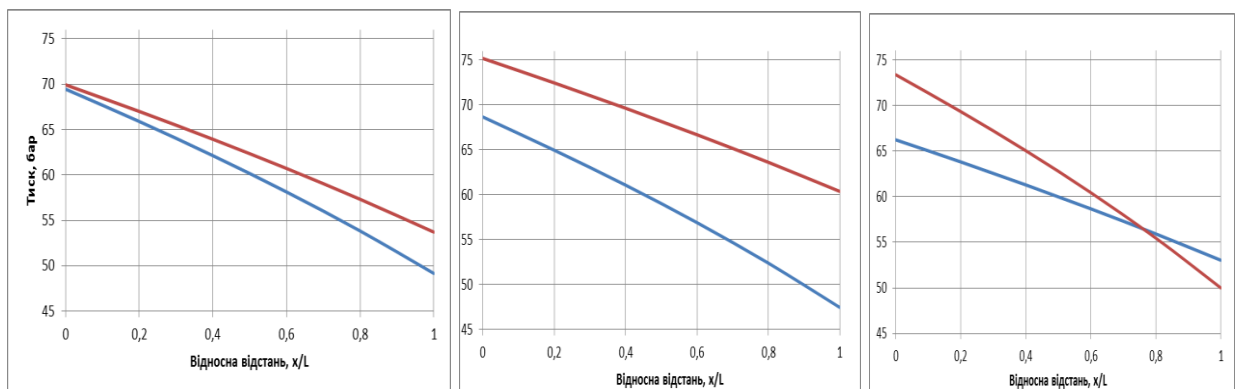


Рисунок 6 – Режим роботи газотранспортної системи при закачуванні і відборі газу з ПСГ після КС-3

Використовуючи рівняння характеристики кожної з КС і характеристик кожної з лінійних ділянок, отримаємо значення тисків на вході і виході кожної з КС. Лінії депресії тисків, побудовані за даними розрахунків, представлені у вигляді графіків на рисунку 6 (синій колір).

Знаючи продуктивність кожної КС і тиски газу на вході і виході, знайдено сумарну потужність всіх ГПА на КС з умови ізотермічного стиску газу. Оскільки потужності при закачуванні і відборі необхідні лише для порівняння варіантів, то умова ізотермічного стиску буде прийнятною, тому що виключить з розгляду вплив температурного фактора при компримуванні.

Таким чином, принцип енергоефективності використання ПСГ в системах дальнього транспорту газу з метою вирівнювання нерівномірності газоспоживання полягає в тому, що найперше слід використовувати ПСГ, найбільш наближені до споживачів, тобто розміщені в кінцевих точках траси ГТС. Це підтверджує зроблений раніше висновок про те, що зі збільшенням номера КС її вплив на пропускну здатність газотранспортної системи зменшується.

Аналогічні розрахунки, виконані для вказаної гіпотетичної газотранспортної системи при співвідношенні обсягу закачки і продуктивності газопроводу вказують на зростання економії енергоресурсів на транспорт газу при збільшенні співвідношення  $q/Q$ . Результати розрахунків у вигляді графіків подано на рисунку 7. При збільшенні числа КС у газотранспортній системі величина економії енергоресурсів зростає. Так, при загальній кількості КС в газотранспортній системі 4 одиниці за умови, що закачування газу в ПСГ здійснюється після виходу КС-2 (варіант 1), порівняно з варіантом 2, в якому закачування газу в ПСГ здійснюється після виходу КС-4 економія енергоресурсів при  $q/Q=0,2$  згідно з розрахунками складає 3,763%, при співвідношенні обсягу закачки і продуктивності  $q/Q=0,3$  ця величина зростає до 5,312%, а при  $q/Q=0,4$  – складає 8,773%.

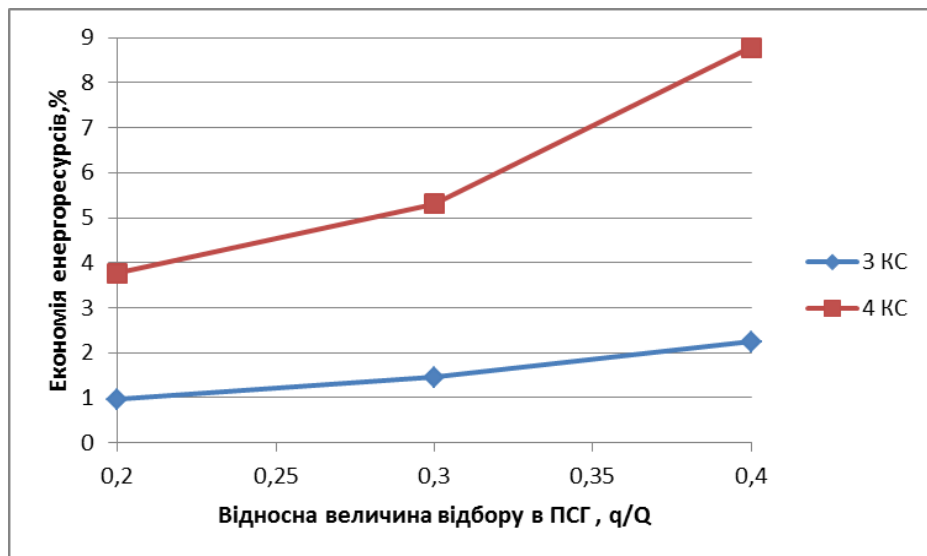


Рисунок 7 – Залежність економії енерговитрат на транспорт газу від обсягів закачки в ПСГ за різних кількостей КС у ГТС

Результати проведених досліджень покладено в основу розробленої галузевої методики «Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах».



Галузева методика призначена для виконання наступних розрахунків:

- розподілу параметрів потоку газу складної газотранспортної системи;
- стаціонарного потоку газу в нитці газопроводу;
- вихідного тиску та температури компресорних станцій (КС), враховуючи температурний режим роботи компресорної станції й апаратів повітряного охолодження (АПО) газу.

## **ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ**

На основі результатів проведених досліджень вирішено важливу науково-технічну задачу раціонального керування принципами експлуатації газотранспортних систем у комплексі з підземними сховищами газу за умови їх неповного завантаження з метою забезпечення мінімуму енерговитрат на транспортування газу. А саме:

1. На основі характеристик компресорних станцій і лінійних ділянок складної газотранспортної системи побудовано математичну модель, яка дозволяє за умов квазістаціонарного режиму роботи системи визначити її пропускну здатність і параметри режиму експлуатації, реалізація якої дозволяє регулювання продуктивності газотранспортної системи шляхом виключення з режиму роботи окремих компресорних станцій.

2. Встановлено ступінь впливу параметрів роботи КС на режим експлуатації системи, зокрема показано, що зі зростанням номера компресорної станції в ГТС її вплив на режим роботи системи суттєво знижується. Запропонована математична модель може бути використана для прогнозування роботи газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу.

3. Показано, що при розрахунках пластові частини ПСГ необхідно враховувати непередбачені і неконтрольовані процеси, такі як: защемлення і розчинність газу, дифузію в навколишні води, різні породи, які приводять до пластових втрат; запропоновані моделі дозволяють визначати оптимальні показники втрат газу в підземних газосховищах на період його експлуатації.

4. Розроблені математичні моделі дозволили встановити, що зі збільшенням порядкового номера КС, після якої здійснюється закачування і відбір газу з ПСГ, енерговитрати на трубопровідний транспорт газу знижуються. Показано, що зростання числа КС в системі і величини відборів в ПСГ призводить до збільшення впливу розміщення ПСГ на трасі НТС на величину зниження енерговитрат при транспортуванні газу.

5. На базі проведених досліджень створено галузеву методику «Методи прогнозування режимів газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і підрахунку запасів газу в трубах», яка прийнята до впровадження.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### Публікації у наукових фахових виданнях:

1. Тимків Д. Ф., Заєць В. О., Костів Я. В. Газодинамічні розрахунки технологічних показників експлуатації багатопластових газосховищ (на прикладі пролетарського). *Технологический аудит и резервы производства*. 2016. № 3(2). С. 20-24.
2. Тимків Д. Ф., Костів Я. В. Розробка концепції підвищення ефективності роботи підземних сховищ газу. *Прикарпатський вісник НТШ. Число*. 2016. №1. С. 261-271.
3. Тимків Д.Ф., Костів Я.В., Заєць В.О. Розроблення математичної моделі для нормування втрат газу в підземних газосховищах. *Нафтогазова енергетика*. №2(26). 2016. С. 41-46.
4. Тимків Д.Ф., Костів Я.В., Заєць В.О. Методологія визначення втрат газу при створенні й експлуатації підземних сховищ газу. *Нафтогазова енергетика*. №1(25). 2016. С. 49-57.
5. Грудз В. Я. Математичне моделювання складних газотранспортних систем в комплексі з ПСГ [Текст] / В. Я. Грудз, Я. В. Костів, В. Р. Процюк, Д. Ф. Тимків// Міжнародний науковий журнал “ScienceRise”. – 2016. – № 4/2 (21). – С. 44-49.
- 6.

### Публікації у наукових виданнях іноземних держав:

1. Grudz V.Ya. Non-stationary processes in the gas transmission systems at compressor stations shut-down [Text] / V.Ya. Grudz\*, V.Ya. Grudz (junior), V.B. Zapukhlyak, Ya.V. Kyzymyshyn // *Journal of hydrocarbon power engineering*. – 2018. – №1(5). – P. 22-28..

### Матеріали наукових конференцій:

1. Тимків Д. Ф., Костів Я. В. Раціональне керування газотранспортним комплексом з урахуванням підземних сховищ газу. «Методи та засоби неруйнівного контролю промислового обладнання». Зб. Тез доп. науково-практ. конф. студентів і молодих вчених. Івано-Франківськ. 24-25 листопада 2015. С.107-108
2. Костів Я. В. Розробка методів керування складною газотранспортною системою при різних режимах завантаження. *Нафтогазова енергетика-2015*. МНПК. м. Івано-Франківськ, 15-19.05.2017. С. 272-273

## АНОТАЦІЯ

**Кизимишин Я. В.. Рациональное керування газотранспортним комплексом з урахуванням підземних сховищ газу. – 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, 2020.

У дисертації розглядається проблема розрахунку складної газотранспортної системи, яка містить ряд газопроводів, що утворюють лінійну частину, та ряд компресорних станцій, які в сукупності представляють послідовно та паралельно з'єднані ланки і від характеристик яких залежить величина пропускної здатності. Для розрахунків і побудови характеристик лінійної частини запропоновано метод еквівалентного діаметру газотранспортної системи довільної складності, який визначається за допомогою системи рекурентних рівнянь. Дані рівняння представлені в аналітичній формі характеристиками лінійних ділянок і компресорних станцій.

Математична модель для прогнозування й оптимізації стаціонарних режимів базується на використанні характеристик лінійних ділянок і компресорних станцій. Шляхом виключення проміжних тисків отримано залежність для визначення продуктивності системи. Модель включає також обмеження по тисках.

В результаті реалізації моделі показано можливість здійснювати регулювання продуктивності газотранспортної системи шляхом виключення з режиму роботи окремих компресорних станцій. Встановлено ступінь впливу параметрів роботи КС на режим експлуатації системи. Запропонована математична модель рекомендується для використання при прогнозуванні роботи газотранспортної системи в комплексі з підземними сховищами газу.

**Ключові слова:** пропускна здатність, метод характеристик, еквівалентний діаметр, гідравлічна ефективність, компресорна станція, математична модель, підземне сховище газу.

## АННОТАЦИЯ

**Кызымышин Я. В. Рациональное управление газотранспортным комплексом с учетом подземных хранилищ газа. – Рукопись.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.15.13 – трубопроводный транспорт, нефтегазохранилища. – Ивано-Франковский национальный технический университет нефти и газа. – Ивано-Франковск, 2020.

В диссертации рассматривается проблема расчета сложной газотранспортной системы, вмещающей ряд газопроводов, создающих линейную часть, и ряд компрессорных станций, которые в совокупности составляют последовательно и параллельно соединенные звенья и от характеристики которых зависит величина пропускной способности. Для расчета и построения характеристик линейной части предложен метод эквивалентного диаметра газотранспортной системы произвольной сложности, определяющегося с помощью системы рекуррентных

уравнений. Данные уравнения представлены в аналитической форме характеристиками линейных участков и компрессорных станций.

Математическая модель для прогнозирования и оптимизации стационарных режимов базируется на использовании характеристик линейных участков и компрессорных станций. Путем исключения промежуточных давлений получена зависимость для определения продуктивности системы. Модель включает также ограничения по давлениях.

В результате реализации модели показана возможность совершать регулирование продуктивности газотранспортной системы путем исключения из работы отдельных компрессорных станций. Установлена степень влияния параметров работы КС на режим эксплуатации системы. Предложенная математическая модель рекомендуется для использования при прогнозировании работ газотранспортной системы в комплексе с подземными хранилищами газа.

**Ключевые слова:** пропускная способность, метод характеристик, эквивалентный диаметр, гидравлическая эффективность, компрессорная станция, математическая модель, подземное хранилище газа.

#### ANNOTATION

**Kizimyshyn J.V.** Rational management of the gas transportation complex taking into account underground gas storages. - Manuscript.

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.15.13 - pipeline transport, oil and gas storages. - Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas. - Ivano-Frankivsk, 2020

The dissertation considers the problem of calculating a complex gas transmission system, which contains a number of gas pipelines that form a linear part, and a number of compressor stations, which together represent series-connected and parallel-connected and the characteristics of which depend on the capacity. To calculate and construct the characteristics of the linear part, a method of equivalent diameter of the gas transmission system of arbitrary complexity is proposed, which is determined using a system of recurrent equations. These equations are presented in analytical form by the characteristics of linear sections and compressor stations.

The mathematical model for forecasting and optimization of stationary modes is based on use of characteristics of linear sites and compressor stations. By excluding intermediate pressures, a dependence is obtained to determine the performance of the system. The model also includes pressure limits.

As a result of the implementation of the model, the possibility of regulating the performance of the gas transmission system by excluding individual compressor stations from the operating mode is shown. The degree of influence of CS operation parameters on the system operation mode is established. The proposed mathematical model is recommended for use in forecasting the operation of the gas transmission system in combination with underground gas storage.

**Key words** throughput, method of characteristics, equivalent diameter, hydraulic efficiency, compressor station, mathematical model, underground gas storage..