

Міністерство освіти і науки України
Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу

БЕГІН Сергій Васильович

УДК 621.51.004

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ І НАДІЙНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
ГАЗОМОТОКОМПРЕСОРІВ В УМОВАХ КОМПРЕСОРНИХ
СТАНЦІЙ ПІДЗЕМНИХ СХОВИЩ ГАЗУ**

Спеціальність 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафтогазосховища

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

м Івано-Франківськ – 2018

Дисертацією є рукопис

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

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Грудз Ярослав Володимирович**, Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, завідувач кафедри логістичної інфраструктури нафтового комплексу

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, доцент **Говдяк Роман Михайлович**, генеральний директор інжинірингової компанії «Машекспорт» (м. Київ).

кандидат технічних наук, доцент **Костів Василь Васильович**, головний інженер управління магістральних газопроводів «Прикарпаттрансгаз» ПАТ «Укртрансгаз» (м. Івано-Франківськ)

Захист відбудеться 3 липня 2018 р. о 14 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 20.052.04 в Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу за адресою: 76019, Україна, м. 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, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15.

Автореферат розісланий 30 травня 2018 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 20.052.04,
кандидат технічних наук, доцент

Пилипів Л.Д.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Підземні сховища газу (ПСГ) є невід'ємною частиною газотранспортного комплексу України. Вони відіграють роль буфера, який акумулює газ в період літнього його надлишку і покриває зимовий дефіцит. Для транзитної газотранспортної системи ПСГ відіграють більш значущу роль, ніж для внутрішньої розподільчої, оскільки тут важко спрогнозувати обсяги газоспоживання.

Ефективність експлуатації ПСГ в значній мірі залежить від надійної роботи компресорної станції сховища, яка призначена підвищувати енергію газу при високих пластових тисках в процесі закачки і при низьких пластових тисках в процесі відбору. Відмови компресорної станції (КС) в такі моменти часу призводять до виключення ПСГ з газотранспортної системи з усіма випливаючими наслідками. Тому до надійності КС як елемента ПСГ ставляться високі вимоги.

Надійність компресорної станції ПСГ, в свою чергу, визначається надійністю експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА). Слід відмітити, що умови роботи ГПА на КС підземних сховищ газу суттєво відрізняються від умов їхньої експлуатації на компресорних станціях газопроводів. В першу чергу, це стосується широкого діапазону зміни ступеня стиску ГПА, і в залежності від цього – зміни потужності одиничного агрегату. Крім того, суттєво змінюється в часі об'єм перекачуваного газу, що зумовлює необхідність ступінчастого регулювання режиму роботи КС включенням чи відключенням окремих ГПА. Цілком зрозуміло, що при великих значеннях номінальної подачі одиничного агрегату таке регулювання неможливе. І, накінець, високі пластові тиски і різкі зміни ступеня завантаження ГПА можуть спричинити їхню нестійку роботу і навіть призвести до помпажу. Тому використання лопаткових ГПА на компресорних станціях ПСГ є вкрай обмеженим. Основним вимогам, що ставляться до умов компримування газу, відповідають поршневі газоперекачувальні агрегати.

Ефективність експлуатації поршневих газоперекачувальних агрегатів може бути підвищена шляхом правильного встановлення термінів і послідовності проведення планово-попереджувальних ремонтів за реальним технічним станом машини, який, як відомо, може змінюватися і безперервно, і дискретно. Експлуатація ГПА з поточним (міжремонтним) технічним станом завжди пов'язана з енергетичними втратами, оскільки виникнення несправності неодмінно призводить до перевитрати паливного газу.

Величину енергетичних втрат, що спричинені зміною технічного стану вузлів компресорних циліндрів ПГПА, однозначно визначити неможливо. Оцінити ж поточний технічний стан вузла безрозбірним методом і визначити енергетичні втрати можна, використовуючи методи технічної діагностики. Тому питання діагностування стану силових і силового циліндра ПГПА в умовах КС підземних сховищ газу слід розглядати як одну з ланок оптимізації процесу технічного обслуговування обладнання, що має за кінцеву мету підвищення експлуатаційної надійності ПСГ і газотранспортної системи в цілому.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Робота носить науково-прикладний характер і входить в комплекс тематичних планів НАК "Нафтогаз України", спрямованих на підвищення надійності експлуатації газотранспортного комплексу (в тому числі ПСГ) і окреслених Національною програмою "Нафта і газ України до 2035 року".

Мета і задачі досліджень. Підвищення ефективності і надійності експлуатації ПГПА в умовах КС систем підземного зберігання газу на основі удосконалення методів технічного обслуговування за умови мінімальних питомих витрат на компримування.

Поставлена мета досягається шляхом реалізації наступних задач:

1. розробка методу оцінки показників надійності експлуатації ПГПА в умовах КС підземних сховищ газу, що базується на основі прогресивної стратегії обслуговування за реальним технічним станом агрегату, який оцінюється методами діагностики вузла;
2. Встановлення закономірностей впливу зовнішніх факторів на потужність і економічність силової частини газомотокомпресора, що дозволить забезпечити ефективну роботу компресорної станції;
3. Побудова математичної моделі оптимізації процесу обслуговування ПГПА в умовах КС ПСГ, на основі якої отримуються залежності впливу виробничих факторів на потужність і економічність агрегату;
4. Оптимізація обслуговування ПГПА в умовах компресорної станції ПСГ на основі створеної діагностичної моделі і результатів діагностування технічного стану вузлів агрегату;
5. оцінка деформаційних характеристик фундаментних плит газомотокомпресорів, і проведення апробації розроблених рекомендацій у виробничих умовах з метою встановлення їх адекватності і внесення корективів при необхідності.

Об'єкт дослідження: поршневі газоперекачувальні агрегати компресорних станцій підземних сховищ газу.

Предмет дослідження: ефективність і надійність експлуатації КС на основі оптимізації режимів роботи і обслуговування силових циліндрів ПГПА.

Методи дослідження: методи математичного моделювання газотермодинамічних процесів в циліндрах ПГПА, проведення наукового експерименту, статистична обробка величин експлуатаційних параметрів роботи агрегату.

Положення, що виносяться на захист. Результати досліджень з встановлення закономірностей впливу зовнішніх факторів на ефективність і надійність експлуатації поршневих газоперекачувальних агрегатів на компресорних станціях підземних сховищ газу з метою розробки енергоефективної технології їх обслуговування.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Проведено дослідження надійності ПГПА в умовах КС ПСГ на основі побудованої математичної моделі, яка базується на законах найпростішого потоку відмов агрегатів і показано адекватність результатів її застосування.

2. На основі проведених експериментальних досліджень у виробничих умовах встановлено закономірності впливу зовнішніх факторів, зокрема, барометричного тиску, температури і вологості атмосферного повітря, а також відносної густини паливного газу на потужність і економічність силової частини газомотокомпресора, що дозволить забезпечити ефективну роботу компресорної станції підземного сховища газу.

3. На базі результатів діагностування методами термографування та створеної математичної моделі побудовано функцію мети підвищення ефективності експлуатації ПГПА при проведенні параметричного діагностування компресорного циліндра і визначено допустимі енерговтрати і міжремонтний період для вузлів циліндрової порожнини компресорного циліндра.

4. На підставі обробки результатів геодезичних вимірювань дано оцінку деформаційним характеристикам фундаментних плит газомотокомпресорів, що є важливою складовою частиною загальних методів неруйнівного контролю за безпекою експлуатації ПСГ.

5. Дано оцінку адекватності параметрів режиму і процесу обслуговування шляхом реалізації запропонованої методики пошуку мінімуму витрат за результатами технічного діагностування і характером режиму з метою підвищення ефективності і надійності КС.

Практичне значення одержаних результатів. Створено методику, алгоритми і програми, що дозволяють: обчислювати величини структурних параметрів відмов ПГПА для оцінки технічного стану його вузлів; визначати рівень технічного стану компресора для керування роботою агрегату і ефективності КС; розраховувати енерговитрати, спричинені відмовами, за результатами експлуатаційних вимірів для оперативного виявлення і оцінки ступеня відмови; розраховувати вартісні характеристики відмов за результатами контролю технічного стану обладнання; визначати питомі експлуатаційні витрати і момент проведення попереджувального ремонту з

умови їхньої мінімізації за результатами контролю технічного стану агрегатів. Проведення попереджувальних ремонтів відповідно до рекомендацій, сформульованих за результатами розрахунків по розроблених програмах, дозволяє збільшити середню у часі продуктивність КС на 3,7%, знизити витрати паливного газу на 4%, оптимізувати розподіл експлуатаційних витрат і зменшити експлуатаційні витрати на 2,2%. Результати роботи впроваджені на КС Богородчанського ПСГ УМГ "Прикарпаттрансгаз", економічний ефект складає 42 тис. грн. у рік.

Особистий внесок автора в одержанні наукових результатів.

1. Автором запропоновано при діагностиці технічного стану компресорного циліндра структурний параметр відмови оцінювати за величиною перерізу негерметичності ущільнення з урахуванням властивостей компримованого газу, його вологості, об'єму мертвого простору і часу запізнювання закриття клапанів, що дозволило значно спростити методіку діагностування без зниження точності прогнозу [1,3].

2. На основі реалізації розробленої математичної моделі автором встановлено, що єдиним узагальненим параметром технічного стану компресора ПГПА в умовах експлуатації КС є температура нагнітання. У відповідності з цим отримані розрахункові діагностичні залежності і складено алгоритм для оцінки технічного стану клапанів компресорів КС з метою своєчасного призначення попереджувальних ремонтів [1,2,5].

3. Розроблено алгоритм пошуку мінімуму експлуатаційних витрат за результатами технічного діагностування і характеристиками режиму КС з метою підвищення середніх у часі її ефективності і продуктивності [2,3,4].

4. Автор брав безпосередню участь в експериментальній перевірці запропонованих методів технічної діагностики циліндра ПГПА і у впровадженні результатів в практику експлуатації на КС Богородчанського ПСГ [3,6].

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

- 6-тій міжнародній конференції «Нафтогазова енергетика 2017» (Івано-Франківськ, 2017, 15-19 травня);
- науково-практичній конференції "Шляхи підвищення надійності і ефективності роботи трубопровідного транспорту" (Івано-Франківськ, 2015);
- науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (Івано-Франківськ, 2014)
- нараді фахівців НАК "Нафтогаз України" з питань науково-технічного співробітництва в галузі транспортування природного газу (Яремче, 2014).

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

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 друкованих робіт, в тому числі 4 – у фахових виданнях України та одна в зарубіжному виданні.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, підсумкових висновків і списку літератури. Зміст викладений на 121 сторінках машинописного тексту і містить 25 рисунків та 9 таблиць. Бібліографія включає 111 найменувань.

ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** наведена загальна характеристика роботи, показано актуальність теми, її зв'язок з науковими планами, програмами, мету і задачі досліджень, їх наукову новизну і практичну цінність, а також особистий внесок автора в результати досліджень.

Перший розділ присвячено дослідженням стану проблеми на основі аналізу літературних джерел, формуванню та конкретизації задач досліджень. Розглядаються питання, пов'язані з надійністю і економічністю експлуатації парку ГПА компресорних станцій підземних сховищ газу. Аналізуються енергетичні втрати, спричинені порушенням технічного стану машин, методи оцінки технічного стану.

Дослідженню ефективності і надійності роботи поршневих ГПА в умовах компресорної станції ПСГ присвячено роботи Є.В. Левикіна, К.В. Ісаєва, А.С.Копелевича, А.А. Козобкова, В.М. Михліна, П.І. Пластиніна, Б.М. Смереки, М.І. Френкеля, Г.К. Храпача та ін. Ними розглянуті режими роботи ПГПА, можливості їхнього регулювання, динаміка роботи клапанів, вивчені аспекти розрахунків надійності і методи її підвищення. Однак, проблемі діагностування стану циліндра з метою переходу на систему технічного обслуговування за реальним технічним станом елементів обладнання практично не приділено уваги.

З метою виявлення найбільш надійних вузлів досліджувались співвідношення кількості і тривалості усунення відмов для різних механізмів. Оскільки своєчасне усунення відмови можливе лише при використанні методів технічної діагностики, то досліджувалася можливість застосування цих методів до вузлів механізму передачі енергії.

Характеристики надійності агрегату і вузлів явно не пов'язані з економічністю експлуатації обладнання, до складу якого вони входять. Необхідно зауважити, що відмови агрегатів не спричинюють зупинку перекачування газу завдяки наявності резервних агрегатів. Відмови ж в робочому органі можуть і не зумовити зупинки агрегату. При цьому тимчасові втрати не завжди можна виразити вартісними показниками, відмовою обладнання або його вузлів також не мають вартісних характеристик, виражених явно через показники надійності. Все це значно утруднює прийняття відповідних рішень під час експлуатації обладнання,

таких, наприклад, як доцільність проведення попереджувального або відновлювального ремонтів, використання технічної діагностики, черговість постановки ПГПА на ремонт, оцінка ефективності включення в систему того чи іншого агрегату. Гонитва за високими показниками надійності агрегатів за певних умов експлуатації системи може призвести до негативних результатів.

Економічні показники можуть характеризуватися енергетичними, матеріальними, трудовими та іншими видами витрат.

Відмови деталей і вузлів можуть бути поступовими і раптовими. Поступові відмови можуть бути спричинені як зносом, так і пластичною деформацією деталей. Для оцінки відносного внеску енерговтрат необхідно з загальних експлуатаційних витрат виділити витрати, що залежать від технічного стану ПГПА. Тоді до витрат, що залежать від технічного стану ПГПА, необхідно віднести витрати на матеріали, паливний газ, ремонти, електроенергію. Вартість проведення планово-попереджувальних ремонтів (ППР) складає 2,9% від загальної вартості ремонтів, які проводять на ПГПА, вартість же ремонтів, пов'язаних з непередбачуваними відмовами, не перевищує 0,3%. З цього випливає, що проведення ППР не завжди є економічно вигідним.

У підсумку витрати через неефективну роботу ПГПА; зумовлену неефективною роботою робочого органу і привода, складає 1 грн./г, що в рік перевищує 8,5 тис. грн. на агрегат. За даними Богородчанської СПЗГ зниження потужності ПГПА досягає 37-51 кВт (50-70 к.с.), що складає в середньому 6% від номінальної потужності. Тоді перевитрата паливного газу, не пов'язана зі зниженням ефективності привода, складе 10%, що в грошовому виразі становить 0,583 грн./г або 5,1 тис. грн. на агрегат у рік.

Отже, джерелом невеликих витрат через відмови є робочий орган поршневого компресора. Для зниження експлуатаційних витрат необхідно розробити стратегію ремонтних робіт з обліком поточних енерговтрат. Для того, щоб сучасна аварійно-ремонтна служба мала можливість реалізувати таку стратегію, необхідно розробити метод, що дозволяє оцінювати зазначені енергетичні втрати для кожного вузла, оскільки відмови різних вузлів ПГПА є переважно незалежними між собою і характеризуються лише конкретним рівнем визначеного параметра технічного стану певного вузла. Розв'язання цих задач можливі лише із застосуванням сучасних методів технічного діагностування.

Для забезпечення ефективної експлуатації поршневих ГПА в системі ПЗГ необхідно стратегію ремонтно-відновлювальних робіт будувати з урахуванням енергетичних втрат у вузлах робочого органу і привода. Для цього необхідно розробити метод діагностування його технічного стану і стратегію обслуговування, що на ньому базується. Це вимагає встановлення закономірностей впливу зовнішніх факторів на ефективність і надійність експлуатації поршневих газоперекачувальних агрегатів з метою розробки енергоефективної технології їх обслуговування.

В другому розділі розглядаються питання оцінки надійності і економічності експлуатації ПГПА в умовах компресорних станцій ПСГ і формуються засади їх підвищення з урахуванням впливу зовнішніх факторів.

Фактори, що визначають надійність компресорної станції ПСГ, можна поділити на режимні параметри, характеристики напружено-деформованого стану трубопроводів і обладнання та зовнішні впливи. Для КС ПСГ діапазон зміни кожної групи факторів впливу значно ширший порівняно з станціями газотранспортної системи, оскільки характер експлуатації нестационарний

Принцип розробки математичної моделі визначення надійності ПГПА базується на використанні опису потоку подій, розробленого в теорії ймовірностей. Подією вважається відмова агрегату (відмова об'єкта), яка настає при відмові елемента (деталі) системи (підсистеми, вузла). Відмови, що виникають в системах ПГПА, розглядаються як найпростіший потік подій, ймовірність яких розподілена за експоненціальним законом, що дозволяє вважати інтенсивність відмов сталою, тобто $\lambda = \text{const}$, і визначеною за статистикою експлуатації агрегатів. Модель надійності дозволяє визначити імовірність безвідмовної експлуатації машини $p_n(\Delta\tau)$ при різних значення напрацювання $\Delta\tau$ та в умовах різноманітного обслуговування. Для оцінки технічного стану агрегату виконується порівняння величини $p_n(\Delta\tau)$ з допустимим значенням надійності, p_o при цьому повинна виконуватися умова:

$$p_o \leq p_n(\Delta\tau) < 1 \quad (1)$$

На рисунку 1 показано приклад графіка обслуговування з проведенням діагностичних робіт для окремого ПГПА, який дозволяє оцінити надійність агрегату.

Дослідження економічності і потужності ПГПА проводились експериментальним шляхом на газомотокомпресорах МК-8 в умовах КС Богородчанського ПСГ.

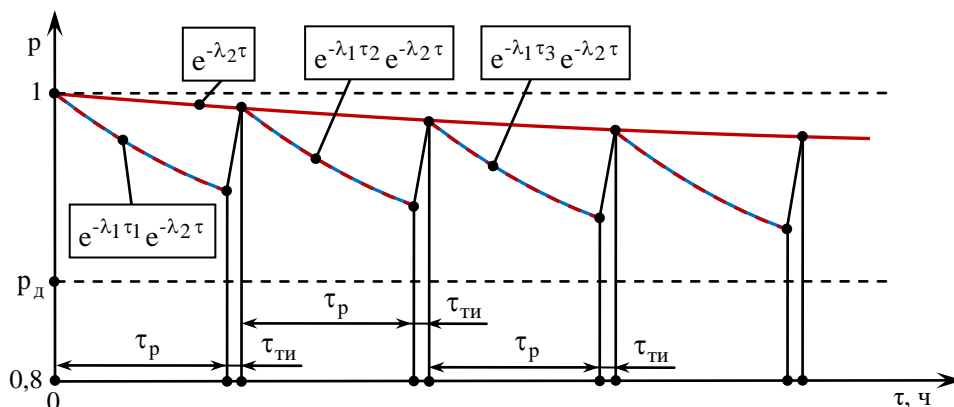


Рисунок 1 – Режим роботи ПГПА до проведення i -го обслуговування

Метою дослідження було встановлення впливу атмосферних умов та характеристик природного газу як пального ПГПА на потужність і економічність двигуна компресора. В кожній серії експериментів незалежними змінними вважалися значення барометричного тиску, температури атмосферного повітря на рівні повітрязабірників ГПА, відносної вологості атмосферного повітря і відносної густини паливного газу. Діапазон зміни барометричного тиску склав $h(773;709)$, мм рт. ст., діапазон зміни температури атмосферного повітря $t(30^{\circ}C;-5^{\circ}C)$, діапазон зміни відносної вологості атмосферного повітря $\varphi(44,5\%;82,3\%)$ і діапазон зміни відносної густини паливного газу $\Delta(0,556;0,672)$.

Ефективна потужність силових циліндрів газомотокомпресора визначалася методом обробки індикаторних діаграм, приклад яких подано на рисунку 2.



Рисунок 2 – Індикаторні діаграми силових циліндрів ГМК МК-8

На основі результатів обробки індикаторних діаграм силових циліндрів газомотокомпресора з урахуванням параметрів зовнішнього впливу побудовано залежності потужності і ККД від факторів впливу, які подано на рисунку 3. Обробка отриманих графічних залежностей методами математичної статистики, зокрема, використання множинної кореляції в поєднанні з методом найменших квадратів, дозволили побудувати лінії регресії для функціональних залежностей індикаторної потужності і ефективного ККД силової частини газомотокомпресора МК – 8 від відносних величин барометричного тиску, температури атмосферного повітря, його вологості і густини паливного газу:

- для індикаторної потужності

$$N_t = 611,55P^{0,277}T^{-0,05}\varphi^{0,564}\Delta^{-1,424} \quad (2)$$

- для ефективного ККД

$$\eta = 1,243P^{0,667}T^{-0,361}\varphi^{0,675}\Delta^{-3,55}$$

Приведені залежності дозволяють прогнозувати режим роботи КС ПСГ при заданих величинах продуктивності і ступеня стиску з урахуванням передбачень гідрометеоцентру про погодні умови в регіоні, що дозволить забезпечити економічний режим експлуатації.

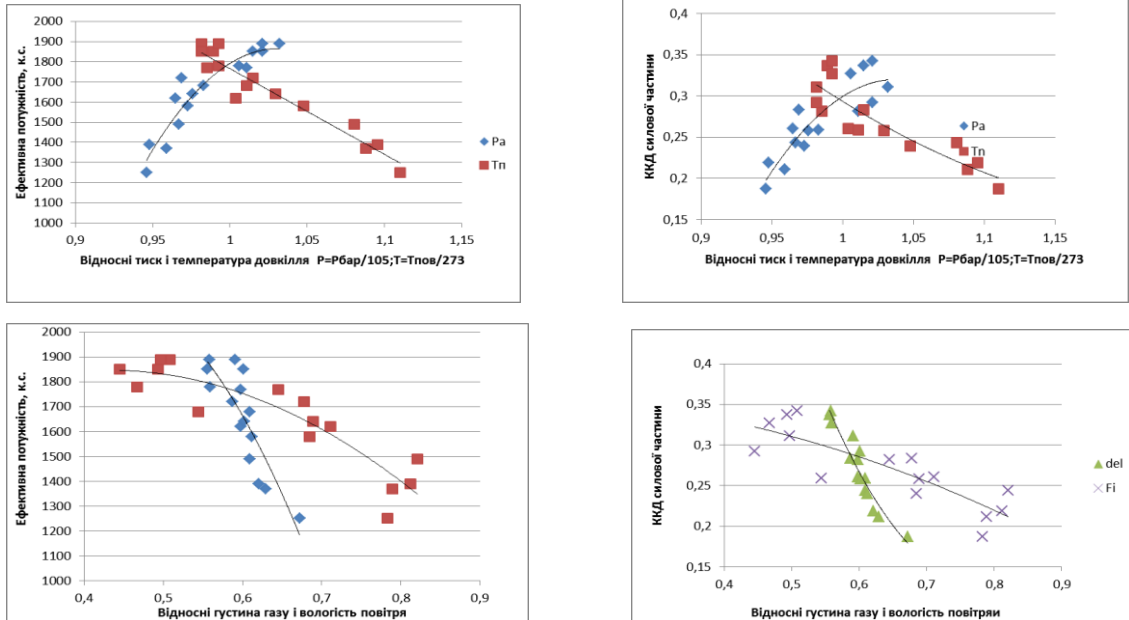


Рисунок 3 - Залежності потужності і ККД від факторів впливу

Третій розділ присвячено питанням підвищення ефективності експлуатації компресорних станцій ПСГ на основі оптимізації обслуговування ПГПА. Врахування періодичного характеру експлуатації компресорної станції сховища на протязі року в математичній моделі обслуговування, дискретність аргументу і обмеження функції вимагають внесення корективів у побудову моделі, яка являє собою функціональну залежність питомих приведених затрат на обслуговування ПГПА в залежності від міжремонтного періоду при відомому значення інтенсивності відмов $\lambda(t)$, вигляд якої вдалося встановити на основі фактичних даних про надійність експлуатації ПГПА на компресорній станції Богородчанського ПСГ за період її експлуатації впродовж 2014-2016 рр. Вказані залежності приведено на рисунку 4.

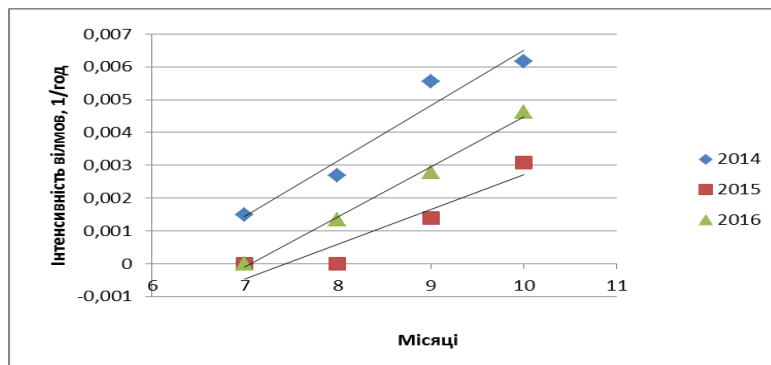


Рисунок 4 – Інтенсивність відмов ПГПА в період експлуатації

В результаті отримано формули, які дозволяють визначити оптимальні параметри обслуговування ПГПА на компресорних станціях ПСГ.

Реалізація стратегії обслуговування ПГПА за реальним станом вимагає проведення діагностичних робіт, найбільш ефективними показали себе методи термографування (рисунок 5)

Для того, щоб одержати допустимі значення рівня енерговитрат D_i для системи циліндрових порожнин, необхідно оцінити вплив відмови в одній порожнині на енерговтрати в системі ПГПА.

Нехай у системі паралельно з'єднано n однотипних компресорних циліндрів, і ξ_j і η_j – масова продуктивність і питома робота циклу в порожнині, c' – вартість одиниці потужності в циліндровій порожнині. Тоді витрати на компримування газу в цій системі:

$$Z_1 = \sum_{j=1}^n c' \xi_j \lambda_j, \quad (3)$$

Зміна величини структурних параметрів стану проявиться в зниженні масової продуктивності в j -ій порожнині, яка характеризується коефіцієнтом зниження подачі η_j і величиною відносних енерговтрат H_i . Основним способом компенсації недоподачі газу споживачу є підключення резервних агрегатів, тобто додаткових циліндрів. Кількість підключених додаткових ГПА або відключених порожнин мертвого простору визначається умовою сталості масової продуктивності. У цьому випадку:

$$\sum_{j=1}^n (1 - \lambda_j) / \lambda_k = 1, \quad (4)$$

де λ_k – коефіцієнт зниження подачі циліндрової порожнини, що включається для компенсації недоподачі.

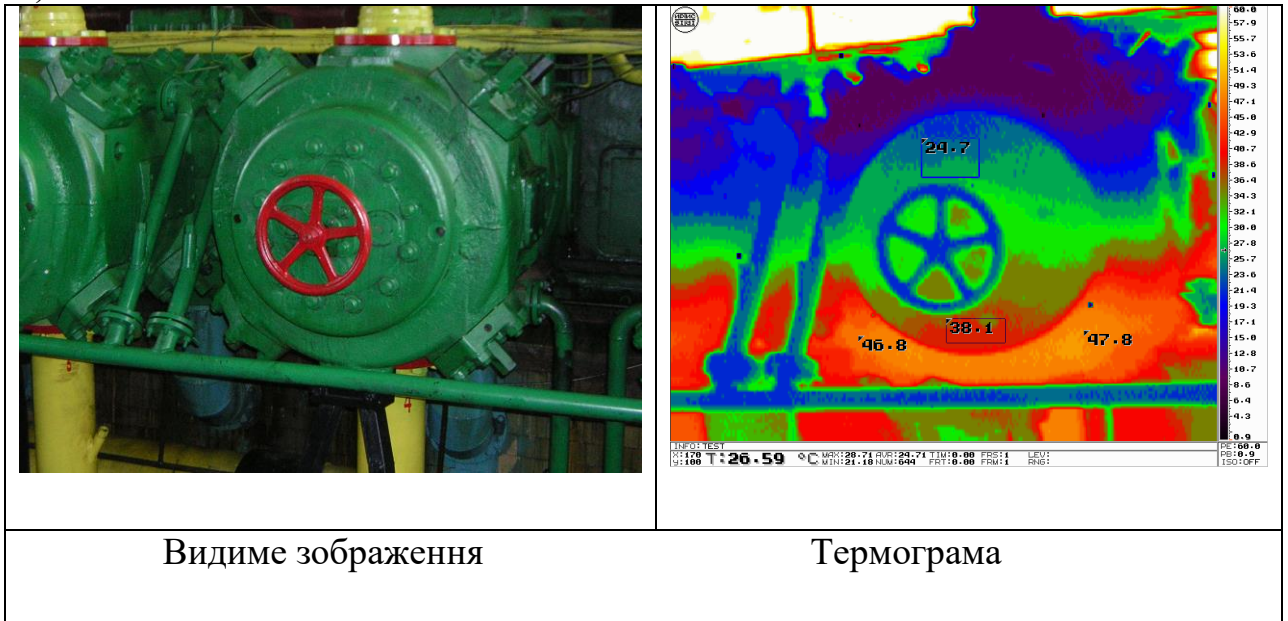
Величина витрат через енерговтрати у порожнинах, де є вузол, що відмовив, становить:

$$\Delta Z_j = H_j \gamma_j c' \xi_j \lambda_j \quad (5)$$

Коефіцієнт η_j враховує вплив системи циліндрів ПГПА, з'єднаних паралельно, на енергетичні втрати і витрати через ці втрати в j -ому циліндрі. Оскільки $H_k(t)$, $H_j(t)$ є функціями часу, то η_j також змінюється з плином часу. Величина H_k залежить від способу компенсації недоподачі газу.

Оцінимо вплив коефіцієнта η на величини допустимих значень H і міжремонтного інтервалу часу t_m . Для цього оцінимо інтервал зміни η . Якщо $\eta=1$, то робота одиничного циліндра і циліндра в системі буде характеризуватися однаковими допустимими значеннями H і міжремонтним інтервалом часу t_m .

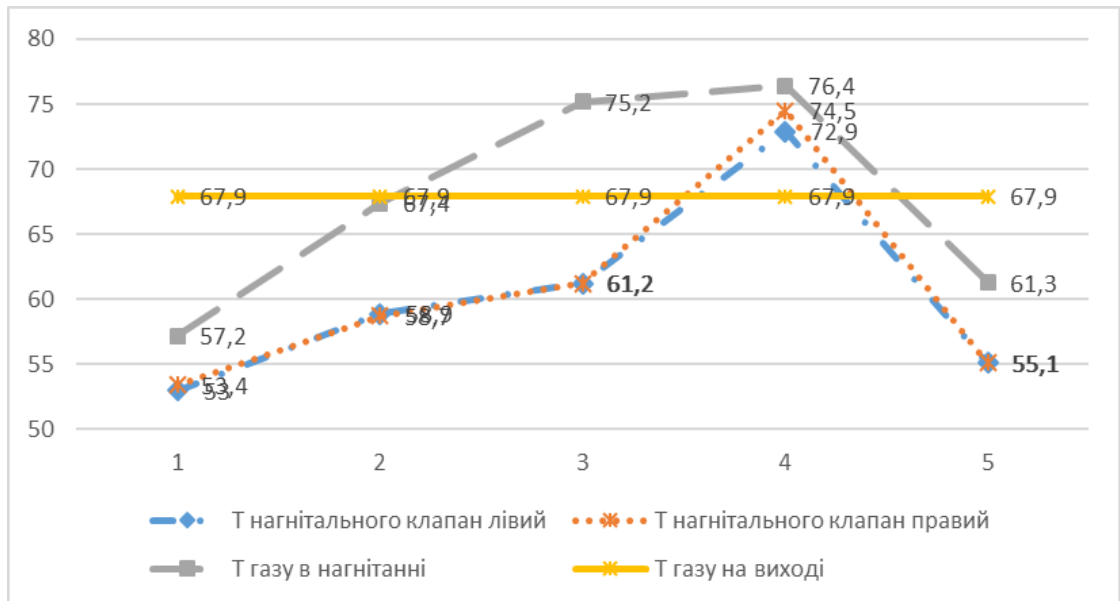
а)



Видиме зображення

Термограма

б)



а) термографічна карта циліндра ГМК; б) результати термографування

Рисунок 5 – Аномальний нагрів нагнітальних клапанів (агрегат №1)

Якщо $H_k = idem$, то при зміні H_i в інтервалі від 0 до 0,40 при сталому H_k , γ_i буде змінюватися в інтервалі від 1,16 до 0,87, причому великим значенням H_i будуть відповідати значення $\eta_i < 1$. При таких невеликих відносних змінах η_i добуток $H_i \gamma_i$ буде функцією, зумовленою, в основному, величиною H_i . Отже, $H_i \gamma_i$ також буде статичною функцією:

$$H_i' = H_i \gamma_i = v_i' t^{\alpha_i}, \quad (6)$$

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлено, що ремонтно-відновні операції призначаються за рівнем енерговитрат і з необхідною точністю можуть бути визначені розробленим методом технічної діагностики клапанів.

Оптимізація технічного обслуговування ПГПА має за мету визначення періодичності проведення профілактичних заходів, при якій загальні витрати на експлуатацію будуть мінімальними. Зменшення частоти профілактичних заходів призведе до зростання потоку відмов, що, в свою чергу, викличе зростання затрат на усунення аварій. Зростання частоти проведення планово-попереджувальних ремонтів призведе до подорожчання процесу обслуговування. Тому існує оптимум процесу обслуговування, який характеризується мінімальними затратами на експлуатацію ПГПА.

Відповідно до класифікації експлуатаційних витрат технічний стан поршневих газоперекачувальних агрегатів визначає витрати, пов'язані з усуненням непередбачуваних відмов, проведенням попереджувальних ремонтно-відновних операцій діагностуванням стану вузлів. Витрати, пов'язані з усуненням непередбачуваних відмов, визначають як суму:

$$A_2 = x_1 q_1 r_1 m + x_2 r_2 + x_3 q_3 + S_A(t) + x_4, \quad (7)$$

де x – працемісткість усунення відмов, вимірювана часом його усунення; q_1 – середня годинна тарифна ставка працівників, що усувають відмову; r_1 – коефіцієнт, що враховує нарахування на зарплату і накладні витрати; m – число робочих, що усувають відмову; $S(t)$ – витрати, що характеризують енергетичні втрати через відмову; x_2 – вартість запчастин і матеріалів, що витрачаються при ліквідації відмови; r_2 – коефіцієнт, що враховує націнку на запасні частини і матеріали, x_3 – тривалість простою машини при даній відмові; q_3 – середні втрати від простою машини в одиницю часу, x_4 – витрати, пов'язані з доставкою запасних частин і працівників до місця усунення відмови.

Витрати, пов'язані з проведенням планово-попереджувальних ремонтів (ППР), визначаються наступним чином:

$$C_x = x_1 q_1 r_1 m + x_2 r_2 + S_c(t), \quad (8)$$

де $S_c(t)$ – витрати, пов'язані з енергетичними втратами через відмови в міжремонтний період.

Припустивши, що ремонти окремих вузлів і відмови в окремих вузлах не впливають на структурні параметри технічного стану, а також взявши до уваги, що раптові відмови вузлів не виникатимуть при експлуатації компресора з використанням технічної діагностики, можна одержати узагальнену залежність експлуатаційних витрат, пов'язаних з технічним станом компресорного циліндра ПГПА :

$$\tilde{C}_T = C_x P^b(D) + B = P^b(D)(C_x + B'), B' = \frac{B}{P^b(D)}, \quad (9)$$

де P^b – число попереджувальних ремонтів (у т.ч. за результатами діагностування) за період T наробітку ПГПА до списання; B – число проведених діагностувань за період T ; D – діагностичний параметр технічного стану вузла.

Очевидно, найбільший ефект при експлуатації буде досягнутий при такому допустимому значенні $H=D$, коли:

$$\tilde{C}_0 = \min_{0 < D} \frac{\tilde{C}_m}{T} \sim \min_{0 < D} \tilde{C}, \quad (10)$$

Цей вираз є функцією мети для визначення допустимих величин діагностичних параметрів. Значення \tilde{C}_0 характеризує найменший досяжний рівень експлуатаційних витрат в одиницю часу, а також протягом всього періоду T наробітку ПГПА при його експлуатації з проведенням своєчасних, зумовлених технічним станом вузла, ремонтно-відновлювальних операцій.

В четвертому розділі розглянуто вплив сезонних деформаційних процесів на надійність експлуатації КС підземного сховища газу, також принципи формування методики прогнозування режимів і обслуговування ПГПА в умовах КС підземних сховищ газу та результати її апробації в умовах КС Богородчанського ПСГ.

Метою проведених досліджень є встановлення кількісних показників деформаційних характеристик фундаментів газомотокомпресорів на підставі геодезичних вимірювань.

В якості експериментального об'єкта було обрано Богородчанське ПСГ, на території якого побудована спеціальна геодезична мережа, що складається з магістрального нівелірних ходу 1 загальною довжиною 6,1 км, що спирається на два куці опорних реперів, які облаштовані за межами контуру пласта-колектора. В першу групу опорних реперів входить RP 1, RP 2 і RP 3, а в другу - RP 4, RP 5, RP 6. Опорні групи реперів закладені в корінні породи (рисунки 6).

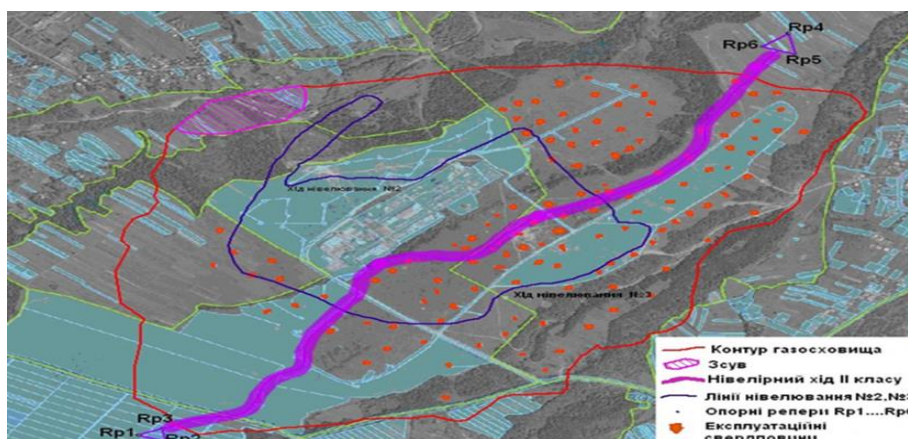


Рисунок 6 - Схема висотної геодезичної мережі

Використовуючи дані обчислень середніх значень переміщень покрівлі ПСГ, побудовано графік вертикальних переміщень робочих реперів (рисунок 7).

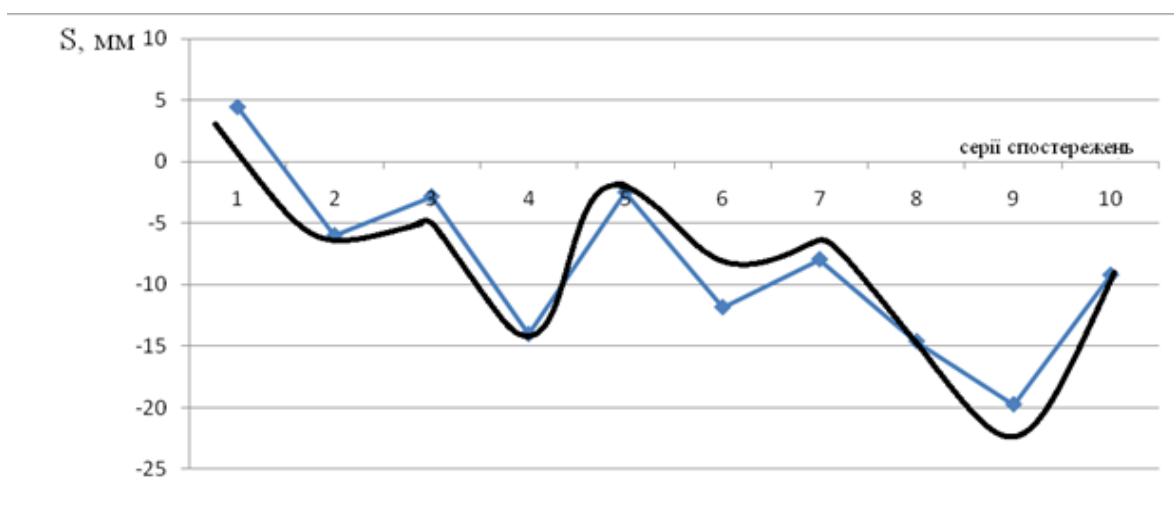


Рисунок 7 - Вертикальні переміщення покрівлі ПСГ

Особлива увага в системі безпечної експлуатації ПСГ приділялася визначенню деформаційних характеристик інженерних споруд і газомотокомпресорів. З цією метою на несучих колонах інженерних споруд, фундаментних плитах газомотокомпресорів і технологічних елементах трубопроводів були встановлені спеціальні нівелірні марки. Висотне положення зазначених марок виконувалося за програмою нівелювання II класу.

Аналіз результатів дозволяє зробити висновок, що вертикальні переміщення всіх фундаментних плит мають позитивне значення, що свідчить про «випинання» земної поверхні на території компресорної станції, яка знаходиться в центральній частині ПСГ. Крен фундаментних плит для різних ГМК відрізняються як за величиною, так і напрямом (знаки +; -). Найбільш несприятливим для експлуатації є поперечний крен фундаментної плити ГМК

№3, який становить 0,96 мм / м і крен ГМК №1 - 0,54 мм / м. Наслідком таких кренів може бути вібрація ГМК, а, можливо, і руйнування підшипників ГМК, що вимагає виконання необхідних спеціальних технічних робіт.

Наведені дослідження відображають реальну картину геодинамічних рухів земної поверхні експлуатованих підземних сховищ газу. Встановлено, що динаміка вертикальних переміщень земної поверхні і технологічного обладнання носить чітко виражений циклічний характер, пов'язаний з режимом експлуатації ПСГ.

На підставі обробки результатів геодезичних вимірювань визначено деформаційні характеристики фундаментних плит газомотокомпресорів, що є важливою складовою частиною загальних методів неруйнівного контролю за безпекою експлуатації ПСГ.

Результати проведених досліджень і отримані закономірності покладені в основу створеної методики прогнозування режимів і обслуговування ПГПА в умовах КС підземних сховищ, яка має за мету врахування впливу атмосферних умов та характеристик природного газу як пального ПГПА на потужність і економічність двигуна компресора, а також відновлення працездатності ГПА за умови мінімізації затрат на обслуговування. Методика містить 4 блоки, кожен з яких має за мету оптимізувати певну ділянку процесу обслуговування, і включає набір алгоритмів і програмних модулів для реалізації. Апробація запропонованої методики в умовах компресорного закачування газу в Богородчанське ПСГ на протязі періоду 2016 року показала високу ефективність прогнозу і в результаті зниження собівартості компримування газу на 2,2%.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ПІДСУМКОВІ ВИСНОВКИ

На основі проведених досліджень вирішено важливу науково-прикладну задачу, яка полягає в конкретизації закономірностей процесу експлуатації і технічного стану газомотокомпресорів в умовах компресорних станцій підземних сховищ газу з урахуванням різноманітних зовнішніх впливів, що дає можливість підвищити надійність і економічність системи зберігання газу, а саме:

1. Отримана математична модель визначення надійності компресорної установки на основі найпростішого потоку відмов, показано і розглянуто на практичному прикладі методику прогнозування технічного стану машини та на основі технічного діагностування з метою забезпечення заданої надійності.

2. На основі проведених експериментальних досліджень у виробничих умовах встановлено закономірності впливу зовнішніх факторів, зокрема, барометричного тиску, температури і вологості атмосферного повітря, а також відносної густини паливного газу на потужність і економічність силової частини газомотокомпресора, що дозволить забезпечити ефективну роботу компресорної станції підземного сховища газу; показано, що вплив

атмосферних умов та температури паливного газу на показники потужності та економічні показники різних модифікацій поршневих газоперекачувальних агрегатів неоднаковий, тому отримано варіанти формул і побудовано завантажувальні криві для кожного типу поршневого газового двигуна.

3. На основі математичного моделювання оптимізації процесу обслуговування ПГПА в умовах КС ПСГ отримані залежності впливу виробничих факторів на потужність і економічність агрегату, які дозволяють визначити раціональні режими експлуатації ПГПА в умовах компресорних станцій ПСГ, що дало змогу запропонувати методику вибору раціональних режимів експлуатації ПГПА.

4. Побудовано функцію мети підвищення ефективності експлуатації ПГПА при проведенні параметричного діагностування циліндра і визначено допустимі енерговтрати і міжремонтний період для вузлів циліндрової порожнини. Результати термографування ГМК дозволяють при їх обробці методами математичної статистики перейти до формування науково-методичних засад побудови методики діагностики та оптимізації обслуговування ПГПА в умовах КС ПСГ.

5. На підставі обробки результатів геодезичних вимірювань визначено деформаційні характеристики фундаментних плит газомотокомпресорів, що є важливою складовою частиною загальних методів неруйнівного контролю за безпекою експлуатації ПСГ. Встановлені закономірності та отримані результати використано при створенні галузевої методики прогнозування режимів і обслуговування ПГПА в умовах КС підземних сховищ газу, апробація якої в умовах КС Богородчанського ПСГ показала високу ефективність.

Основний зміст дисертаційної роботи опубліковано в наступних виданнях:

1. Грудз В.Я., Бегін С.В. Підвищення ефективності експлуатації компресорних станцій псг на основі оптимізації обслуговування газоперекачувальних агрегатів /Нафтогазова енергетика. 2017. №1(27). С.65 – 69 **(фахове видання)**.
2. Грудз В.Я., Бегін С.В. Вплив метеорологічних умов на потужність і економічність двигунів газомотокомпресорів / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. №1(60). 2018. С. 12 – 16 **(фахове видання)**.
3. Грудз В.Я., Грудз Я.В., Бегін С.В. Дослідження економічності та потужності експлуатації поршневих газоперекачувальних агрегатів / Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. №1(62). 2017. С. 61 – 65 **(фахове видання)**.
4. Perovych L., Begin S. Seasonal deformation processes at underground gas storage station / Baltic surveying. International scientific journal. 2017. volume 6. 83-86 **(закордонне видання)**.

5. Саприкін С.О., Олійник Ю.А., Грудз В.Я., Бегін С.В. Математична модель визначення надійності компресорної установки / Нафтогазова галузь України. 2017. №5. С.20 – 24 (фахове видання).
6. Бегін С.В. Діагностування основних вузлів газомотокомпресорів методами термографування / Матеріали 6-тої Міжнародної науково-технічної конференції «Нафтогазова енергетика - 2017». м. Івано-Франківськ, 15 – 19 травня 2017 р.. С.212.

АНОТАЦІЯ

Бегін С.В. Підвищення ефективності і надійності експлуатації газомотокомпресорів в умовах компресорних станцій підземних сховищ газу. Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.13 – Трубопровідний транспорт, нафто газосховища. Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу (м. Івано-Франківськ, 2018).

Дисертацію присвячено дослідженням надійності компресорної станції підземного сховища газу і прогнозуванню технічного стану ГПА з метою забезпечення високої ефективності експлуатації сховища. Експериментальні дослідження у виробничих умовах дозволили встановити закономірності впливу зовнішніх факторів на потужність і економічність силової частини газомотокомпресора, що дає змогу забезпечити ефективну роботу компресорної станції.

Побудовано функцію мети підвищення ефективності експлуатації агрегатів при проведенні параметричного діагностування циліндра і визначено допустимі енерговтрати і міжремонтний період для вузлів циліндрової порожнини. На підставі обробки результатів геодезичних вимірювань визначено деформаційні характеристики фундаментних плит газомотокомпресорів, що є важливою складовою частиною загальних методів неруйнівного контролю за безпекою експлуатації ПСГ. Встановлені закономірності та отримані результати використано при створенні галузевої методики прогнозування режимів і обслуговування ПГПА в умовах КС підземних сховищ газу, апробація якої в умовах КС Богородчанського ПСГ показала високу ефективність.

Ключові слова: підземне сховище газу, компресорна станція, газомотокомпресор, надійність, ефективність, обслуговування, витрати.

SUMMARY

Begin S.V. Increase of efficiency and reliability of operation of gas-moto compressors in conditions of compressor stations of underground gas storage. Manuscript.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences in specialty 05.15.13 - Pipeline Transport, Oil and Gas Storages. Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas (Ivano-Frankivsk, 2018).

The dissertation is devoted to the research of the reliability of the compressor station of the underground storage of gas and the forecasting of the technical state of the GPA in order to ensure a high efficiency of the operation of the storage. Experimental studies in the production conditions allowed to establish the patterns of the influence of external factors on the power and efficiency of the power unit of the gas moto compressor, which enables to ensure the efficient operation of the compressor station. The function of the purpose of increasing the efficiency of operation of aggregates during parametric diagnostics of the cylinder was determined and the allowable energy costs and inter-repair period for the nodes of the cylinder cavity were determined. Based on the processing of the results of geodetic measurements, the deformation characteristics of the base plates of gas-melt compressors were determined, which is an important part of the general methods of non-destructive control over the safety of the operation of the UGS. The established regularities and the obtained results are used in the creation of the industry-specific method of forecasting regimes and maintenance of PGPA in the conditions of the COP of underground gas storage facilities, testing which in the conditions of the COP Bogorodchansky PSP showed a high efficiency.

Key words: underground storage of gas, compressor station, gas moto compressor, reliability, efficiency, service, expenses.

АННОТАЦИЯ

Бегин С.В. Повышение эффективности и надежности эксплуатации газомотокомпрессоров в условиях компрессорных станций 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 (г. Ивано-Франковск, 2018).

Диссертация посвящена исследованию надежности компрессорной станции подземного хранилища газа и прогнозированию технического состояния ГПА с целью обеспечения высокой эффективности эксплуатации хранилища.

Экспериментальные исследования в производственных условиях позволили установить закономерности влияния внешних факторов на мощность и экономичность силовой части газомотокомпрессора, что позволяет

обеспечить эффективную работу компрессорной станции. Следует отметить особенности обработки индикаторных диаграмм при определении внутренней мощности силовых цилиндров газомотокомпрессора.

Построено функцию цели повышения эффективности эксплуатации агрегатов при проведении параметрического диагностирования цилиндра термографическими методами, которая представляет собой удельные затраты на проведение технического обслуживания агрегата и повышение расхода топливного газа при снижении КПД, и определены допустимые энергопотери и межремонтный период для узлов цилиндрической полости. Проведенные исследования и разработки позволили оптимизировать технологический процесс обслуживания поршневых газоперекачивающих агрегатов в условиях компрессорных станций подземных хранилищ газа.

На основании обработки результатов геодезических измерений по установленным реперным точкам определены деформационные характеристики фундаментных плит газомотокомпрессоров, что является важной составной частью общих методов неразрушающего контроля за безопасностью эксплуатации ПХГ.

Установлены закономерности и полученные результаты использованы при создании отраслевой методики прогнозирования режимов и обслуживания поршневых газоперекачивающих агрегатов в условиях компрессорных станций подземных хранилищ газа, апробация которой в условиях КС Богородчанского газохранилища показала высокую эффективность.

Ключевые слова: подземное хранилище газа, компрессорная станция, газомотокомпрессор, надежность, эффективность, обслуживание, расходы.