

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ПОТУЖНОСТІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ПОРШНЕВИХ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

В.Я. Грудз, Я.В. Грудз, С.В. Бегін

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,  
e-mail: snp@nimg.edu.ua

*Розглядаються питання впливу зовнішніх факторів, зокрема барометричного тиску, температури і вологості атмосферного повітря, а також фізичних властивостей паливного газу на потужність і економічність поршневого газоперекачувального агрегату в умовах компресорних станцій підземних сховищ газу. На основі проведених експериментів визначено індикаторну потужність і ефективний коефіцієнт корисної дії силової частини газомотокомпресора і побудовано кореляційні залежності від вказаних параметрів. Регресійний аналіз отриманих залежностей дозволив отримати емпіричні формули для визначення індикаторної потужності та ефективного ККД силових циліндрів у різних кліматичних і погодних умовах, що дає змогу прогнозувати режими експлуатації компресорних станцій ПСГ з урахуванням зовнішніх впливів.*

Ключові слова: газомотокомпресор, силовий циліндр, потужність, економічність, фактори зовнішнього впливу.

*Рассматриваются вопросы влияния внешних факторов, в частности барометрического давления, температуры и влажности атмосферного воздуха, а также физических свойств топливного газа на мощность и экономичность поршневых газоперекачивающих агрегатов в условиях компресорных станций подземных хранилищ газа. По результатам приведенных экспериментов определены индикаторная мощность и эффективный коэффициент полезного действия силовой части газомотокомпресора, а также построена корреляционная зависимость от указанных параметров. Регрессионный анализ полученных зависимостей позволил получить эмпирические формулы для определения индикаторной мощности и эффективного КПД силовых цилиндров в различных климатических и погодных условиях для прогнозирования режимов эксплуатации компресорных станций ПХГ с учетом внешних воздействий.*

Ключевые слова: газомотокомпрессоров, силовой цилиндр, мощность, экономичность, факторы внешнего воздействия.

*The article deals with issues concerning the influence of external factors, such as barometer pressure, the atmospheric air temperature and moisture, physical properties of fuel gas on the capability and efficiency of gas-compressor unit pistons at compressor stations of underground storage facilities. Based on the conducted experiments true power and effective efficiency of the gas engine compressor power part have been identified and the correlation dependencies on specified parameters have been developed. The regression analysis of received dependencies allowed to obtain empiric formulas for defining true power and effective efficiency of the actuators at various climate and weather conditions that allow to forecast the operational modes of gas-compressor units of underground storage facilities, taking into account external factors.*

Key words: gas engine compressor, actuator, capability, efficiency, external factors.

**Вступ.** Газотранспортна системи України експлуатує парк газоперекачувальних агрегатів, до якого входять відцентрові нагнітачі і поршневі компресори. Поршневі компресори складають близько 40% парку, а загальна потужність ПГПА в парку перевищує 5,5 МВт. Агрегати об'єднані в систему ПСГ, призначення якої полягає у закачуванні і відборі газу у відповідні періоди експлуатації сховища. У цій системі агрегати можуть знаходитися в послідовному і паралельному з'єднанні. Агрегати, що з'єднуються паралельно, утворюють підсистему – компресорну станцію.

Зміна функціональних характеристик системи ПСГ може призвести до значних економічних збитків у зв'язку з недопоставками газу споживачам. Енергетична ефективність такої системи можна характеризувати деяким показником, одержуваним як сума показників енергоефективності паралельно з'єднаних незалежних підсистем. Тому забезпечення ефективної роботи окремих ПГПА призведе до економії енергоносіїв при забезпеченні споживачів природним газом.

Функціональні характеристики одиничного газоперекачувального агрегату визначаються його типом, технічним станом та зовнішніми впливами, до яких, насамперед, слід віднести характеристики природних умов та параметри транспортованого газу. Дослідження впливу атмосферних умов та характеристик природного газу на експлуатаційні показники агрегатів дозволить запропонувати загальні закономірності покращення паливно-економічних параметрів поршневих ГПА.

**Огляд літературних джерел.** Дослідженню ефективності і надійності роботи поршневих ГПА в умовах компресорної станції ПСГ присвячено роботи К.В. Ісаєва [1], А.С.Копелевича [2], А.А. Козобкова [3], В.М. Михліна [4], П.І. Пластиніна [5], Б.М. Смереки [6], М.І. Френкеля [7], Г.К. Храпача [8] та ін. Ними розглянуті режими роботи ПГПА, можливості їхнього регулювання, динаміка роботи клапанів, вивчені аспекти розрахунків економічності й надійності та методи їх підвищення. Однак, проблеми діагностування стану силового цилін-

дра в умовах змінних параметрів зовнішнього впливу та характеристик паливного газу з метою підвищення ефективності і надійності експлуатації при переході на систему обслуговування за реальним технічним станом елементів обладнання практично не приділено уваги.

Слід також відзначити роботи В.В. Костіва [9], в яких розглядається експлуатація і діагностування технічного стану поршневіх ГПА в умовах компресорних станцій ПСГ, однак результати наведених досліджень стосуються виключно компресорної частини агрегату, в той час, як силовий блок слугує її приводом і не може не впливати на ефективність експлуатації газомотокомпресора загалом.

**Мета дослідження.** Метою дослідження було встановлення впливу атмосферних умов та характеристик природного газу, як пального ПГПА, на потужність і економічність двигуна компресора.

Для досягнення поставленої мети проводились серії експериментів на газоперекачувальних агрегатах МК-8, встановлених на компресорній станції Богородчанського ПСГ. В кожній серії експериментів незалежними змінними вважалися значення барометричного тиску, температури атмосферного повітря на рівні повітрязбірників ГПА, відносної вологості атмосферного повітря і відносної густини паливного газу.

**Методика проведення досліджень.** Барометричний тиск вимірювали і реєстрували в часі за допомогою стандартного барометра типу ПБС-760-2 безперервно впродовж кожної доби.

Температуру атмосферного повітря вимірювали стандартним шкальним термометром і записували в журнал через кожні дві години впродовж доби.

Відносна вологість атмосферного повітря вимірювалася стандартним психрометром Августа і записувалася в журнал через кожні дві години протягом доби.

Відносну густину газу обчислювали за його складом, який визначали у хіміфізлабораторії підприємства і записували в журнал двічі на добу.

Використавши результати вимірювань, вибрано наступні незалежні змінні параметри:

- відносний барометричний тиск

$$p = h\rho g / 10^5,$$

де  $h$  – покази барометра, мм рт. ст.;

$\rho$  – густина ртуті;

– відносна температура атмосферного повітря

$$T = 273 + t / 273,$$

де  $t$  – покази термометра, С;

– відносна вологість повітря  $\varphi$ ;

– відносна густина паливного газу  $\Delta$ .

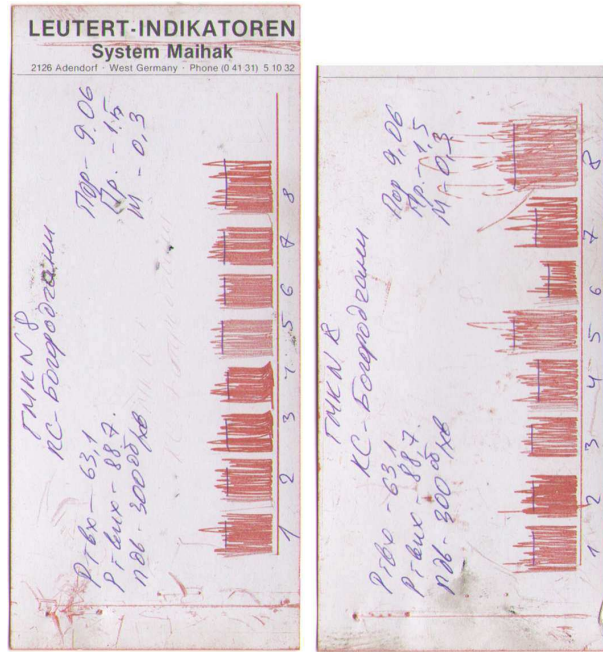
Функціями-відгуками в кожній серії експериментів вважалися індикаторна потужність силових циліндрів газомотокомпресора  $N_i$  і

ефективний коефіцієнт корисної дії (ККД) приводу  $\eta$ .

Аналізуючи вхідну інформацію за період 2015–2016 рр. вибрали такі режими експлуатації ПГПА в умовах компресорної станції Богородчанського ПСГ, в яких досягалася максимальна зміна одного з незалежних параметрів при практично сталих значеннях решти. За таких умов діапазон зміни барометричного тиску склав  $h$  (773;709), мм рт. ст., діапазон зміни температури атмосферного повітря  $t$  (30°С; –5°С), діапазон зміни відносної вологості атмосферного повітря  $\varphi$  (44,5%;82,3%) і діапазон зміни відносної густини паливного газу  $\Delta$  (0,556;0,672).

Для вказаних діапазонів зміни незалежних параметрів визначали значення функцій-відгуків, якими вважалися індикаторна потужність силових циліндрів газомотокомпресора  $N_i$  і ефективний ККД приводу  $\eta$ .

Ефективна потужність силових циліндрів газомотокомпресора визначали методом оброблення індикаторних діаграм, приклад яких подано на рисунку 1.



**Рисунок 1 – Приклад індикаторних діаграм силових циліндрів газомотокомпресора № 8 компресорної станції Богородчанського ПСГ**

За результатами оброблення індикаторних діаграм для кожного випадку і для кожного окремого циліндра газомотокомпресора визначали величину середньоіндикаторного тиску  $P_{cpi}$  і об'єм, що описує поршень  $V_h$ . Тоді індикаторна потужність силового циліндра визначалася за формулою

$$N_t = P_{cpi} V_h \omega, \quad (1)$$

де  $\omega$  – кутова швидкість обертання вала газомотокомпресора.

Якщо середньоіндикаторний тиск у різних циліндрах газомотокомпресора виявлявся різ-

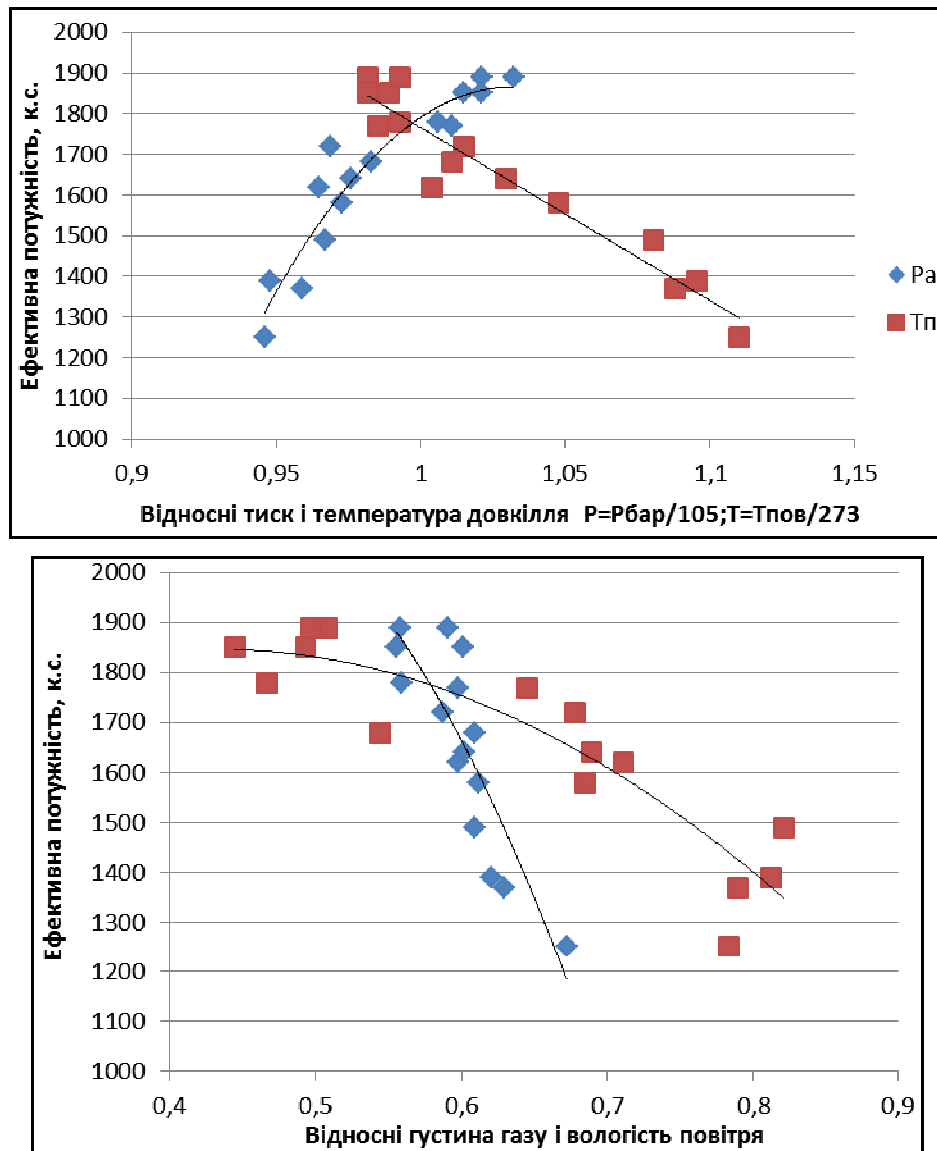


Рисунок 2 – Залежність ефективної потужності газомотокомпресора від відносних параметрів

ним за величиною, то сумарна індикаторна потужність агрегату визначалася як сума індикаторних потужностей всіх силових циліндрів, тобто

$$P_{cp\ Kt} = \frac{1}{8} \sum_{n=1}^8 P_{cpin} \quad (2)$$

де  $n$  – номер циліндра.

Величина ефективного ККД силової частини газомотокомпресора визначалася відношенням корисної потужності до величини підведеної енергії за одиницю часу. Корисною потужністю вважалася індикаторна потужність, визначена за індикаторними діаграмами за співвідношеннями (1) і (2)  $N_{Ki}$ . Для визначення величини підведеної енергії за одиницю часу вимірювалася витрата паливного газу  $q$  і розраховувалася за відомим складом газу його нижчу теплотворну здатність  $Q_p^H$

$$Q_p^H = \sum_i Q_p^H v_i \quad (3)$$

де  $v_i$  – об'ємна концентрація  $i$ -того компонента газу в суміші.

Підведена до силових циліндрів енергія з потоком паливного газу складає

$$E = qQ_p^H \quad (4)$$

Тоді ефективний ККД силової частини газомотокомпресора:

$$\eta = \frac{N_{Ki}}{E} \quad (5)$$

**Результати досліджень і їх аналіз.** За приведеною методикою виконано розрахунки індикаторної потужності газомотокомпресора і його ефективного ККД для різних значень незалежних параметрів із вказаних діапазонів. В результаті отримано графічні залежності (рис. 2 і 3).

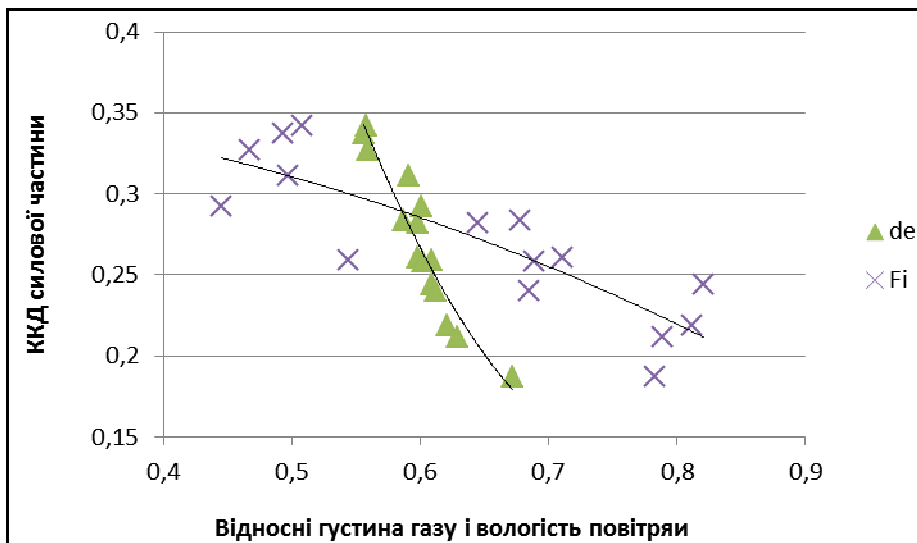
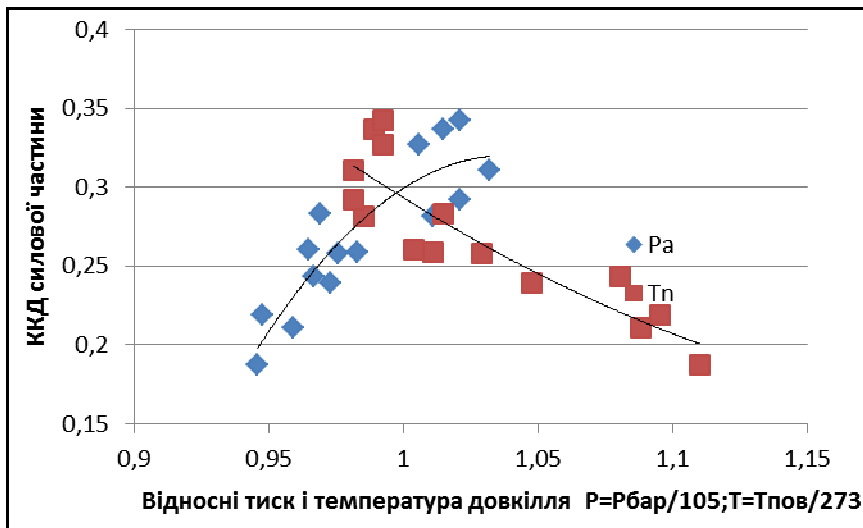


Рисунок 3 – Залежність ефективного ККД газомотокомпресора від відносних параметрів

Аналіз отриманих залежностей показує, що зростання барометричного тиску і зменшення температури атмосферного повітря призводять до підвищення індикаторної потужності силових циліндрів і зростання ефективного ККД. З фізичної точки зору, тиск і температура повітря визначають його стан, зокрема густину. Тому збільшення густини атмосферного повітря, викликане зростанням барометричного тиску і спадом температури, призводить до зростання маси кисню в газоповітряній суміші, яка згоряє в силовому циліндрі і забезпечує збільшення маси газу, що подається в силовий циліндр. Загалом зростання маси газоповітряної суміші збільшує її енергоємність і призводить до підвищення потужності.

Зростання вологості атмосферного повітря, навпаки, призводить до зменшення маси кисню, що подається в циліндр, і зменшує індикаторну потужність силового циліндра.

Збільшення відносної густини паливного газу, тобто зростання його маси при сталому об'ємі, вимагає зростання масової подачі кисню в циліндр. Тому при незмінній подачі повітря газоповітряна суміш в силовому циліндрі

збіднена, що викликає зниження індикаторної потужності. Крім того, при зростанні відносної густини паливного газу зростає його теплотворна здатність у розрахунку на одиницю об'єму газу, але зменшується в розрахунку на одиницю маси газу. В результаті загальний ефект зменшення потужності при зростанні відносної густини газу посилюється. Тому залежність індикаторної потужності від відносної густини паливного газу є найбільш сильною.

Залежності ефективного ККД від перелічених параметрів повторюють фізичну картину процесу перетворення теплової енергії згоряння газового пального у силовому циліндрі на механічну енергію привода компресора.

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. Ці залежності мають вигляд степеневих функцій:

– для індикаторної потужності

$$N_i = 611,55P^{0,277}T^{-0,05}\varphi^{0,564}\Delta^{-1,424}, \quad (6)$$

– для ефективного ККД

$$\eta = 1,243P^{0,667}T^{-0,361}\varphi^{0,675}\Delta^{-3,55}. \quad (7)$$

### Висновки

Наведені залежності дозволяють прогнозувати режим роботи компресорних станцій підземних сховищ газу, обладнаних газомотокомпресорами, при заданих величинах продуктивності і ступеня стискування з урахуванням передбачень гідрометеоцентру про погодні умови в регіоні, що дозволить забезпечити нормальний режим експлуатації ПСГ.

Таким чином, 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.

### Література

- 1 Исаев К.В. Теория и эксперименты по идентификации рабочего процесса поршневых машин / К.В. Исаев, Е.Д. Соложенцев // В сб. Исследования в области компрессорных машин и технологии их производства. – Сумы, 1975. – С. 58-69.
- 2 Копелевич А.С. Об одном соотношении в термодинамике поршневого компрессора / А.С. Копелевич // Теплоэнергетика. – 1977. – № 4. – С. 47-50.
- 3 Козобков А.А. Проведение индикаторной диаграммы компрессора к стандартной влажности газа при постановке технического диагноза / А.А. Козобков, Б.Н. Ходов // Труды МИНХ и ГП. – 1980. – № 153. – С. 175-179.
- 4 Михлин В.М. Прогнозирование технического состояния машин / В.М. Михлин. – М.: Колос, 1976. – 287 с.
- 5 Пластинин П.И. Введение в математическое моделирование поршневых компрессоров / П.И. Пластинин, В.К. Твалчредидзе. – М.: МВТУ им. И.Э.Баумана, 1976. – 78 с.
- 6 Смерека Б.М. Температурный метод диагностики клапанов компрессорных цилиндров поршневых газоперекачивающих агрегатов / Б.М. Смерека, В.В. Дворяшин, А.К.Скуинь // Транспорт и хранение газа. – М., РС/ВНИИЭ-газпром, 1977. – № 5. – С. 3-11.
- 7 Френкель М.И. Поршневые компрессоры / М.И. Френкель. – Л.: Машиностроение, 1972. – 232 с.
- 8 Храпач Г.К. Надёжность работы поршневых газоперекачивающих агрегатов / Г.К. Храпач. – М.: Недра, 1978. – 192 с.
- 9 Костів В.В. Узагальнений параметр як якісна характеристика технічного стану циліндра газомотокомпресора / В.В. Костів // Тези доповіді на конференції професорсько-викладацького складу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – Івано-Франківськ, 2002. – С. 37-38.

Стаття надійшла до редакційної колегії  
27.02.17

Рекомендована до друку  
професором **Середюк М.Д.**  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
професором **Мельником Р.А.**  
(Національний університет  
«Львівська політехніка», м. Львів)