

Г. В. Кирик, д-р техн. наук, доц., президент (Концерн «NICMAS», м. Суми, Україна); П. Є. Жарков, канд. техн. наук, головний конструктор (ПАТ «НВАТ «ВНДІкомпресормаш», м. Суми, Україна); Г. А. Бондаренко, канд. техн. наук, проф. (Сумський державний університет, м. Суми, Україна); Б. О. Блюсс, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Шевченко, д-р техн. наук, ст. наук. співробітник (Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова, м. Дніпро, Україна); М. М. Лях, канд. техн. наук, проф. (Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна)

## Підвищення ефективності розробки родовищ вуглеводнів на основі використання компресорного устаткування нового покоління

Проведено дослідження сучасного стану наукових розробок з підвищення ефективності технологій експлуатації родовищ вуглеводнів на основі наукового обґрунтування, створення та широкого впровадження сучасного надійного, енергозберігаючого та високопродуктивного компресорного устаткування нового покоління. Розглянуто: сучасні розробки з удосконалення методів розрахунку режимних параметрів компресорних установок; нові розробки, спрямовані на підвищення працездатності та ефективності компресорного устаткування; нові методи розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок; нові рішення з підвищення ефективності розробки родовищ вуглеводнів на основі енергозберігаючого компресорного устаткування; науково-практичні засади підвищення надійності і ефективності буріння та ремонту нафтових і газових свердловин та використання компресорного обладнання нового покоління в системах пожежогасіння під час видобування та транспортування вуглеводнів.

**Ключові слова:** компресорне устаткування, родовище вуглеводнів, режимні параметри, працездатність, енергоефективність, пожежогасіння.

Проведено исследование современного состояния научных разработок по повышению эффективности технологий эксплуатации месторождений углеводородов на основе научного обоснования, создания и широкого внедрения современного надежного, энергосберегающего и высокопроизводительного компрессорного оборудования нового поколения. Рассмотрены: современные методы расчета режимных параметров компрессорных установок; новые разработки, направленные на повышение работоспособности и эффективности компрессорного оборудования; новые методы расчета и конструирования теплообменных аппаратов компрессорных установок; новые решения по повышению эффективности разработки месторождений углеводородов на основе энергосберегающего компрессорного оборудования; научно-практические основы повышения надежности и эффективности бурения и ремонта нефтяных и газовых скважин; использования компрессорного оборудования нового поколения в системах пожаротушения при добыче и транспортировке углеводородов.

**Ключевые слова:** компрессорное оборудование, месторождение углеводородов, режимные параметры, работоспособность, энергоэффективность, пожаротушения.

It was conducted a study of the current state of scientific research results concerning improvement of the effectiveness of technologies of hydrocarbons exploitation on the basis of scientific ground, the creation and widespread introduction of modern reliable, energy-efficient and high-performance compressor equipment of new generation. It was examined: methods for prediction operating parameters of compressor units, new developments aimed at improving the efficiency and effectiveness of compressor equipment; new methods of calculation and design of heat-exchanging compressor units; new solutions to improve the efficiency of development of hydrocarbon deposits on the basis of energy-saving compressor equipment; scientific and practical principles of improving the reliability and efficiency of drilling and repair of oil and gas wells; using of compressor equipment of a new generation in firefighting systems during the hydrocarbons extraction and transportation.

**Keywords:** compressor equipment, hydrocarbon deposits, operating parameters, energy efficiency, fire fighting

### Актуальність роботи та мета досліджень

Для забезпечення максимального видобутку газу і конденсату під час розробки природних родовищ вуглеводнів необхідно постійно підтримувати пластовий тиск газу. Для цього в пласт нагнітається частина видобутого, відсепарованого від конденсату природного газу або можлива заміна природного газу на коксовий газ, газоподібний азот чи синтез-газ. Азот і синтез-газ можна виробляти безпосередньо на родовищі спеціальними

установками і нагнітати в пласт компресорами високого тиску, при цьому в період роботи родовища необхідно резервувати значний його обсяг.

У умовах постійної зміни тиску пласта здобутий газ доводиться збирати і транспортувати за допомогою дожимних компресорних станцій. У Україні таким чином добувається 65 % газу.

Таким чином, сфера застосування компресорного устаткування в галузі розробки та експлуатації родовищ вуглеводнів дуже об'ємна: починаючи з підйому пластової

рідини на поверхню під час компресорного способу видобутку нафти; закачування газу в нафтові пласти з метою підтримання та відновлення пластового тиску; закачування газу в підземні сховища; освоєння свердловин після буріння і ремонту; подача повітря в пневматичні системи бурових установок; подача окиснювача (повітря) в нафтові пласти під час експлуатації родовищ із застосуванням внутрішньопластового рухомого вогнища горіння; збір газу під час експлуатації нафтових і газових родовищ і пода-

ча його на головну компресорну станцію; стиснення нафтового газу в сепараційних установках; та завершуючи транспортуванням газу по магістральним трубопроводам.

Дослідження сучасного стану проблеми підвищення ефективності розробки родовищ вуглеводнів показали, що створення енергоефективних компресорних машин нового покоління на базі встановлення закономірностей зміни параметрів робочих процесів теплообмінних апаратів компресорних установок, режимних параметрів їх роботи в умовах шахтних пневмомереж, надійності вузлів і блоків компресорних машин, розробка засобів підвищення їхньої надійності, довговічності та енергоефективності, методів розрахунку режимних та конструктивних параметрів компресорного устаткування і способів його застосування при видобутку нафти, газу, вугілля, шахтного метану, для підвищення ефективності і безпеки процесів, є актуальною науковою проблемою, що має важливе значення для становлення енергетичної незалежності та сталого розвитку України.

Метою роботи є підвищення ефективності технологій розробки родовищ вуглеводнів на основі наукового обґрунтування, створення та широкого впровадження сучасного надійного, енергозберігаючого та високопродуктивного компресорного устаткування нового покоління.

#### **Фундаментальні розробки з удосконалення методів розрахунку режимних параметрів компресорних установок**

В роботах авторів [1–7] виконано фундаментальні розробки з удосконалення методів розрахунку режимних параметрів компресорних установок, які покладені в основу створення енергозберігаючого компресорного устаткування нового покоління. При зменшенні або збільшенні витрати повітря відповідно збільшується або зменшується тиск нагнітання компресора, значення якого можуть вийти за діапазон припустимих значень. Припустимі межі по тиску встановлюються виходячи з вимог нормальної роботи споживачів і мережі, а також особливостей роботи компресора.

Обґрунтовано перехід від схеми централізованого повітропостачання шахт до ло-

кальних компресорних станцій. Вперше встановлено закономірності зміни коефіцієнта недовикористання стисненого повітря, обумовленого співвідношенням механічної роботи чиненої стисненим повітрям при адіабатному розширенні його до кінцевого тиску, при локальному і централізованому повітропостачанні шахт з використанням гвинтових компресорних станцій.

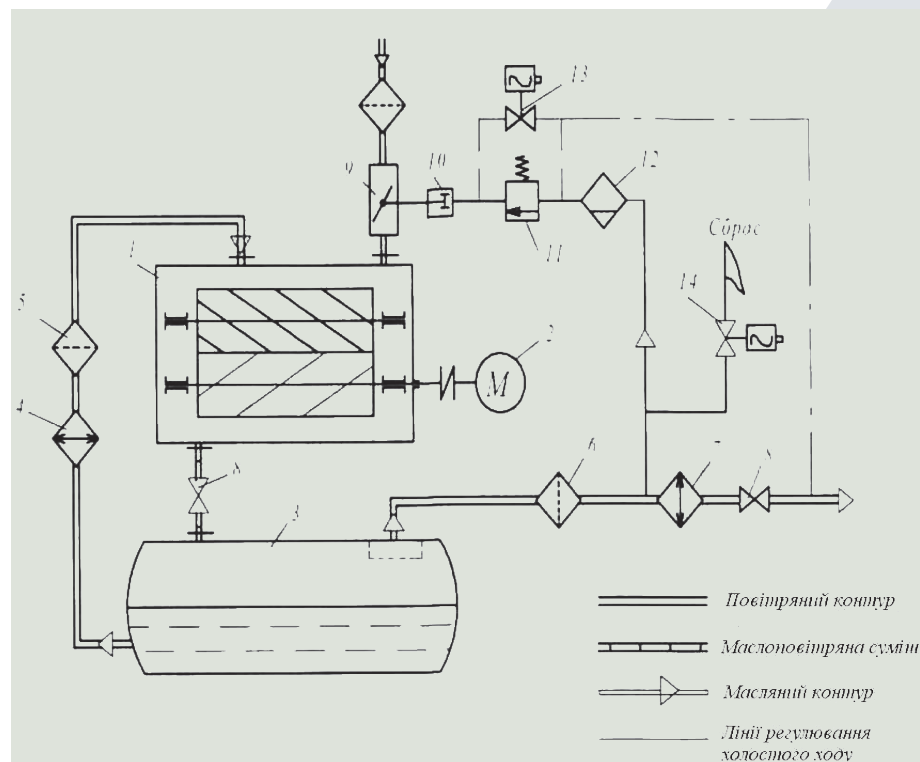
Розроблено систему регулювання холостого ходу шахтних компресорів (рис. 1). Регулювання здійснюється за рахунок дроселювання повітря на усмоктуванні. Із цією метою на вхідному патрубку компресора встановлений затвор, дисковий, робочий орган якого повертається за допомогою приєднаного пневмодвигуна. Схема передбачає також перевід компресора в режим холостого ходу вручну.

Встановлено, що найбільш економічний спосіб регулювання режиму роботи компресора є комбінованим, тобто складається зі сполучення повторно-короткочасного режиму «включення – вимикання» і умовно-безперервного режиму

з переходом на холостий хід і назад. Необхідно уникати як надмірно довгих фаз холостого ходу, так і занадто коротких зупинок.

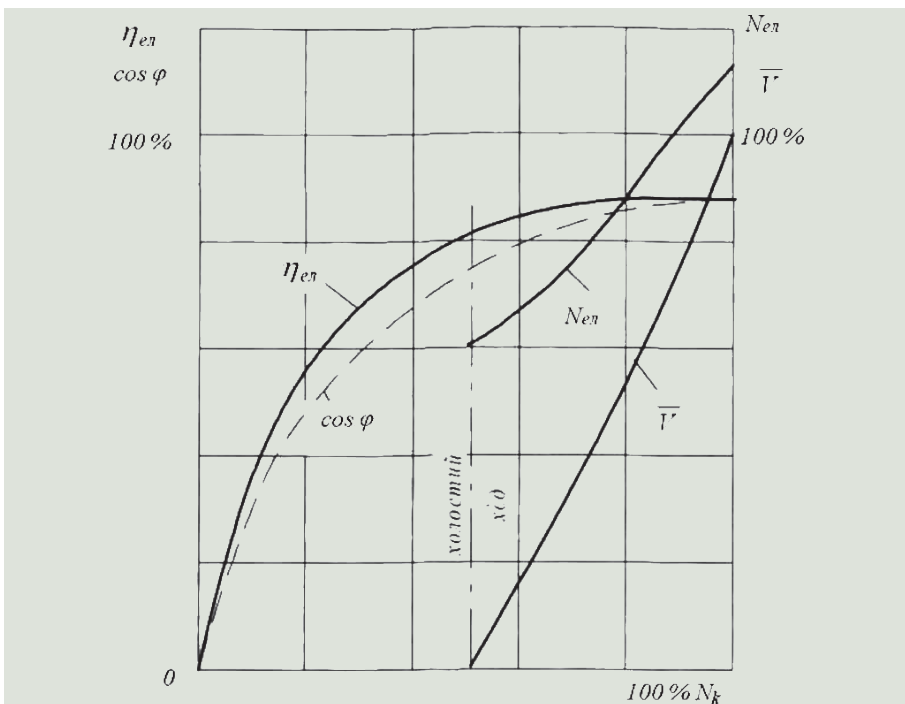
Виявлені закономірності зміни режимних параметрів шахтної компресорної установки: тривалості циклів «нагнітання – холостий хід», частоти спрацьовування регулюючої пневмосистеми від об'єму мереж, характерних для вугільних шахт; закономірності тиску повітря для шахтної мережі середньої і великої довжини від його витрати.

Отримані закономірності зміни енергетичних характеристик регулювання гвинтового компресора в режимі холостого ходу (рис. 2). При зменшенні продуктивності компресора приблизно пропорційно змінюється і споживана потужність аж до режиму «холостого ходу». Електрична потужність із урахуванням зменшення ККД електродвигуна трохи вище споживаної, але в цілому зберігає ту ж закономірність. Для полегшення запуску електродвигуна пуск компресора варто здійснювати при закритому дис-



**Рис. 1. Схема системи регулювання холостого ходу гвинтової компресорної установки:**

1 – гвинтовий компресор; 2 – привідний електродвигун; 3 – бак-масловіддільник; 4 – маслоохолоджувач; 5 – фільтр масляний; 6 – повітряний фільтр-масловіддільник; 7 – кінцевий повітроохолоджувач; 8 – зворотні клапани. Елементи системи регулювання холостого ходу: 9 – затвор дисковий; 10 – пневмодвигун; 11 – регулятор продуктивності; 12 – вологовіддільувач; 13, 14 – клапани з електромагнітним приводом



**Рис. 2. Залежність між продуктивністю  $V$ , потужністю на валу компресора  $N_k$ , ККД електродвигуна  $\eta_{ел}$  та коефіцієнтом потужності  $\cos \varphi$**

ковому затворі при мінімальному пусковому струмі, однак пуск повинен бути короткотривалим (3–5 с), щоб не допустити роботу гвинтового компресора на збідненому змащенні.

На підставі результатів дослідження впливу концентрації і щільності твердої фази на параметри коливальних процесів у гетерогенному газовому середовищі, розроблені методичні основи розрахунків нестационарних режимів течії потоків, що несуть суспензію у трубопровідних системах. Це дозволило встановити залежності декрементів пульсації швидкості і коливальних тиску в технологічних ємностях від властивостей матеріалу, що транспортується, й аеросуміші, акустичних і витратно-напірних характеристик компресорів та елементів аспіраційно-знепилюючих систем гірничих підприємств [8]. Модель нестационарного процесу роботи аспіраційно-знепилювальних систем має вигляд

$$\left. \begin{aligned} L_a \frac{dQ_k}{dt} &= F(Q_k) - H(Q_k) - (P_6 - P_a); \\ C_a \frac{dP_6}{dt} &= kQ_k - Q_m(P_6); \\ M_a \frac{dQ_m}{dt} &= (P_6 - P_a) - \Phi(Q_m, P_6), \end{aligned} \right\}$$

де  $L_a$  – акустична маса трубопроводу між баком та компресором;

$M_a$  – акустична маса трубопроводу, що приєднаний до баку;  $P_a$  – тиск у баку;  $C_a$  – акустична гнучкість баку;  $Q_k$  – подача компресору;  $F(Q_k)$ ,  $H(Q_k)$  – витратно-напірні характеристики відповідно компресору та приєднаного трубопроводу;  $P_6$  і  $P_a$  – відповідно тиск в ємності та атмосферний;  $Q_m$  – витрата твердого матеріалу між ємностями;  $k$  – коефіцієнт призначення технологічної ємності.

Нові фундаментальні та практичні розробки, спрямовані на підвищення працездатності та ефективності компресорного устаткування

Авторами в [9–11] представлені нові фундаментальні та практичні розробки стосовно створення нових композиційних матеріалів

деталей і вузлів компресорного устаткування. Дослідження властивостей композиційних матеріалів промислового призначення з металевою матрицею показали, що просочення наповнювачів за технічними і технологічними ознаками доцільно виконувати сплавами з температурою плавлення в діапазоні 900–1100. При цьому виробництво композиційних матеріалів можна здійснювати на серійному термічному устаткуванні; таким вимогам відповідають розплави міді та її сплавів на основі Cu-Zn, Cu-Mn, сплави типу колмоной Ni-Cr-Si, Ni-Cr-B, Co-Cr-Si. Легування сплавів зазначених основ дозволяє цілеспрямовано управляти структуроутворенням і забезпечувати весь комплекс механічних властивостей композиційного матеріалу – міцність, пластичність, в'язкість, твердість, корозійну й абразивну зносостійкість.

Розроблено й випробувано металевий порошок для термічного нанесення покриття на основі перехідних металів, при такому співвідношенні компонентів, мас. %: хром – 8–14; кремній – 2,5–3,2; бор – 1,5–2,5; залізо – 4–6; нікель – інше, при цьому фракційний склад порошку перебуває в межах 30–55 мкм. Це дозволило створити виріб із двошаровим покриттям, та установку для нанесення захисних покриттів на деталі і таким чином підвищити експлуатаційні параметри компресорних машин.

Показано, що межа втоми і межа міцності вузлів шахтних компресорних установок лінійно збільшуються в 1,5–2 рази при нанесенні двошарових покриттів з композиційних матеріалів, досягаючи значень відповідно 430 і 1160 МПа (табл. 1).

**Таблиця 1. Механічні властивості таврового з'єднання з великим жолобником з композиційного металу при просоченні залізонікелевого наповнювача сплавом Cu-Mn-Ni**

Сталь тавра	Розмір жолобника, мм		Межа міцності, МПа	Межа утоми, МПа
	Катет	Радіус		
Сталь 20	3	3	450	130
Сталь 40	4	4	580	210
14X2ГМР	5	5	610	230
20X13	5	5	780	390
07X16H6	5	5	1160	430

Примітка: товщина стінки тавра 5 мм; випробування на втому під час розтягування; руйнування таврового з'єднання у всіх випадках відбулося за основним металом.



### Нові методи розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок

Фундаментальні розробки щодо створення методів розрахунку і конструювання теплообмінних апаратів компресорних установок наведено в роботах [12, 13]. Проведено дослідження особливостей теплообмінної поверхні пластинчато-ребристих теплообмінників (ПРТ) з металевої сітки та здійснено вибір їх матеріалу. Досліджено особливості застосування сталі 20Х13 для паяних ПРТ, які показали, що за допомогою термічної обробки паяних пластинчато-ребристих елементів (ПРЕ) можна одержати міцні із запасом пластичності, корозійостійкі теплообмінники.

За результатами дослідження високотемпературної пайки шлікерним припоєм сталевих ПРЕ встановлено, що шар на основі сплаву системи Ni-Cr-Si-B має жаростійкість у газових середовищах при температурі до 9000С, високу зносостійкість в середовищі, засміченому абразивними частками, хімічну стійкість в нейтральних (повітря, азот, газоподібні вуглеводні, вода, пара, нафтопродукти) і лужних середовищах, а також у розчинах деяких органічних кислот (оцтова, щавлева), в інших газоподібних і рідких середовищах.

Крім цього:

- розроблено технологію усунення дефектів у ПРТ за допомогою герметиків, яка може бути застосована і для паяних трубчастих теплообмінників;

- проведено випробування теплообмінних апаратів та розробле-

фіксується термограма поверхні працюючого охолоджувача, яка додається до її паспорта і на якій, при комп'ютерній обробці, позначаються температури в характерних точках охолоджувача.

Для шахтних компресорних установок розроблені методи конструювання теплообмінних апаратів і розрахунку: коефіцієнта теплопередачі, ефективності площі поверхні теплообміну, ефективності обрешітки та ін.

З метою підвищення надійності й довговічності паяних робочих коліс відцентрових компресорних машин проводили дослідження технології й способів пайки з широким паяльним зазором, що дозволило удосконалити їх конструкцію та технологію виготовлення. Проведене дослідження паяних таврових з'єднань з великим жолобником може бути застосоване для з'єднання лопаток і дисків робочих коліс із забезпеченням втомної міцності на рівні основного металу. При цьому рівномірність з'єднання з основним металом забезпечується недорогими припоями на мідній основі.

Проведені дослідження формування комбінованого таврового з'єднання, виконаного пайкою і зварюванням плавленням (рис. 3). Для формування бездефектного з'єднання паз виконують розміром 0,7–0,8 величини товщини стінки тавра і зварювання здійснюють таким чином, щоб кути тавра були повністю проварені. Розроблено технологію автовакуумної пайки закритих робочих коліс.

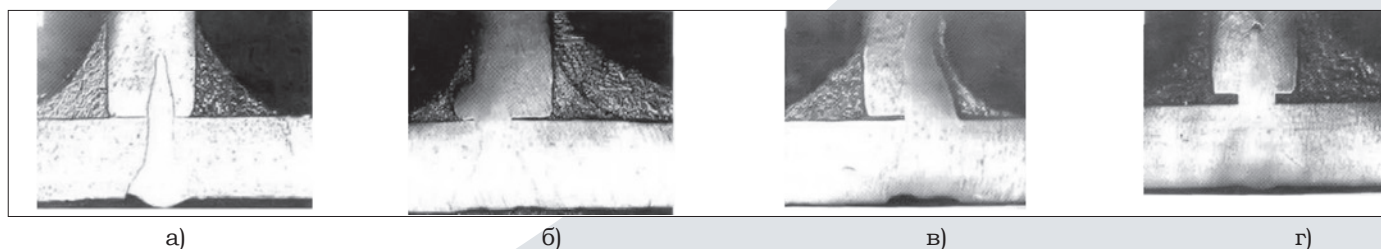
Нові рішення з підвищення ефективності розробки родовищ вуглеводнів на основі енергозберігаючого компресорного

Для генерування інертного газового середовища на основі азоту для забезпечення технологічних процесів у нафтовидобувній, газовій, нафтопереробній, нафтохімічній промисловості розроблено азотну компресорну станцію. Азотна компресорна станція містить лінію стиску повітря, що включає багатоступінчастий повітряний компресор з охолоджувачами між ступенями, блок фільтрів, вологовідділювач, охолоджувач, газороздільний модуль, лінії стиску азоту.

В результаті проведеної роботи вдосконалено технологію сайклінг процесу з використанням компресорної станції для генерування інертного газового середовища на основі азоту; розроблено і затверджене технічне завдання на виготовлення станції блочно-модульного виконання для цілодобового виробництва 50 000 м<sup>3</sup>/добу газоподібного азоту для сайклінг процесу на Котелевському газоконденсатному родовищі. Комплекс устаткування забезпечує одержання з атмосферного повітря газоподібного азоту концентрацією не менш 99 % з його наступним накачуванням у свердловину під тиском до 250 бар (рис. 4).

Для підвищення тиску в малодебітних бурових свердловинах, від низького до необхідного для роботи газотранспортного комплексу, розроблено блокову компресорну станцію, яка містить магістраль подачі стислого газу з фільтром у гвинтовий компресорний агрегат, який виконано у вигляді окремого блоку з приводом.

Вдосконалено технологію відбору газу із низьконапірних га-



**Рис. 3. Мікроструктура паяно-звареного таврового з'єднання при зазорі між стінкою і полицею: а) 0,03; б) 0,1; в) 0,2; г) 0,4 мм (зсув осі шва від осі стінки під час електронно-променевого зварювання: а) 0,1 S; б) 0,3 S; в) 0,2 S при ширині провару 30 % S (x10)**

но методику зіставлення їх характеристик;

- проведені тепловізорні дослідження і контроль теплообмінних апаратів.

При приймальних випробуваннях компресорної установки

устаткування

В [14] наведено результати наукових розробок стосовно нових рішень з підвищення ефективності експлуатації родовищ вуглеводнів на основі енергозберігаючого компресорного устаткування.

зових свердловин із застосуванням розробленої дотискної гвинтової компресорної станції паливного газу типу СГВ для живлення газотурбінних електростанцій, яка відрізняється тим, що компресорний агрегат, виконаний



**Рис. 4. Станція ААВН-40/25У1 на Котелівському газоконденсатному родовищі**

у вигляді гвинтового компресора, з'єднаного вихідним трубопроводом з масловіддільником на лінії відводу газу (рис. 5).

Розроблено способи одержання і транспортування попутного нафтового газу за допомогою компресорних станцій СКГ.

Науково-практичні засади підвищення надійності і ефективності буріння та ремонту нафтових і газових свердловин

В період проведення робіт, направлених на підвищення надійності і ефективності буріння та ремонту нафтових і газових свердловин, розроблено методи визначення оптимальної конструкції піногенеруючого устаткування. Встановлено, що у пристрої із циліндричною приймальною частиною камери змішування температура стрибкоподібно зростає і спадає у вхідній частині камери, потім зростає до температури, яка є вищою температури у пристрої з кінцевою приймальною частиною камери змішування. Визначено довжину циліндричної частини сопла, відстань між соплом і камерою змішування піногенеруючого пристрою (рис. 6). Розроблений пристрій випробувано на свердловинах Полтавського ВБР БУ «Укрбургаз», глибина однієї з яких становила 4700 м. Випробування показали високу ефективність та адекватність результатів параметрам прогнозу, в т. ч. запропонованої схеми обв'язки циркуляційної системи.

Вдосконалено технологію термогазового впливу на нафтовий пласт із важковидобуваними запасами з використанням розробленої компресорної установки високого тиску, що включає повітряні компресори першого і другого щаблів компримування, охолоджувач, вологовіддільувач і контрольно-вимірну апаратуру (рис. 7, 8).

Розроблено засади підвищення ефективності газліфтного видобування нафти компресорним способом, що може бути забезпечено

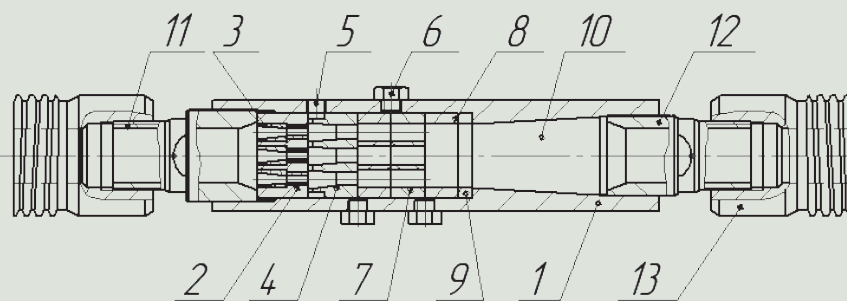
но застосуванням компресорного устаткування нового покоління.

Для інтенсифікації геолого-розвідувальних робіт і видобутку

на газо-нафтоносних родовищах розроблена і випробувана нова пересувна компресорна станція СД 30/120 продуктивністю  $30 \text{ м}^3/\text{хв}$ , тиском 12 МПа. Станція, розташована на шасі вантажного повнопривідного автомобіля, складається з двох дизельних двигунів ЯМЗ-7511 і двох компресорів – гвинтового маслозаповненого CF-180G2 для стиску повітря до 1,5 МПа і поршневого компресора 6ВШ2,5–2,1/14–120 для стиску повітря від 1,5 до 12 МПа. Шестирядний двоступінчастий компресор виконаний на 2W-базі 6ВШ2,5 з номінальним поршневим зусиллям 2,5 т.



**Рис. 5. Газова гвинтова станція СГВв 315-20/0,5-25 У1 на УКПНГ Більськ**



**Рис. 6. Піногенеруючий пристрій багатосопловий:** 1 – корпус; 2 – багатосоплова вставка; 3 – змінні сопла; 4 – ежекційна вставка; 5 – канал підведення повітря; 6 – заглушки; 7 – дифузійний диск; 8 – розпірне кільце загального дифузора; 9 – завихрювач пінної суміші; 10 – дифузор; 11, 12 – перевідники; 13 – хвостовики швидкісний

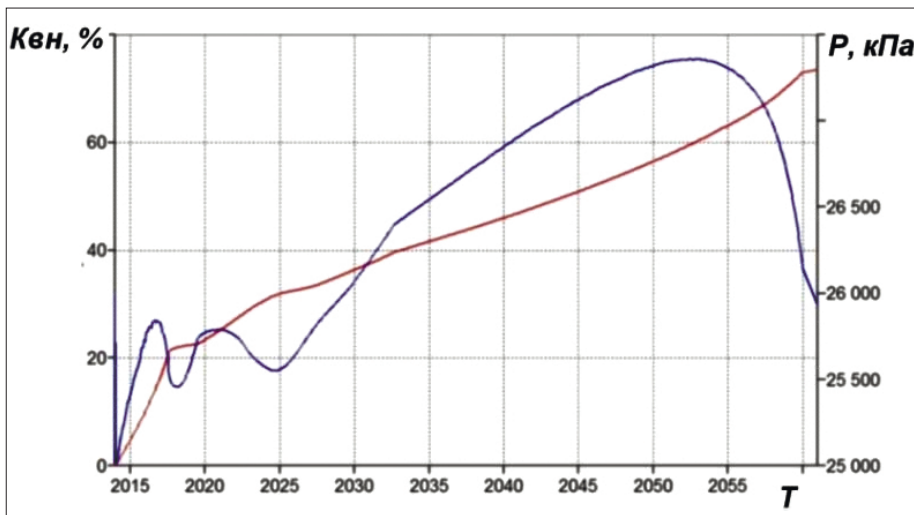


а)

б)

**Рис. 7. Компресорна установка БКУ20/35 (а) і площадка на свердловині (б) при реалізації технології термогазового впливу на Вишанському родовищі РУП «ВО «Білоруснафта»**  
— коефіцієнт вилучення нафти — розподіл середньопластового тиску в пласті





**Рис. 8. Зміна коефіцієнта вилучення нафти і розподіл середньопластового тиску в пласті при термогазовому впливі**

Для ремонту і очищення магістральних нафтопроводів застосовані компресорні станції, створені на базі устаткування АГНКС-45, АГНКС-60, АГНКС-75 призначені для подачі природного газу (метану).

Створене устаткування для евакуації газу з магістральних газопроводів МКС-600 з використанням повітряної компресорної установки серії ВВ з гвинтовим компресором і приводом від електродвигуна, продуктивністю від 23 до 100 м<sup>3</sup>/хв і кінцевим абсолютним тиском 8–10 кгс/см.

Для випробування трубопроводних арматур розроблено компресорну станцію високого тиску. Установка блочно-компресорна БКУ-60/32 У1, призначена для виробітку стислого якісного повітря і постачання ним різних пневматичних систем, пристроїв і механізмів у нафтовій, газовій та інших галузях промисловості.

Вдосконалено спосіб утилізації шахтного газу діючих і закритих шахт шляхом його спалювання в спеціальній камері і запобігання цим його виділення в атмосферу на базі розробленої контейнерної газоутилізаційної установки УКГ-5/8 (рис. 9). Вибухозахищеність забезпечується конструктивними рішеннями за рахунок безперервного контролю вмісту метану. При концентрації метану 1% установка відключається. Технічна продуктивність УКГ-5/8 обмежена 8 МВт теплової енергії, оптимальною тривалою потужністю 5 МВт.

Розглянуто особливості структури вугілля та запропоновано модель впливу на вугільні пласти газів, що різняться енергією сорбції і схе-

ми інтенсифікації метановіддачі вугільних пластів (рис. 10). Розроблено установку для дегазації підземних пластів, у якій за рахунок застосування нових конструктивних елементів забезпечується підвищення коефіцієнта корисної дії, розширення сфери застосування за рахунок розширення діапазону робочих температур, зміни робочого середовища, зменшення габаритів та підвищення мобільності і спрощення переміщення (транспортування) у шахтних підземних виробках.

Розроблено гвинтову шахтну компресорну установку, яка відрізняється тим, що один з температурних датчиків, установлених на лінії нагнітання після гвинтового компресора, виконаний у вигляді електричного датчика-реле температури і підключений до системи аварійного відключення компресора, а другий датчик виконаний у вигляді термовимикача з плавким елементом і підключений до пневматичної лінії захисту; датчик контролю газу



**Рис. 9. Зовнішній вид контейнерної газоутилізаційної установки**

виконаний у вигляді датчика метану, що розміщений у верхній частині корпусу компресорної установки. На підприємствах вугільної промисловості України впроваджені установки компресорні шахтні УКГШ-7,5/7; УКГШ-10/7; УКГШ-15/7; розробки концерну «НІКМАС» у кількості понад 1148 установок продуктивністю 7,5–15 м<sup>3</sup>/хв (рис. 11).

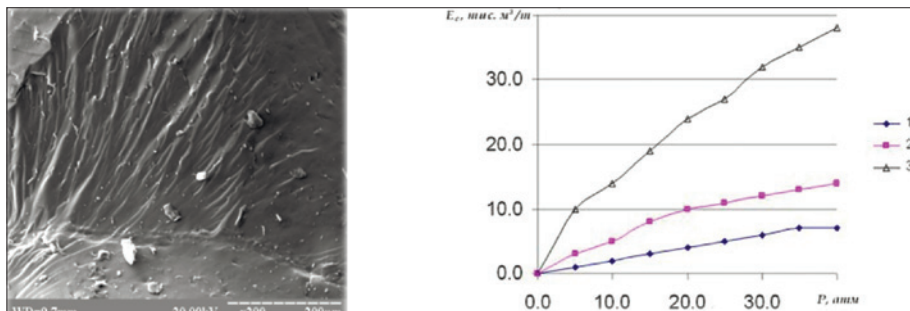
#### **Використання компресорного обладнання нового покоління в системах пожежогасіння під час видобування та транспортування вуглеводнів**

Для одержання газоподібного азоту та інертизації атмосфери, попередження і гасіння пожеж у гірничих виробках шахт розроблено гвинтові компресорні установки.

Запропоновано модель виділення метану в тупиковому виробітку і визначений час досягнення вибухонебезпечної концентрації. При стаціонарному процесі швидкість надходження газу у виробку збігається зі швидкістю виносу газу з виробки, однак надходить у виробку чистий метан, а виноситься метаноповітряна суміш. Виконано моделювання процесів поділу повітря у порожнистоволоконних модулях, що дозволило оптимізувати конструкцію газороздільних модулів азотних мембранних компресорних станцій. Отримано залежності продуктивності газороздільних мембранних блоків від концентрації та температури.

Розроблено спосіб ліквідації початкової стадії підземних пожеж у діючій або в зупиненій виробці у випадку, коли зводять герметичну перегородку з одночасною подачею інертного газу у вугільну виробку, який відрізняється тим, що у вугільній виробці додатково розміщують устаткування для контролю за індикаторними газами, об'ємним вмістом кисню, азоту, метану і за станом окремих фізичних параметрів атмосфери виробки, таких як тиск, температура, задимленість повітряного середовища виробки, швидкість повітряного потоку у виробці.

Розроблено, затверджено і уведено у дію нормативно-технічний документ – Стандарт Мінвуглепрому України. Правила використання газоподібного азоту для попередження і локалізації підземних пожеж (СОУ 10.1.202020852.001:2006).



а)

б)

**Рис. 10. Структура поверхні відколу вугілля (а) і залежності сорбційної ємності різних газів (б) залежно від тиску: 1 – азот, 2 – метан, 3 – вуглекислий газ**

Розроблено спосіб видобутку метану, що включає буріння принаймні двох або декількох свердловин. Їхню кількість вибирають залежно від потужності пласта і його конфігурації, щоб вони перетинали газонасний пласт, причому хоча б одна з них була нагнітальною

Виготовлена фахівцями ПАТ «НВАТ ВНДІкомпресормаш» станція АМГП-15/0,7 С У1 успішно пройшла заводські випробування на підприємстві – виготовлювачі і приймальні випробування в замовника (державне підприємство «Макіїввугілля»). Наприкінці 2003 р. станція АМГП-15/0,7 С У1 була застосована при гасінні пожежі на одній із шахт ДП «Ровенькиантрацит». Оперативно доставлена на місце аварії, станція успішно зарекомендувала себе в реальних умовах пожежогасіння, подавши в гірничу виробку (зону горіння) 62 000 м³ азоту. За допомогою станції АМГП-15/0,7 С У1 пожежа була ліквідована протягом 72 год (рис. 12, 13).

Крім цього розроблено засади протипожежного захисту об'єктів нафтогазової промисловості, на складах зберігання паливо-мастильних матеріалів із застосуванням високоефективних піноутворюючих пристроїв.

Дана оцінка економічної ефективності та безпеки застосування компресорного устаткування нового покоління при розробці родовищ вуглеводнів.

Сформульовано аспекти комплексного рішення проблем безпеки при розробці родовищ вуглеводнів. Застосування нового компресорного устаткування: станцій азотних мембранних гвинтових пересувних АМГП у процесах видобутку вугілля для запобігання і гасіння підземних пожеж; установок компресорних газоутилізаційних УКГ для утилізації шахтного метану і запобігання його вибухів; азотних компресорних станцій при



**Рис. 11. Шахтна-гвинтовакомпресорна установка УКГШ-10/7 А У2 з електричною системою захисту**

бурінні, освоєнні, інтенсифікації, ремонті газових та нафтових свердловин, розкритті продуктивних газо-нафтоносних пластів, дозволяє в комплексі вирішувати проблему безпеки при розробці родовищ вуглеводнів. Для підвищення безпеки роботи компресорного устаткування при розробці родовищ вуглеводнів розроблено смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens установками компресорними газоутилізаційними УКГ-5/8, смарт-системи керування на базі контролерів компаній Siemens, Schneider-Electric станціями типу СГВ, смарт-системи керування на базі контролерів компаній ComAp, Allen-Bradley компресорними установками для стиску вуглеводнів (пар бензину) і скраплення їх у міжступінчастих конденсатодвідниках, станціями типу ААВН, компресорними установками для стиску коксового газу й інших вибухонебезпечних

середовищ, обліку шахтного газу (об'ємна витрата, концентрація метану CH<sub>4</sub>, вуглекислого газу CO<sub>2</sub>, кисню O<sub>2</sub> та ін. середовищ) і контролю, сигналізації та керування технологічним устаткуванням шахт. Виконано моделювання безаварійної роботи гірників та безпечного керування процесом видобутку при використанні смарт-систем керування і візуального контролю параметрів шахтних компресорних систем (рис. 14).

## Висновки

Підвищення ефективності розробки родовищ вуглеводнів на основі використання компресорного устаткування нового покоління було досягнуто:



**Рис. 12. Конструктивне виконання станції АМГП-15/0,7 С У1**



**Рис. 13. Робота дивізіону азотних пересувних станцій при гасінні пожежі на шахті ім. О. Ф. Засядька**

– на Бельському газоконденсатному родовищі здійснено додатковий видобуток 12,0 млн. м³ газу за перший рік реалізації проекту гвинтової газової компресорної установки СГВв 315–20/035–25 У1, що забезпечує відбір газу із семи низьконапірних газових свердловин із залишковим тиском 1,1–2,0 кгс/см², відбір попутного нафтового газу від наявної на родовищі установки сепарації нафти, газу із танків зберігання і стабілізації газового конденсату, а також смолоскипового газу, наявного на родовищі, з по-



дальшим компримуванням газу в мережу споживача з тиском 17–25 кгс/см<sup>2</sup>.

– на нафтогазовому родовищі «Кенлик» у Республіці Казахстан для подачі попутного газу на електростанцію ЕГ-6000 виробництва підприємства «Мотор Січ» введено в експлуатацію дві аналогічні компресорні станції СГВв 315–20/0,5–24 У1.

– на Вішанському родовищі РУП «ВО «Білорусьнафта» реалізовано технологію термогазового впливу із застосуванням компресорних установок БКУ20/35. Об'ємна продуктивність установки БКУ-20/35 У1 для термогазового впливу на нафтовий пласт по повітрю, наведена до початкових умов (при роботі 2-х компресорів), становить 20 м<sup>3</sup>/хв, кінцевий надлишковий тиск повітря – 35 МПа, при цьому потужність, споживана установкою БКУ, не перевищує 400 кВт. При застосуванні методу термогазового впливу на нафтовий пласт коефіцієнт вилучення нафти досягав 75 %, при середньопластовому тиску 26000 кПа.

– на шахтах «Молодогвардійська», «Самсонівська-Західна» ПАТ «Краснодонвугілля» впроваджено спосіб утилізації метану установками компресорними газоутилізаційними УКГ-5/8 у кількості 3-х установок продуктивністю 1551 м<sup>3</sup>/год Установки експлуатуються з 2008 року. Усього за допомогою установок утилізовано 21627079 м<sup>3</sup> газу метану. Загальний наробіток склав 57160 годин.

– у воєнізованих гірничопорятувальних загонах (1 ВГРЗ м. Горлівка, 3 ВГРЗ м. Макіївка, 4 ВГРЗ м. Луганськ, 5 ВГРЗ м. Красний Луч, 6 ВГРЗ м. Торез, 7 ВГРЗ м. Краснодон, 8 ВГРЗ м. Павлоград, Львівсько-Волинським ВГРЗ м. Червоноград, ОВГРЗ м. Донецьк) впроваджено спосіб гасіння пожеж азотом з використанням станцій мембранних гвинтових пересувних АМГП-15/0,7 У1 у кількості 9 станцій продуктивністю 15 м<sup>3</sup>/хв. Спосіб застосовано для гасіння пожеж на шахтах ВП «Шахта ім. М. І. Калініна» ДП «ДУЕК», ПАТ «Шахта ім. О. Ф. Засядька», шахта ім. Ф. Е. Дзержинського ДП «Ровенькиантрацит», ВК «Краснолиманська» Усього станціями вироблено 12 625 325 м<sup>3</sup> азоту. Станції експлуатуються з 2004 року. Загальний наробіток склав 12536 годин.

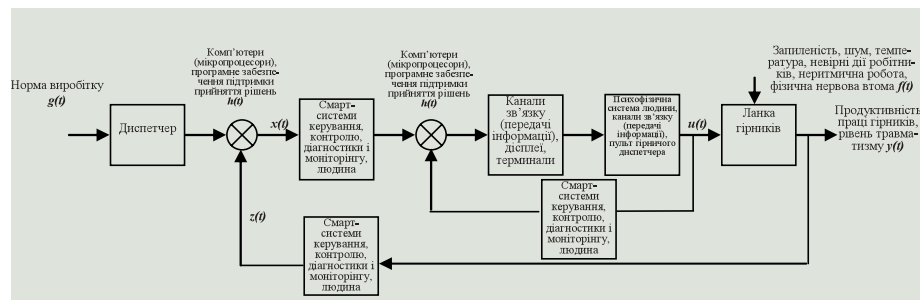


Рис. 14. Функціональна схема системи керування «диспетчер – смарт-система керування і візуального контролю – гірники»

Фактичний економічний ефект, отриманий за рахунок застосування способу гасіння підземних пожеж азотом, що забезпечило збереження устаткування і ліквідацію втрат у видобутку вугілля, за 10 років експлуатації станцій АМГП-15/0,7 У1 склав близько 2 млрд. грн., при цьому було збережено більше 1000 робочих місць. Фактичний економічний ефект, отриманий за рахунок зниження емісії метану в атмосферу, реалізації положень Київського протоколу за 6 років використання способу утилізації метану з використанням установок УКГ-5/8 склав близько 20 млн. грн.

#### Список літератури:

1. Блюсс Б. А. Совершенствование технологий преобогащения ильменитовых руд / Б. А. Блюсс, Н. А. Головач. – Днепрпетровск: Полиграфист, 1999. – 126 с.
2. Бондаренко Г. А. Винтовые компрессоры в системах обеспечения сжатым воздухом / Г. А. Бондаренко, П. Е. Жарков. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2003. – 134 с.
3. Бондаренко Г. А. Компрессорное оборудование. Устройство, эксплуатация и маркетинг: учеб. пос. / Г. А. Бондаренко. – Сумы: СумГУ, 2004. – 106 с.
4. Бондаренко Г. А. Винтовые воздушные компрессорные станции: учеб. пос. / Г. А. Бондаренко. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2005. – 255 с.
5. Стадник А. Д. Полимерные композиты и нанокompозиты в магнитных полях / А. Д. Стадник, Г. В. Кирик – Сумы: ИТД «Университетская книга», Издательство «Слобожанщина», 2005. – 240 с.
6. Теплообменные аппараты компрессорных установок. Исследования, конструкция, технология / [В. Н. Радзиевский, Г. В. Кирик, А. М. Лавренко,

А. М. Котов]. – Сумы: Слобожанщина, 2007. – 317 с.

7. Бондаренко Г. А. Технология использования сжатых газов: курс лекций / Г. А. Бондаренко. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2011. – 272 с.

8. Кирик Г. В. Конструкция и смазка винтовых маслозаполненных воздушных компрессоров / Г. В. Кирик, А. Н. Багдасаров, О. А. Македонский. – Сумы, 2008. – 110 с.

9. Кирик Г. В. Новые композиционные материалы / Г. В. Кирик, В. Н. Радзиевский, А. Д. Стадник. – Сумы: Университетская книга, 2011. – 310 с.

10. Структура и свойства на-нокомпозитных, гибридных и полимерных покрытий / [А. Д. Погребняк, А. А. Лозован, Г. В. Кирик и др.]. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2011. – 344 с.

11. Бондаренко Г. А. Компрессорные станции: учеб. пос.: в 2 ч. Ч. 1: Воздушные компрессорные станции / Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. – Сумы: Изд-во СумГУ, 2012. – 344 с.

12. Бондаренко Г. А. Основы научных исследований в энергетике: учеб. пос. / Г. А. Бондаренко. – Сумы: СумГУ, 2013. – 201 с.

13. Шевченко В. Г. Научно-методические основы определения готовности систем «горно-рабочие – очистной комплекс» к повышению безопасности угледобычи / В. Г. Шевченко. – К.: Наукова думка, 2013. – 280 с.

14. Жарков П. Е. Газовые компрессорные станции / П. Е. Жарков, Г. А. Бондаренко, В. Н. Радзиевский. – Сумы: Университетская книга, 2015. – 285 с.

15. Бондаренко Г. А. Технологія використання стиснутих газів: підручник / Г. А. Бондаренко, В. І. Мілованов, В. М. Ярошенко. – Одеса: Зовнішнєрекламсервіс, 2015. – 449 с.