

Ю.А. Монастирський, В.К. Титюк

**ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЦТВА СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ  
ШАХТНИМИ ТУРБОКОМПРЕСОРАМИ**

*Анотація. Сучасні технологічні процеси промислових підприємств забезпечуються різними енергоносіями. Вибір раціональних енергоносіїв визначається технологічними умовами, техніко економічними показниками процесів виробництва продукції та умовами енергопостачання. Поряд з основними енергоносіями, такими як котельно пічне паливо, тепла та електрична енергії, вода, у багатьох галузях промисловості широко використовується стиснене повітря. Цьому сприяють його особливі властивості: пружність, прозорість, нешкідливість, вогнебезпека, нездатність до конденсації, швидка передача тиску та необмежений запас атмосферного повітря у природі. Стиснене повітря є одним із найдорожчих енергоносіїв, що використовуються в промисловості. Один кілоджоуль енергії, що отримується від заводської мережі стиснутого повітря обходиться у сім десять разів дорожче, ніж кілоджоуль енергії, що використовується в електроприводі. Це пов'язано з тим, що саме виробництво стиснутого повітря вимагає дорогого компресорного обладнання та системи кондиціювання, що включає, крім іншого, і систему вологовідділення. Тим не менш, питома вага цього виду енергії у сучасних виробництвах досить великий. На виробництво стисненого повітря у промислово розвинених країнах припадає в середньому близько 10% із загального енергетичного балансу. На ряді промислових підприємств витрата електроенергії на вироблення стисненого повітря досягає 20-30% загальної кількості споживаної електричної енергії. Тому в системах виробництва та розподілу стисненого повітря дуже актуальне завдання енергозбереження, яке досягається шляхом підвищення ефективності роботи компресорів, раціонального використання стисненого повітря пневмоприймачами та зменшення його втрат при виробництві та транспортуванні споживачам. Отже, в статті розглянуто методи підвищення ефективності роботи систем виробництва та розподілу стисненого повітря. Запропоновано методи та способи зниження питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря на компресорних станціях, його втрат у системах виробництва та розподілу, а також підвищення продуктивності, економічності та надійності роботи компресорних станцій.*

*Ключові слова: стиснене повітря, шахтний турбокомпресор, система повітропостачання, енергоефективність, споживач, продуктивність, пневмосистема.*

**Постановка завдання.** Енергоефективність є однією з найважливіших проблем, у тому числі для такого енергоємного процесу як виробництво стисненого повітря. Стиснене повітря - один із найпоширеніших енергоносіїв на будь-якому промисловому підприємстві, а сукупність пристроїв, пов'язаних з його обробкою та розподілом, є досить складною енергоємною енергетичною промисловою системою, від рівня досконалості якої залежать показники технологічних процесів, де використовується стиснене повітря. Тому підвищення енергоефективності виробництва стисненого повітря є актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Виробництво стисненого повітря, на яке за різними оцінками витрачається до 10% загального споживання, є одним із основних споживачів електроенергії. При цьому втрати стисненого повітря на шляху від джерела до кінцевого споживача досягають 20-30% [1].

Слід зазначити, що виробництво стисненого повітря, з погляду енергетичної ефективності, є не вигідним. За рахунок значних втрат від джерела стисненого повітря як споживача електроенергії (привід компресора), до кінцевого споживача вартість стисненого повітря приблизно в 50 разів перевищує ціну викопного палива та в 15 разів – ціну на електроенергію. Фактично в кінцевій точці споживання стисненого повітря використовується лише 10% витраченої енергії [2].

**Мета дослідження.** Метою дослідження є визначити методи та способи зниження питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря, його втрат у системах виробництва та розподілу, а також підвищення продуктивності, економічності та надійності роботи компресорних станцій.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Втрати, що виникають у системі повітропостачання, знижують її ефективність, що, своєю чергою, може вплинути на технологічний процес.

До втрат у системі повітропостачання можна віднести:

- електромеханічні та внутрішні втрати в компресорі;
- втрати у системі охолодження компресора;
- втрати у системі регулювання;
- втрати у вологовідділювачі;
- втрати у системі осушення стисненого повітря;
- втрати, пов'язані з гідравлічним опором трубопроводів;
- втрати, пов'язані з витіканням повітря через нещільність.

У зв'язку з перерахованими вище факторами виникають завдання удосконалення систем повітропостачання. Дослідження у цій галузі дозволили виділити основні напрями, такі як: технічне вдосконалення конструкцій елементів систем, реальний добір обладнання, оптимізація режимів роботи елементів тощо.

Система повітропостачання промислового підприємства включає в себе компресорні та повітродувні станції, трубопровідний та балонний транспорт для подачі стисненого повітря до споживача, повітрозбірники-ресивери та розподільні пристрої стисненого повітря самого споживача.

Залежно від необхідних споживачам витрати повітря та його тиску станції обладнуються відцентровими компресорами з надлишковим тиском повітря 0,35 - 0,9 МПа та одиничною продуктивністю 250-7000 м<sup>3</sup>/хв або поршневыми відповідно з тиском 3-20 МПа та одиничною продуктивністю не більше м<sup>3</sup>/хв.

Комунікації стиснутого повітря мають радіальні та кільцеві ділянки. Останні застосовують при компактному розташуванні споживачів, а також за підвищених вимог до надійності забезпечення стисненим повітрям.

Стиснене повітря на промислових підприємствах використовується за двома основними напрямками: технологічним (для виплавки сталі та чавуну в металургії, одержанням кисню в повітроділювальних установках тощо) і силовим (для приводу різних машин і механізмів у машинобудуванні, гірничодобувній промисловості, ковальському та інших виробництвах).

Компресорні станції включають до свого складу пристрої для забору повітря, очищення його від пилу, компресори, приводні двигуни, теплообмінники охолодження, допоміжне обладнання, призначене для додаткової обробки повітря (осушення, очищення, зміни тиску, акумуляції) [3].

На більшості промислових підприємств технологічні схеми повітряних компресорних станцій мають низку істотних недоліків і не відповідають вимогам до сучасних систем виробництва стиснутого повітря. Так, на всмоктуючих повітропроводах, що подають атмосферне повітря в компресори, повітряні фільтри або відсутні, або (за наявності) площа їх фільтруючої поверхні менш розрахункової, а застосовувана фільтруюча насадка часто не має масляної плівки (суха) і не здатна затримувати механічні домішки, які містяться в атмосферному повітрі. Підвищена запиленість повітря, що всмоктується, призводить до прискореного зносу компресора і, як наслідок, до зниження його продуктивності. Крім того, при запиленому повітряному фільтрі збільшуються втрати тиску всмоктуваного атмосферного повітря, а значить, знижується тиск

у всмоктувальному патрубку компресора. Це призводить до підвищення ступеня стиснення компресора, зменшення його продуктивності та збільшення питомої витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря.

Як відомо, для забезпечення ефективної роботи повітряних турбокомпресорів необхідно, щоб гідравлічний опір повітряних фільтрів не перевищував 245 Па. Для цього необхідно своєчасно здійснювати очищення повітряних фільтрів від затриманих механічних забруднень. Рекомендований інтервал очищення фільтрів становить 300 - 600 годин роботи.

Шлях зниження витрат на стиск у ступені (секції) компресора визначає питома робота циклу. При необхідності забезпечення необхідного підвищення тиску зниження роботи циклу можливе лише за рахунок зменшення температури всмоктування та значення політропи стиснення.

Робота циклу компресора має найменше значення при ізотермічному стиску. Для наближення до ізотермічного процесу стиснення застосовують, як правило, багатоступінчастий стиск з проміжним міжступеневим охолодженням [4]. У разі теплота, яка відводиться від компресора, дорівнює роботі стискання, тобто теплота охолодження є видом енергії, яка може бути утилізована.

Зниження температури всмоктування дозволяє зменшувати витрати на привід компресора, але цей спосіб практичного втілення не знайшов, (збільшення температури повітря, що всмоктується компресором, на кожні 4 °С збільшує витрату енергії на 1%).

Встановлені на компресорній станції проміжні та кінцеві охолоджувачі повітря часто не забезпечують необхідний по технологічному процесу виробництва стиснутого повітря температурний рівень його, охолодження. Аналіз впливу режиму охолодження стисненого повітря в проміжних охолоджувачах повітря на енергетичну ефективність роботи повітряних компресорів показує, що його недоохолодження на кожні 10°C призводить до зниження продуктивності відцентрових компресорів на 1-1,5%, а підвищення температури повітря на виході з проміжного повітроохолоджувача поршневого компресора на кожні 6-8 °С збільшує витрату електроенергії на стиск повітря на 1% через збільшення роботи стиснення. Разом з цим внаслідок значного збільшення роботи стиснення з'являється навантаження приводного електродвигуна компресора, що викликає передчасний вихід його з ладу.

Підвищена температура стисненого повітря на виході з кінцевих охолоджувачів повітря (вище температури точки роси) обумовлює зниження ефективності роботи встановлених після них вологомасловідділювачей. При

цьому основна частина вологи та олії знаходиться в стисненому повітрі в пароподібному стані, що значно погіршує його якість. При транспортуванні стисненого повітря до місць споживання його температура поступово знижується, і в повітропроводі починається безперервне випадання вологи та олії. Випадання вологи в повітропроводі, що подає, і перед споживачами стисненого повітря ускладнює роботу пневмомеханізмів, знижує їх продуктивність, а також викликає необхідність частих вимушених продувок повітропроводів після тривалих зупинок роботи пневмоприймачів. Це підвищує витрату стисненого повітря пневмоприймачами через збільшення непродуктивних втрат і в результаті знижує продуктивність компресорної станції. Осідаючи на внутрішніх стінках повітрозбірників і трубопроводів, масло і вода можуть стати причиною вибуху чи пожежі.

Перевищення температури стисненого повітря на виході з проміжних і кінцевих охолоджувачів повітря часто сягає 40 - 60 ° С (допустимо значення не більше 10 - 15 ° С). Причин недотримання режиму охолодження повітря в проміжних і кінцевих охолоджувачах повітря може бути кілька: неефективна робота водоохолоджуючих пристроїв оборотної системи водопостачання повітряної компресорної станції, високий ступінь забруднення трубок повітроохолоджувачів накипом і масляними відкладеннями та ін. [5].

При жорсткій воді відбуваються процеси утворення накипу на внутрішніх поверхнях трубок охолоджувача повітря. Товщина її шару може досягати 10 мм, істотно зменшуючи прохідний переріз трубок. Для запобігання накипу утворенню рекомендується проводити магнітну обробку води або використовувати комплексони (інгібітори відкладення мінеральних солей), які забезпечують практично повне пригнічення процесів утворення відкладень малорозчинних солей на поверхні трубок охолоджувачів. Останні слід регулярно очищати від накипу хімічними, пневматичними чи механічними способами.

Істотним фактором, що негативно впливає на ефективність та надійність роботи компресорних станцій, є нерівномірне (неритмічне) споживання стисненого, повітря пневмоприймачів [2]. Зміна його витрати іноді досягає 40%. Для забезпечення надійності повітропостачання та стабільної роботи споживачів стисненого повітря обслуговуючий персонал компресорної станції змушений підтримувати підвищений тиск стисненого повітря у вихідному нагнітальному повітропроводі. Крім того, часті цикли зміни режимів роботи компресорного обладнання призводять до передчасного виходу з ладу окремих його вузлів, відновлення працездатності яких витрачаються значні фінансові

засоби, матеріальні та трудові ресурси. В окремих випадках доцільно, забезпечити постачання стисненим повітрям віддалених пневмоприймачів від локальних компресорних установок.

Раціональні режими отримання стисненого повітря досягаються за відповідністю продуктивності компресорної станції кількості споживаного стисненого повітря пневмоприймачами. Експлуатація компресорних установок, що подають споживачам стиснене повітря тиском нижче номінального, призводить до зниження продуктивності пневмоприймачів та відповідно до збільшення ними витрати стисненого повітря для досягнення заданої продуктивності. У ряді випадків стиснене повітря подається компресорною станцією пневмоприймачам тиском вище номінального, внаслідок чого втрати повітря зростають. Регулювання тиску стисненого повітря - ефективний спосіб економії електроенергії на його виробництво (у разі зниження тиску стисненого повітря у пневмоприймачі на 0,02 МПа його витрата зменшується на 3%.

Для зміни кількості стиснутого повітря компресорною станцією протягом зміни або доби повинні бути передбачені пристрої і способи регулювання продуктивності компресорних установок і в цілому станції. Впровадження засобів та методів автоматизації процесів вироблення стисненого повітря дозволить точно витримувати їх параметри у системах виробництва та розподілу.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** Енергоефективність є головною проблемою при виробництві стисненого повітря, так як з погляду енергетичної ефективності, є не вигідним. Найбільші втрати енергії на компресорних станціях виникають через недостатній рівень організації ефективного контролю та управління роботою компресорних установок. Компресорні станції працюють неекономічно через високі питомі витрати електроенергії на вироблення стисненого повітря. На більшості компресорних станцій підприємств відсутні прилади обліку кількості виробленого стиснутого повітря, що не дозволяє експлуатаційному персоналу ефективно і якісно здійснювати технологічний процес його виробництва, проводити аналіз техніко-економічних показників роботи компресорних установок та фактичної питомої витрати електричної енергії на виробництво стисненого повітря.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Барановська М.Л. Аналіз споживання електричної енергії компресорними установками на залізорудних шахтах України/ І.Е. Петренко, В.Д. Барановський//Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. – 2019. – С. 102-113.

2. Маляренко В.А. Енергозбереження та енергетичний аудит/ В.А. Маляренко, І.А. Немировський. – Харків: НТУ «ХПІ», 2011. – 345 с.
3. Бондаренко Г. А. Компресорні станції/ Г. А. Бондаренко, Г. В. Кирик. Суми: Сумський державний університет, 2016. – 386 с.
4. Холоменюк М.В. *Компресорні установки*/ Холоменюк М.В. Дніпро: Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», 2013.– 52 с
5. Замицький О.В. Дослідження шляхів підвищення енергетичної ефективності виробництва стисненого повітря в шахтних компресорних установках/ О.В. Замицький, М.Ю. Лідер //Вісник Криворізького національного університету.– 2019.–№43. – С.175-180.

#### REFERENCES

1. Baranovska M.L. Analysis of electrical energy consumption by compressor units at iron ore mines of Ukraine/ I.E. Petrenko, V.D. Baranovsky//Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. – 2019. – P. 102-113.
2. Malyarenko V.A. Energy conservation and energy audit/ V.A. Malyarenko, I.A. Nemyrovsky - Kharkiv: NTU "KhPI", 2011. - 345 p.
3. G.A. Bondarenko Compressor stations / G. A. Bondarenko, G. V. Kyryk. Sumy: Sumy State University, 2016. – 386 p.
4. Holomenyuk M.V. Compressor units/ M.V. Kholomenyuk. Dnipro: State University "National Mining University", 2013.– 52 p.
5. O.V. Zamytskyi. Investigation of ways to increase the energy efficiency of compressed air production in mine compressor units/ O. V. Zamytskyi, M.Yu. Lider // Journal of Kryvyi Rih National University. – 2019. – No. 43. - P.175-180.

Received 19.04.2024.  
Accepted 22.04.2024.

#### ***Research of methods of increasing the energy efficiency of compressed air production by mine turbocompressors***

*Modern technological processes of industrial enterprises are provided by various energy carriers. The choice of rational energy carriers is determined by technological conditions, technical and economic indicators of production processes and energy supply conditions. Along with the main energy carriers, such as boiler and furnace fuel, thermal and electrical energy, water, compressed air is widely used in many industries. This is facilitated by its special properties: elasticity, transparency, harmlessness, fire safety, inability to condense, fast pressure transfer and unlimited supply of atmospheric air in nature. Compressed air is one of the most expensive energy carriers used in industry. One kilojoule of energy obtained from a factory network of compressed air is seven to ten*

*times more expensive than a kilojoule of energy used in an electric drive. This is due to the fact that the production of compressed air itself requires expensive compressor equipment and an air conditioning system that includes, among other things, a dehumidification system. Nevertheless, the specific weight of this type of energy in modern production is quite large. On average, compressed air production in industrialized countries accounts for about 10% of the total energy balance. At a number of industrial enterprises, the consumption of electricity for the production of compressed air reaches 20 - 30% of the total amount of consumed electrical energy. Therefore, in systems of production and distribution of compressed air, the task of energy saving is very relevant, which is achieved by increasing the efficiency of compressors, rational use of compressed air by pneumatic receivers and reducing its losses during production and transportation to consumers. So, the article discusses methods of increasing the efficiency of compressed air production and distribution systems. Methods and methods of reducing the specific consumption of electricity for the production of compressed air at compressor stations, its losses in the production and distribution systems, as well as increasing the productivity, efficiency and reliability of the operation of compressor stations are proposed.*

*Key words: compressed air, mine turbocompressor, air supply system, energy efficiency, consumer.*

**Юрій Анатолійович Монастирський** – д.т.н., професор, завідувач кафедри автомобільного транспорту, Криворізький національний університет.

**Валерій Костянтинович Титюк** – д.т.н., професор кафедри електромеханіки, Криворізький національний університет.

**Monastyrskiy Yurii** - Dr. Tech. Sciences, professor of Head of Automobile Facilities Department, Kryvyi Rih National University.

**Tityuk Valery** - Dr. Tech. of Sciences, professor of Electromechanics Department, Kryvyi Rih National University.