

## **Ефективність теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

*Проаналізовано ефективність теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання. Розроблено теоретичну модель цієї системи та виконано числовий аналіз її термодинамічної ефективності. Отримані результати свідчать, що застосування даної системи дозволяє суттєво зменшити питомі затрати електричної енергії на осушення робочого повітря в порівнянні з системою без використання теплового насоса за будь-яких значень параметрів оточуючого повітря. Отримано графічні залежності ефективності роботи системи за широкого діапазону робочих температур та вологості.*

**Ключові слова:** захист металевих обладнань від корозії, консервування енергетичного обладнання, осушення повітря, адсорбційний осушувач, тепловий насос.

### **Вступ**

Захист металевих конструкцій від корозії - актуальна проблема сучасної енергетики. Більшість аварійних ситуацій та фінансових витрат при експлуатації енергетичного обладнання спричинені саме дією корозії, оскільки обладнання експлуатується при високих температурах та значних надлишкових тисках. Будь-яка частина обладнання, яка піддалась дії корозії є потенційною причиною виходу з ладу усієї установки.

В сучасних умовах енергетичне обладнання працює в маневровому режимі і має тривалі періоди простою. Саме в цей час необхідно зберігати обладнання від дії стоячої корозії, як найбільш небезпечного її прояву. При відсутності заходів зі збереження обладнання термін його експлуатації знижується та зростають фінансові витрати на ремонтні роботи і амортизаційні відрахування [1].

Вологе повітря є основним каталізатором процесу корозії, при цьому чим вище відносна вологість повітря, тим швидше руйнування металевих частин обладнання. Але за низької відносної вологості повітря (нижче 40%) процеси корозії майже зупиняються і не руйнують метал, тому для якісного збереження енергетичного обладнання необхідно підтримувати відносну вологість повітря, яке контактує з металом, на рівні нижче 40% [2].

Існує багато способів осушення повітря, які мають різноманітну фізику процесу. До основних методів осушення повітря відносяться: конденсаційний, адсорбційний, абсорбційний та мембранний способи [3]. Оптимальним способом осушення повітря для забезпечення якісного консервування енергетичного обладнання є адсорбційний спосіб. Всі інші методи мають недоліки, які обмежують їхнє використання при зберіганні обладнання. До таких недоліків відносяться: неглибоке осушення повітря (конденсаційний та абсорбційний методи), надзвичайно високі витрати енергії на осушення (мембранний).

### **Мета роботи**

Метою проведеної роботи є поєднання адсорбційного осушувача повітря з теплонасосною установкою для утилізації теплоти відпрацьованого регенераційного повітря після адсорбційного ротора [4] з її подальшим використанням для підігріву свіжого регенераційного повітря. Дані дії викликані високими витратами електроенергії на підігрів регенераційного повітря в звичайних адсорбційних осушувачах, що в свою чергу збільшує фінансові витрати на виведення енергетичного обладнання в резерв.

### **Опис роботи схеми**

Для забезпечення глибокого осушення повітря, як консервуючого агенту, використовується селікагелевий адсорбційний ротор, а для підігріву і високоефективного регенерування теплоти регенераційного повітря застосовано тепловий насос, з частковою рециркуляцією регенераційного повітря, що суттєво зменшує споживання енергії в порівнянні з електричним нагрівом.

На рис.1. представлена теплонасосно-адсорбційна схема консервування енергетичного обладнання. Зовнішнє повітря (0) з температурою  $t_0$ , вологовмістом  $d_0$  і масовою витратою  $G_0$  забирається із зовнішнього середовища та подається в камеру змішування, де змішується з рециркуляційним регенераційним повітрям (6), яке надходить після випарника теплового насоса з температурою  $t_6$ , вологовмістом  $d_6$  і масовою витратою  $G_6$ . Після змішування повітряна суміш (7) подається в конденсатор теплового насоса, де підігрівается до температури  $t_3$  (3) і подається в ротор для його регенерації і видалення адсорбованої вологи. При проходженні через ротор регенераційне повітря охолоджується та зволожується. Після проходження через ротор регенераційне повітря (4) з температурою  $t_4$  та вологовмістом  $d_4$  розділяється на два потоки, один з яких викидається в оточуюче середовище (8), а інший направляється на випарник (5), де охолоджується і частково осушується. Після випарника теплового насоса рециркуляційне повітря подається в камеру змішування, де змішується зі свіжим повітрям. Робоче повітря, як консервуючий агент, циркулює між об'єктом який піддається консервуванню та робочою частиною адсорбційного ротора. Робоче повітря при проходженні через ротор підігрівается та осушується.

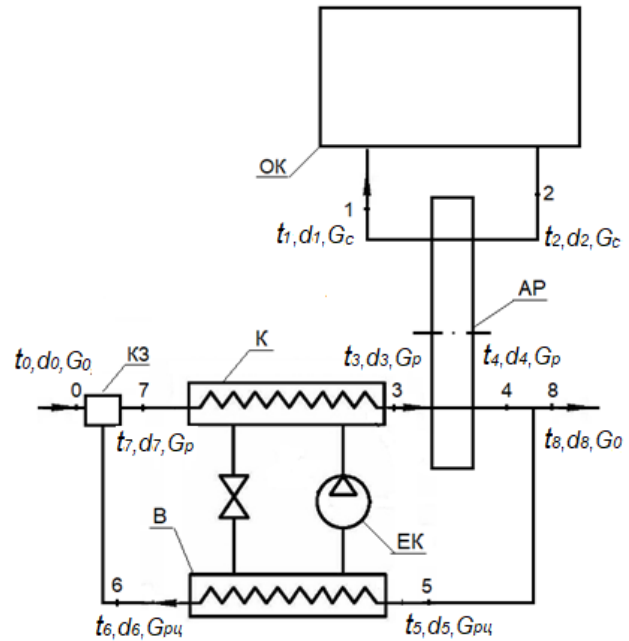


Рис. 1. Принципова теплонасосно-адсорбційна схема осушування повітря в системі консервування металевго обладнання: К – конденсатор ТН; В – випарник ТН; ЕК – компресор; АР – адсорбційний ротор; КЗ-камера змішування; ОК – об'єкт консервування.

### Аналіз ефективності системи

Термодинамічний аналіз представленої на рис. 1 схеми дозволив отримати систему взаємопов'язаних рівнянь для параметрів вологого повітря в її вузлових точках. На основі числової реалізації цієї системи рівнянь були отримані графічні залежності коефіцієнта енергетичної ефективності роботи системи (енергетичного ккд) від вищезазначених заданих параметрів повітря (атмосферного та на вході в ротор), що являє собою відношення теплоти, використаної на випаровування вологи, до затраченої електричної енергії на функціонування схеми осушення повітря.

При виборі діапазону для температури регенераційного повітря виходили із обмеження, що тепловий насос може забезпечити максимальну температуру повітря після конденсатора в  $70^{\circ}\text{C}$ . У той же час адсорбційний ротор вимагає мінімальну температуру регенераційного повітря в  $60^{\circ}\text{C}$ , тому у результатах розрахунків приведені дані для трьох температур:  $+60^{\circ}\text{C}$ ,  $+65^{\circ}\text{C}$ ,  $+70^{\circ}\text{C}$ .

Свіже повітря у даному випадку береться із робочого простору котельного цеху ТЕЦ, тому параметри повітря прийняті від  $0^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ , відносна вологість складає 50%.

На рис. 2 наведено графічні залежності коефіцієнта рециркуляції від температури зовнішнього повітря і температури регенераційного повітря після конденсатора. Із даних результатів впливає, що коефіцієнт рециркуляції зростає при зменшенні температури свіжого повітря та зменшенні температури повітря після конденсатора. Це спричинене тим фактом, що вологовміст свіжого повітря зі зменшенням температури різко зменшується і тому, для забезпечення необхідного вологовмісту регенераційної суміші потрібно менше переохолоджувати рециркуляційне повітря, що дозволяє пропускати через випарник більшу кількість повітря.

На рис. 3 наведено графічні залежності коефіцієнту трансформації теплового насоса від температури свіжого повітря і температури регенераційного повітря після конденсатора. Із даних результатів впливає, що коефіцієнт трансформації теплового насоса зростає при зменшенні температури свіжого повітря та при зменшенні температури регенераційного повітря, яке проходить через конденсатор.

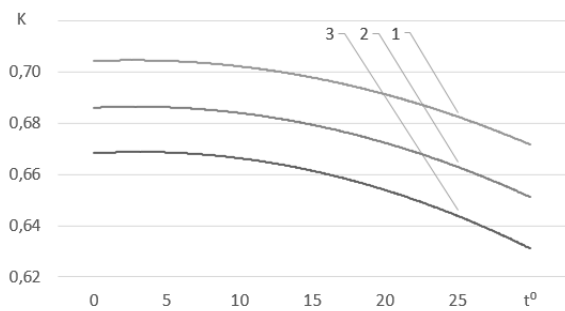


Рис.2. Залежність коефіцієнта рециркуляції від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1-  $t_k=60^{\circ}\text{C}$ , 2-  $t_k=65^{\circ}\text{C}$ , 3-  $t_k=70^{\circ}\text{C}$ .

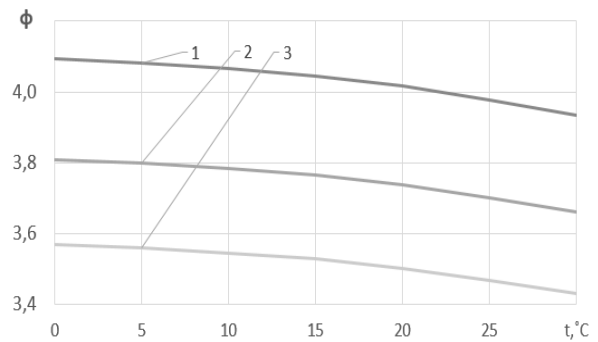


Рис.3. Залежність коефіцієнта трансформації ТН від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1-  $t_k=60^{\circ}\text{C}$ , 2-  $t_k=65^{\circ}\text{C}$ , 3-  $t_k=70^{\circ}\text{C}$ .

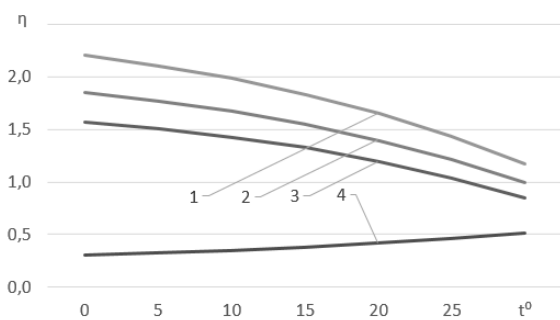


Рис.4. Залежність коефіцієнта енергетичної ефективності  $\eta$  від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора: 1-  $t_k=60^{\circ}\text{C}$ , 2-  $t_k=65^{\circ}\text{C}$ , 3-  $t_k=70^{\circ}\text{C}$ , 4- система без теплового насоса.

На рис.4. представлений графік залежності загального енергетичного ккд системи від температури зовнішнього повітря та температури повітря на вході в адсорбційний ротор (після конденсатора ТН). Також на графіку представлена залежність енергетичного ккд звичайного адсорбційного осушувача з електричним нагрівачем.

Із наведеного графіку можна зробити висновок, що застосування теплового насоса для підігріву регенеративного повітря є доцільним. Витрати електроенергії на осушення робочого повітря зменшуються від 2 до 7 разів в порівнянні з базовою схемою без теплового насоса.

## Висновки

1. Комбіноване використання адсорбційного осушувача та теплового насоса є набагато енергоефективнішим рішенням ніж використання адсорбційного осушувача з електричним нагрівачем. Ця перевага досягається за рахунок використання теплоти вологого регенераційного повітря, яке надходить після ротора.
2. При значеннях температур регенераційного повітря  $60^{\circ}\text{C}$ - $70^{\circ}\text{C}$  питомі затрати зовнішньої енергії у розробленій схемі менші у 2-7 разів, в порівнянні з базовою схемою без теплового насоса.
3. При використанні розробленої схеми особливістю є підвищена ефективність роботи при низьких температурах зовнішнього повітря, що сприяє використанню даного обладнання в помірній кліматичній зоні.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Майстренко О. О., Безродний М. К., Шаповал Б. А. (2018). Консервування енергетичного обладнання методом продувки сухим повітрям. *Енергетика та електрифікація*, 4, 3–5.
  2. Старцев В. И., Кострыкина Е. Ю., Модестова Т. Д. (1997) *МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО КОНСЕРВАЦИИ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ*. Москва: СПО ОРГРЭС.
  3. Хмельнюк М. Г., Ваджинский Д. И., Жихарева Н. В. (2014). Современные технологии осушения воздуха. *Холодильна техніка та технологія*, 3, 15-21.
  4. Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. І. (2013). *Теплові насоси та їх використання*. Київ: НТУУ"КПІ".
- Рекомендована кафедрою теоретичної і промислової теплотехніки Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Безродний Михайло Костянтинович** — д-р. техн. наук, проф., професор кафедри теоретичної і промислової теплотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [m.bezrodny@kpi.ua](mailto:m.bezrodny@kpi.ua).

**Майстренко Олександр Олександрович** — студент кафедри теоретичної і промислової теплотехніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, [bfshieкутлщ1010@gmail.com](mailto:bfshieкутлщ1010@gmail.com).

**М. К. Bezrodny<sup>1</sup>**  
**О.О. Maistrenko<sup>1</sup>**

## **Efficiency of heat pump-adsorption system of conservation power equipment**

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

*The efficiency of heat pump-adsorption scheme of energy equipment conservation is analyzed. A theoretical model of this system is developed and a numerical analysis of its thermodynamic efficiency is performed. The results obtained show that the application of this system allows to significantly reduce the specific energy consumption for drying the working air compared to the system without the use of a heat pump for any values of the ambient air parameters. The graphical dependences of the system performance over a wide range of operating temperatures and humidity were obtained.*

**Key words:** protection of metal equipment from corrosion, conservation of power equipment, air drainage, adsorption dehumidifier, heat pump.

**Bezrodny Mikhail Konstantinovich** — doctor of technical sciences, professor, professor of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, e-mail: [m.bezrodny@kpi.ua](mailto:m.bezrodny@kpi.ua).

**Maistrenko Oleksandr Oleksanrovich**— student of the Department of Theoretical and Industrial Heat Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, e-mail: [maistrenko1010@gmail.com](mailto:maistrenko1010@gmail.com).

**М.К. Безродный<sup>1</sup>**  
**А.А. Майстренко<sup>1</sup>**

## **Эффективность теплонасосно-адсорбционной системы консервирования энергетического оборудования**

<sup>1</sup>Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

*Проанализирована эффективность теплонасосно-адсорбционной системы консервирования энергетического оборудования. Разработана теоретическая модель этой системы и выполнен численный анализ ее термодинамической эффективности. Полученные результаты свидетельствуют, что применение данной системы позволяет существенно уменьшить удельные затраты электроэнергии на осушение рабочего воздуха по сравнению с системой без использования теплового насоса при любых значениях параметров окружающего воздуха. Получены графические зависимости эффективности работы системы за широкого диапазона рабочих температур и влажности.*

**Ключевые слова:** защита металлического оборудования от коррозии, консервирование энергетического оборудования, осушения воздуха, адсорбционный осушитель, тепловой насос.

**Безродный Михаил Константинович** — д-р. техн. наук, проф., профессор кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, [m.bezrodny@kpi.ua](mailto:m.bezrodny@kpi.ua).

**Майстренко Александр Александрович** — студент кафедры теоретической и промышленной теплотехники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», г. Киев, [bfshieкутлщ1010@gmail.com](mailto:bfshieкутлщ1010@gmail.com).