

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVINGS

УДК 62.768+62.747+62.744

М.К. Безродний, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0002-3500-5165
О.О. Майстренко, аспірант, ORCID 0000-0003-1961-7548
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕПЛОНАСОСНО- АДСОРБЦІЙНОЇ СИСТЕМИ КОНСЕРВУВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ З УРАХУВАННЯМ РЕАЛЬНИХ РОБОЧИХ ПРОЦЕСІВ В АДСОРБЦІЙНОМУ РОТОРІ

В роботі виконано аналіз енергетичної ефективності теплонасосно-адсорбційної системи консервування енергетичного обладнання з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі в порівнянні з енергоефективністю стандартної системи з електричним нагрівачем регенераційного повітря. В результаті аналізу показано, що теплонасосно-адсорбційна система є багаторазово більш енергоефективною за умови не тільки теоретичних, але і реальних (неізоентальпійних) робочих процесів в адсорбційному роторі. Показано також, що існують оптимальні значення температури регенераційного повітря після конденсатора теплового насоса на вході в ротор, при яких енергетична ефективність теплонасосно-адсорбційної системи досягає максимальних значень. Встановлено, що оптимальні значення температури регенераційного повітря змінюються в вузькому діапазоні (на рівні 60... 65 °С), а максимальні значення коефіцієнта енергоефективності суттєво зменшуються для стандартної системи з електронагрівачем і збільшуються для теплонасосно-адсорбційної системи при зменшенні температури навколишнього повітря.

Ключові слова: захист металевих обладнання 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 всієї 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. За відсутності заходів зі збереження обладнання термін його експлуатації знижується, та зростають фінансові витрати на ремонтні роботи і амортизаційні відрахування [1]. Волога повітря є основним каталізатором процесу корозії, при цьому чим вище відносна вологість повітря, тим швидше руйнування металевих частин обладнання [2]. 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 % [3]. Існує багато способів осушення повітря, які мають різноманітну фізику процесу. До основних методів осушення повітря відносяться: конденсаційний, адсорбційний, абсорбційний та мембранний способи [4].

Конденсаційний спосіб заснований на охолодженні повітря з подальшим видаленням вологи. Реалізується даний метод, зазвичай, з використанням теплового насоса. Для видалення вологи повітря пропускають спочатку через випарник теплового насоса, де повітря охолоджується та частково осушується,

© М.К. Безродний, О.О. Майстренко, 2020

далі повітря пропускається через конденсатор, де нагрівається, і паралельно з чим зменшується відносна вологість повітря. Даний метод має два суттєвих недоліки – надзвичайно складно досягти відносно вологості робочого повітря на рівні нижче 35–50% та неможливість осушення повітря з відносною вологістю нижче 35%. Перевагою даного методу є невисоке споживання електричної енергії на осушення повітря за відносною вологості повітря в 60 % та вище.

Адсорбційний метод заснований на властивості твердих сорбентів поглинати вологу з повітря. Існує два основних різновиди: осушення стисненого повітря при проходженні через товщу силікагелю та осушення повітря за атмосферного тиску при проходженні через адсорбційний ротор. Перший спосіб заснований на властивості деяких адсорбентів поглинати вологу зі стиснутого повітря та віддавати поглинуту вологу повітрю при більш низькому тиску. Для реалізації даного методу створюють спеціальне обладнання, яке має дві ємності з адсорбентом. Повітря, яке осушується, проходить через одну ємність, а частина від даного повітря розширюється та направляється в іншу ємність, де регенерує адсорбент. За рахунок попереминого руху повітря через ємності досягається безперервне осушення стиснутого повітря. Даний спосіб осушення повітря має вузьке застосування – осушення стиснутого повітря. Для осушення великої кількості повітря, яке необхідне за атмосферного тиску, даний метод не підходить через значні витрати електричної енергії на стиснення повітря.

Другий різновид адсорбційного осушення заснований на властивості силікагелю віддавати поглинуту вологу підігрітому регенераційному повітрю. В даному способі силікагель сформований у ротор, який обертається. Даний ротор розділений на два сектори. Через $\frac{3}{4}$ частини перерізу ротора проходить повітря, яке осушується і підігрівається, а через $\frac{1}{4}$ проходить підігріте регенераційне повітря, яке зволожується та охолоджується. При цьому процес осушення повітря безперервний. Даний спосіб дозволяє отримати повітряну суміш з температурою точки роси до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$, тобто може забезпечити глибоке осушення повітря. Але існує і один недолік – високі витрати електричної енергії на підігрів регенераційного повітря.

Також існує абсорбційний метод осушення повітря. Даний спосіб заснований на властивості концентрованого розчину поглинати вологу з повітря. Для реалізації даного методу створюють обладнання з двома зрошувальними камерами. В першій камері концентрований розчин контактує з повітрям, яке осушується, при цьому поглинається волога з повітря. Далі розчин направляється у другу зрошувальну камеру, де продувається гарячим регенераційним повітрям і випаровується. Після упарювання розчин охолоджується та направляється у першу зрошувальну камеру і цикл повторюється. Процес осушення повітря відбувається безперервно. Даний спосіб має високі витрати теплоти на регенерування розчину, значні габаритні розміри, і основне – пов'язаний з використанням агресивних водних розчинів, що є небезпечними для людини та металу. Також надзвичайно складно забезпечити глибоке осушення повітря за рахунок абсорбування вологи.

Мембранна технологія осушення повітря заснована на властивості мембран селективно пропускати молекули вологи, при цьому не пропускати повітря. Дана технологія реалізується за рахунок проходження стиснутого повітря через спеціальний пристрій, в якому потік вологого повітря розділяється на осушене повітря та паро-повітряну суміш, яка видаляється. Недоліком даного способу є великі витрати електричної енергії на стиснення повітря і подальше його проходження через мембрани.

Для реалізації системи консервування енергетичного обладнання всі технології, які мають у своєму складі процес стиснення повітря, не підходять, оскільки затрати енергії на стиснення великих об'ємів повітря є значними. Інші методи, як видно із вищенаведеного аналізу, також мають суттєві недоліки, що обмежують області їх використання. Найбільш придатною для зазначеної мети є адсорбційна технологія осушення повітря (заснована на використанні силікагелевого ротора), оскільки не має більшості недоліків і дозволяє проектувати установки, які можуть забезпечити надзвичайно низьку відносну вологість (до температури точки роси в $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$). Разом з тим слід відмітити, що енергетична ефективність адсорбційних осушувачів досить низька внаслідок повної втрати теплоти зволоженого регенераційного повітря, що викидається в атмосферу. Саме даний чинник є основним стримуючим фактором до широкого використання адсорбційних осушувачів у технологіях консервування. Тому для забезпечення високої енергетичної ефективності адсорбційної технології осушення при одночасному забезпеченні низької вологості робочого повітря запропонована теплонасосно-адсорбційна система осушення, яка поєднує переваги адсорбційного осушувача та теплового насосу.

Термодинамічний аналіз енергоефективності роботи такої системи був виконаний в роботі [5] за умови теоретичних (ізоентальпійних) процесів осушення робочого повітря та зволоження регенераційного повітря в адсорбційному роторі. Реальні процеси осушення та зволоження повітря в реальних конструкціях адсорбційних роторів суттєво відрізняються від ідеальних процесів при $h=const$ і можуть бути визначені для стандартних роторів за існуючою методикою. В зв'язку з цим виникає питання впливу цих реальних процесів на кінцеву енергетичну ефективність роботи теплонасосно-адсорбційної системи осушення повітря для умов консервування енергетичного обладнання.

Мета роботи. Метою проведеної роботи є визначення впливу реальних процесів осушення робочого і зволоження регенераційного повітря в стандартних адсорбційних роторах на енергетичну ефективність теплонасосно-адсорбційної системи осушення повітря, що використовується для консервування енергетичного обладнання.

Опис роботи схеми. Принцип роботи адсорбційного осушувача заснований на властивості селікагелю поглинати вологу з повітря при відносно низьких температурах ($-40\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +40\text{ }^{\circ}\text{C}$), та віддавати адсорбовану вологу гарячому регенераційному повітрю ($+60\text{ }^{\circ}\text{C} \dots +150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для забезпечення безперервного процесу осушення робочого повітря та регенерування адсорбенту створюють спеціальний ротор (рис.1). Даний ротор має сотову структуру, що збільшує поверхню контакту і полегшує проходження повітря через об'єм селікагелю. Ротор поділений на дві зони, із співвідношення 1 до 4, через більшу зону проходить робоче повітря, яке осушується і підігрівається, а через меншу зону - попередньо підігріте регенераційне повітря, яке випаровує вологу з ротора, зволожується та охолоджується.

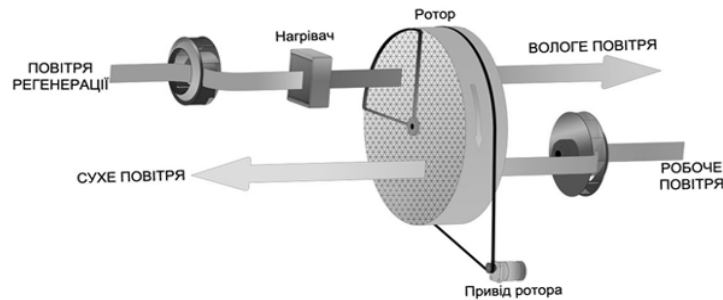


Рисунок 1– Принцип роботи адсорбційного осушувача повітря

На рис.2 представлена теплонасосно-адсорбційна схема консервування енергетичного обладнання. В цій схемі для забезпечення глибокого осушення повітря, як консервуючого агента, 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.

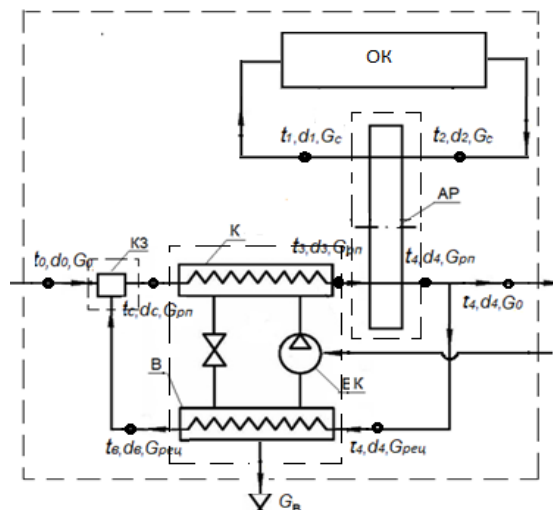


Рисунок 2– Принципова теплонасосно-адсорбційна схема осушення повітря в системі консервування металевих обладнання: К – конденсатор ТН; В – випарник ТН; ЕК – компресор; АР – адсорбційний ротор; КЗ – камера змішування; ОК – об'єкт консервування.

Принцип роботи схеми полягає в наступному. В верхній частині рисунка показаний об'єкт консервування (ОК), із якого вологе (робоче) повітря подається в адсорбційний ротор, підігрівається, осушується і з температурою t_1 та вологовмістом d_1 знову надходить в ОК. В нижній частині рисунка наведена схема підготовки, подачі в ротор і відведення з нього регенераційного повітря. При цьому 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_b , вологовмістом d_b і масовою витратою G_b . Після змішування повітряна суміш (7) подається в конденсатор теплового насоса, де підігрівається 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 ротора 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 (рециркуляційний) через випарник теплового насоса (5), де охолоджується і частково осушується, подається в камеру змішування, де змішується зі свіжим повітрям.

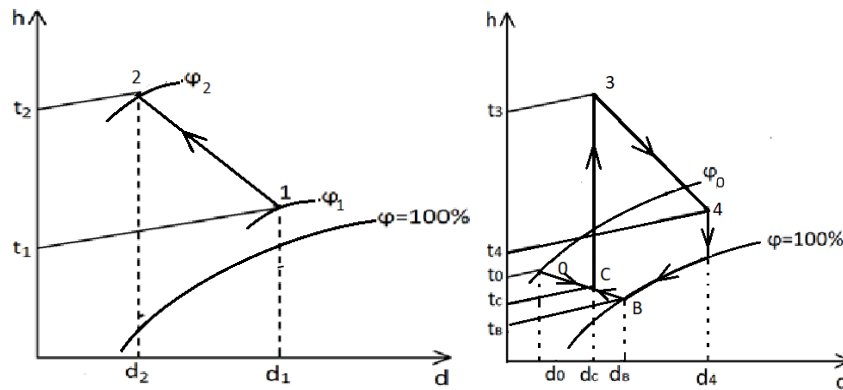


Рисунок 3 – Процес осушення робочого повітря при проходженні через адсорбційний ротор

Рисунок 4 – Процес підготовки та зміни стану регенераційного повітря при проходженні через адсорбційний ротор та ТН

На рисунках 3 і 4 представлені робочі процеси осушення робочого та зміни стану регенераційного повітря в елементах теплонасосно-адсорбційної установки в h-d діаграмі вологого повітря.

Аналіз енергоефективності роботи схеми з ідеальним ротором

Термодинамічний аналіз енергоефективності роботи схеми, представленої на рис. 2, був виконаний в роботі [5] за умови теоретичних процесів осушення робочого повітря та зволоження регенераційного повітря в адсорбційному роторі. При цьому було прийнято, що процеси 1-2 та 3-4 протікають при постійній ентальпії, тобто за умови $h_1 = h_2$ і $h_3 = h_4$. За цих умов на основі рівнянь теплового і матеріального балансів окремих елементів (Рис. 2) і схеми в цілому була складена модель системи, числова реалізація якої дозволила визначити залежності параметрів повітря в вузлових точках схеми, коефіцієнта рециркуляції регенеративного повітря і коефіцієнта перетворення ТН, що забезпечують задані параметри рециркуляційного повітря на вході в адсорбційний ротор. Як результат аналізу отримані залежності від температури свіжого повітря для коефіцієнта енергоефективності теплонасосно-адсорбційної установки. При цьому показано, що така схема і за таких умов є енергоефективною, а її ефективність зростає зі зниженням температури свіжого повітря і зі зменшенням температури регенеративного повітря на вході в адсорбційний ротор з $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Аналіз енергоефективності схем осушення робочого повітря з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі. При розрахунках теоретичної системи консервування енергетичного обладнання було припущено, що процес осушення та зволоження повітря в адсорбційному роторі відбувається при сталій ентальпії, чого не відбувається в реальному процесі. Реальний процес у роторі відбувається зі зміною ентальпії повітряних потоків, оскільки проходять теплообмінні процеси між нагрітим регенераційним повітрям і ротором, та між ротором і відносно прохолодним робочим повітрям. В даному випадку адсорбційний ротор виступає в ролі низько ефективного рекуператора, що при вирішенні задачі осушення повітря є небажаним.

Коефіцієнт ефективності роботи адсорбційного ротора як рекуператора складає 5-8 %, в залежності від параметрів роботи ротора. Для процесів осушення повітря ротор обертається з частотою 6-15 об/год, що є надзвичайно низьким значенням для роботи в якості рекуператора теплоти, однак дана частота обертання ротора є найбільш ефективною для видалення вологи з повітря та відновлення ротора.

На рисунку 5 представлено графік осушення *робочого* повітря, тобто зміни параметрів *робочого* повітря при проходженні через адсорбційний ротор. Виходячи із даного рисунку, можна зробити висновок,

що процес осушення робочого повітря відбувається не ізоентальпійно, а проходить із певним збільшенням ентальпії повітря.

На рисунку 6 представлено графік зміни стану та параметрів *регенераційного* повітря при проходженні через адсорбційний ротор та теплонасосну установку. Із рисунку видно, що процес осушення ротора та зволоження регенераційного повітря, також проходить не ізоентальпійно, а з деякою втратою ентальпії, яка передається робочому повітряу через адсорбційний ротор.

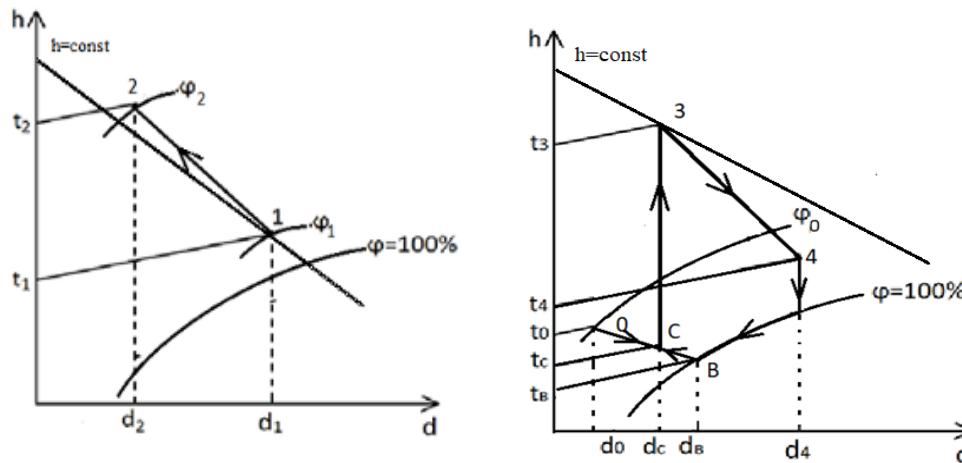


Рисунок 5– Реальний процес осушення робочого повітря при проходженні через адсорбційний ротор з урахуванням необоротностей у всіх елементах системи.

Рисунок 6– Реальний процес підготовки та зміни стану регенераційного повітря при проходженні через адсорбційний ротор та ТН з урахуванням необоротностей у всіх елементах системи.

Дана, вище вказана, особливість робочих процесів в роторі, впливає з того, що адсорбційний ротор є не тільки сорбентом вологи, а і низькоєфективним рекуператором теплоти. Передача теплоти від регенераційного повітря до робочого повітря відбувається безперервно, оскільки адсорбційний ротор безперервно обертається та передає потік теплоти. Кількість переданої теплоти залежить від декількох факторів:

- різниці температур між нагрітим регенераційним повітрям та робочим повітрям на вході в ротор, чим вище різниця температур, тим вищою є передача теплоти;
- швидкості обертання адсорбційного ротора, чим вища швидкість обертання, тим вищий тепловий потік;
- форми та розміру сотової структури адсорбційного ротора.

Теоретичний розрахунок енергоефективності системи осушення робочого повітря з урахуванням реальних (неізоентальпійних) процесів в адсорбційному роторі являє собою вельми складну задачу, оскільки дані для параметрів на виході з ротора в реальних процесах осушення робочого і зволоження регенераційного повітря ми не можемо обрахувати теоретично. Однак ці параметри повітря при заданих параметрах на вході в ротор ми можемо отримати при використанні спеціалізованого програмного забезпечення виробника адсорбційних осушувачів COTES [6]. Використовуючи ці дані, енергоефективність теплонасосно-адсорбційної схеми осушення робочого повітря можна розрахувати за методикою, що розроблена в роботі [5] для теоретичного ротора.

Нижче наведені результати розрахунків параметрів робочого і регенераційного повітря на виході з ротора, виконаних за допомогою програмного забезпечення [6] з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря, для двох варіантів виконання системи: стандартної адсорбційної системи з електричним нагрівачем регенераційного повітря і теплонасосно-адсорбційної системи. Розрахунки проведені для двох типорозмірів адсорбційного ротора діаметром 650 мм і товщиною 100 і 200 мм. При цьому були прийняті наступні вихідні параметри повітря на вході в ротор:

- температура робочого повітря перед входом в ротор 20 °С;
- вологовміст робочого повітря перед входом в ротор 5,8 г/кг.с.п. (відповідає 40% відносної вологості повітря);
- температура регенераційного повітря змінювалась в діапазоні від 50 °С до 100 °С;
- вологовміст регенераційного повітря для стандартної системи відповідає 50 % відносної вологості повітря за температури оточуючого середовища, в якому встановлюється обладнання;

- вологовміст регенераційного повітря для теплонасосно-адсорбційної системи підтримувався за допомогою ТН на постійному рівні і складав 10 г/кг.с.п.

Результати розрахунків для ротора товщиною 100 мм. Нижче в таблицях 1, 2, 3 наведені результати розрахунків параметрів повітря на виході з ротора товщиною 100 мм для стандартної адсорбційної системи з використанням електричного калорифера, як єдиного джерела нагріву регенераційного повітря.

Таблиця 1 – Залежність вологівмісту регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря на вході в ротор та температури оточуючого середовища.

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	7.65	8.07	8.630	9.390	10.440	11.860	13.910
55	8.41	8.85	9.420	10.210	11.280	12.740	14.830
60	9.18	9.63	10.230	11.030	12.140	13.630	15.750
65	9.96	10.42	11.040	11.870	13.000	14.520	16.680
70	10.73	11.21	11.840	12.690	13.850	15.400	17.600
75	11.49	11.99	12.640	13.510	14.960	16.270	18.510
80	12.23	12.74	13.410	14.300	15.510	17.120	19.400
85	12.94	13.46	14.140	15.050	16.290	17.930	20.250
90	13.59	14.13	14.820	15.760	17.020	18.700	21.050
95	14.18	14.73	15.440	16.400	17.690	19.400	21.790
100	14.7	15.26	15.990	16.970	18.280	20.300	22.470

Таблиця 2 – Залежність температури регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря на вході в ротор та температури оточуючого середовища

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
50.0	41.0	42.0	42.0	43.0	44.0	45.0	47.0
55.0	42.0	42.0	43.0	44.0	44.0	46.0	47.0
60.0	42.0	43.0	43.0	44.0	45.0	46.0	47.0
65.0	42.0	43.0	43.0	44.0	45.0	46.0	48.0
70.0	43.0	43.0	44.0	45.0	45.0	47.0	48.0
75.0	43.0	44.0	44.0	45.0	46.0	47.0	49.0
80.0	44.0	44.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0
85.0	44.0	45.0	45.0	46.0	47.0	48.0	49.0
90.0	45.0	45.0	46.0	46.0	47.0	48.0	50.0
95.0	45.0	46.0	46.0	47.0	48.0	49.0	50.0
100.0	46.0	46.0	47.0	47.0	48.0	49.0	51.0

Таблиця 3 – Залежність вологівмісту робочого повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища

t ₃ , °C	Температура оточуючого повітря						
	0.0	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0	30.0
50.0	1.54	1.61	1.69	1.80	1.93	2.10	2.31
55.0	1.48	1.55	1.63	1.74	1.87	2.03	2.24
60.0	1.43	1.50	1.58	1.68	1.81	1.97	2.18
65.0	1.38	1.44	1.52	1.62	1.75	1.91	2.11
70.0	1.32	1.39	1.46	1.57	1.69	1.85	2.05
75.0	1.27	1.33	1.41	1.51	1.64	1.79	1.99
80.0	1.22	1.28	1.36	1.46	1.58	1.73	1.93
85.0	1.17	1.23	1.31	1.40	1.53	1.68	1.87
90.0	1.12	1.18	1.26	1.35	1.47	1.62	1.81
95.0	1.07	1.13	1.21	1.30	1.42	1.57	1.75
100.0	1.03	1.09	1.16	1.25	1.37	1.51	1.70

З урахування отриманих параметрів повітря на виході з реального ротора за методикою, наведеною в роботі [5] була розрахована енергетична ефективність стандартної системи в залежності від температури регенераційного повітря на вході в ротор і температури оточуючого повітря. Результати розрахунків наведені в таблиці 4 і на рис. 7.

Таблиця 4 – Залежність загального коефіцієнту ефективності роботи стандартної адсорбційної системи від температури зовнішнього повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм.

$t_3, ^\circ\text{C}$	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	0.300	0.320	0.340	0.356	0.368	0.369	0.363
55	0.307	0.327	0.345	0.362	0.375	0.379	0.380
60	0.314	0.333	0.351	0.367	0.381	0.387	0.391
65	0.320	0.338	0.356	0.372	0.386	0.394	0.400
70	0.325	0.343	0.360	0.376	0.390	0.399	0.407
75	0.329	0.347	0.364	0.379	0.393	0.402	0.412
80	0.332	0.349	0.366	0.381	0.394	0.404	0.415
85	0.334	0.350	0.366	0.381	0.395	0.405	0.416
90	0.334	0.350	0.365	0.380	0.393	0.404	0.415
95	0.333	0.348	0.363	0.377	0.390	0.400	0.412
100	0.330	0.344	0.359	0.372	0.385	0.394	0.407

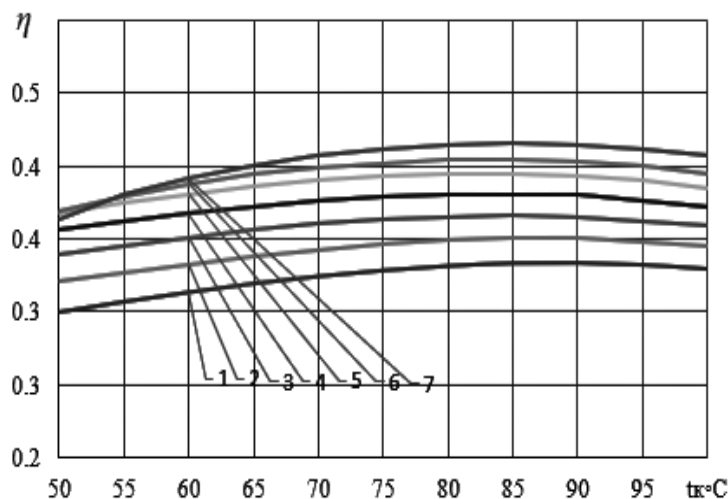


Рисунок 7 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η стандартної адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм: 1- $t_0=0\text{ }^\circ\text{C}$, 2- $t_0=5\text{ }^\circ\text{C}$, 3- $t_0=10\text{ }^\circ\text{C}$, 4- $t_0=15\text{ }^\circ\text{C}$, 5- $t_0=20\text{ }^\circ\text{C}$, 6- $t_0=25\text{ }^\circ\text{C}$, 7- $t_0=30\text{ }^\circ\text{C}$

Як видно з рис. 7, чим вища температура свіжого повітря, тим вищий коефіцієнт ефективності системи, що обумовлено нижчим енергоспоживанням електричного нагрівача на підігрів регенераційного повітря в калорифері. Крім того видно, що за температур регенераційного повітря на вході в ротор вище $90\text{ }^\circ\text{C}$ енергоефективність системи починає знижуватись, що пов'язано з поглинаючими властивостями силікагелю. Дана особливість впливає з того, що при більш високих температурах, витрати енергії на видалення кожної наступної порції вологи необхідно витратити більшу кількість теплоти, що призводить до зниження загальної ефективності системи. Також не слід забувати і про властивість адсорбційного ротора передавати теплоту між потоками регенераційного та робочого повітря, що в свою чергу також має негативний вплив на загальну енергетичну ефективність роботи стандартної адсорбційної системи. Два, вище вказані фактори у сумі призводять до того, що максимальна ефективність роботи стандартної адсорбційної системи досягається при температурах близько $90\text{ }^\circ\text{C}$.

Дані розрахунків для теплонасосно-адсорбційної системи і того самого ротора товщиною 100 мм наведені в таблицях 5, 6 і на рис. 8.

Таблиця 5 – Залежність параметрів повітря за реального процесу роботи теплонасосно-адсорбційної системи консервування

Температура $t_3, ^\circ C$	Вологовміст $d_2, \text{г/кг.с.п.}$	Температура $t_2, ^\circ C$	Вологовміст $d_4, \text{г/кг.с.п.}$	Температура $t_4, ^\circ C$
50.00	4.71	25.1	13.26	35
55.00	4.41	26.2	14.17	36
60.00	4.1	27.3	15.09	38
65.00	3.8	28.3	16	40
70.00	3.5	29.4	16.91	42
75.00	3.2	30.4	17.81	44
80.00	2.9	31.5	18.69	46
85.00	2.62	32.5	19.52	48
90.00	2.36	33.4	20.32	50
95.00	2.11	34.3	21.05	52
100.00	1.9	35.2	21.71	54

Таблиця 6 – Залежність загального коефіцієнту ефективності роботи теплонасосно-адсорбційної системи від температури зовнішнього повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора ТН при товщині ротора 100 мм

$t_3, ^\circ C$	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	1.248	1.198	1.137	1.060	0.966	0.856	0.728
55	1.288	1.239	1.178	1.101	1.006	0.892	0.765
60	1.301	1.257	1.196	1.120	1.026	0.915	0.784
65	1.297	1.255	1.195	1.121	1.031	0.920	0.789
70	1.283	1.242	1.184	1.115	1.026	0.917	0.787
75	1.265	1.225	1.169	1.101	1.014	0.908	0.781
80	1.240	1.201	1.150	1.084	0.999	0.895	0.769
85	1.210	1.173	1.124	1.059	0.976	0.876	0.754
90	1.181	1.145	1.097	1.033	0.953	0.855	0.736
95	1.145	1.110	1.064	1.003	0.927	0.831	0.713
100	1.107	1.073	1.029	0.970	0.896	0.805	0.690

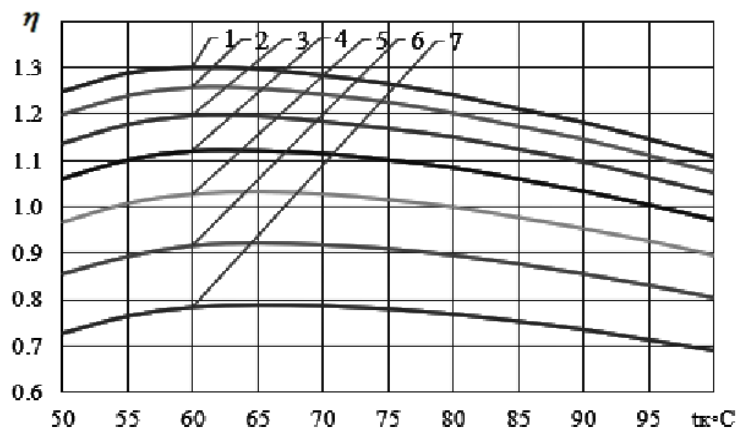


Рисунок 8 - Залежність реального коефіцієнта енергетичної ефективності η теплонасосно-адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 100 мм: 1- $t_0=0\ ^\circ C$, 2- $t_0=5\ ^\circ C$, 3- $t_0=10\ ^\circ C$, 4- $t_0=15\ ^\circ C$, 5- $t_0=20\ ^\circ C$, 6- $t_0=25\ ^\circ C$, 7- $t_0=30\ ^\circ C$

З рис. 8 видно, що на відміну від стандартної системи з підвищенням температури навколишнього повітря енергоефективність теплонасосно-адсорбційної системи зменшується. Це пояснюється тим, що при збільшенні температури свіжого повітря при тій самій відносній вологості збільшується його

вологоміст, наслідком чого є збільшення навантаження на випарник ТН для більш глибокого осушування регенераційного повітря. Крім того видно, що при збільшенні температури регенераційного повітря на вході в ротор до величини 60 - 70⁰С, загальна ефективність системи зростає, а при подальшому підвищенні цієї температури енергоефективність падає, що пояснюється погіршенням умов роботи теплового насосу і відповідним зменшенням його коефіцієнта трансформації.

Результати розрахунків для ротора товщиною 200 мм. Нижче наведені результати аналогічних розрахунків роботи реальних систем при товщині адсорбційного ротора 200 мм. Робота системи при товщині адсорбційного ротора 200 мм буде більшою, ніж при товщині адсорбційного ротора в 100 мм, оскільки більш глибоко буде осушуватись робоче повітря та глибше спрацьовуватись регенераційне повітря.

Результати розрахунків для стандартної системи наведені в таблицях 7, 8, 9 і на рис. 9.

У таблиці 6 наведений вологоміст регенераційного повітря після адсорбційного ротора при використанні стандартної адсорбційної системи за широкого набору параметрів свіжого повітря та температури регенераційного після проходження конденсатора теплонасосної установки, перед подачею в адсорбційний ротор.

Таблиця 7 – Залежність вологомісту регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, г/кг.с.п. від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	8.56	8.98	9.53	10.28	11.31	12.72	14.75
55	9.49	9.92	10.49	11.26	12.32	13.77	15.83
60	10.43	10.88	11.46	12.56	13.35	14.82	16.93
65	11.39	11.85	12.45	13.27	14.38	15.89	18.03
70	12.36	12.83	13.45	14.28	15.42	16.95	19.13
75	13.33	13.81	14.44	15.29	16.45	18.01	20.22
80	14.28	14.77	15.41	16.28	17.46	19.05	21.29
85	15.19	15.69	16.34	17.23	18.43	20.05	22.32
90	16.01	16.52	17.19	18.09	19.32	20.97	23.29
95	16.68	17.2	17.88	18.81	20.07	21.76	24.12
100	17.13	17.67	18.37	19.33	20.63	22.36	24.8

В таблиці 7 наведені температури регенераційного повітря для стандартної адсорбційної системи з товщиною ротора 200 мм на виході з адсорбційного ротора, тобто відпрацьованого, насиченого вологою регенераційного повітря, в залежності від параметрів свіжого повітря та температури регенераційного повітря перед подачею в ротор. Температурні рівні регенераційного повітря поступово знижуються при зменшенні температури регенераційного повітря на вході в адсорбційний ротор, а також при зменшенні температури свіжого повітря, яке надходить в калорифер.

Таблиця 8 – Залежність температури регенераційного повітря за реального процесу роботи стандартної адсорбційної системи консервування після проходження через ротор, від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	29	29	30	31	32	34	36
55	30	31	32	33	34	36	37
60	32	33	34	35	36	37	39
65	34	35	35	36	37	39	41
70	36	37	37	38	39	41	42
75	38	38	39	40	41	42	44
80	40	40	41	42	43	44	46
85	42	42	43	44	45	46	47
90	44	44	45	46	47	48	49
95	46	47	47	48	49	50	51
100	50	50	51	51	52	53	54

Якщо залежність температури відпрацьованого регенераційного повітря від температури регенераційного повітря на вході в ротор є зрозумілою, то її залежність від температури свіжого повітря є не такою прозою. Дана залежність пояснюється тим фактом, що чим нижча температура свіжого повітря, тим нижчим є вологовміст даного повітря, а отже і вологовміст нагрітого регенераційного повітря перед подачею в ротор також є нижчим. Дана особливість призводить до того, що за однакової температури регенераційного повітря з меншим вологовмістом спрацьовується глибше та охолоджується до більш низьких температур і при цьому краще осушує адсорбційний ротор, що в свою чергу краще осушує потік робочого повітря, яким проводять консервування енергетичного обладнання.

В таблиці 9 і на рис. 9 наведені результати розрахунків коефіцієнту енергоефективності стандартної адсорбційної системи.

Таблиця 9 – Залежність реального коефіцієнту енергоефективності стандартної адсорбційної системи консервування від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	0.34439	0.36962	0.39431	0.4178	0.43834	0.45202	0.46397
55	0.35522	0.37942	0.40341	0.42612	0.4467	0.46225	0.47604
60	0.36484	0.38853	0.4114	0.43321	0.45448	0.46991	0.48612
65	0.37391	0.39672	0.41905	0.44092	0.46081	0.47719	0.49369
70	0.3822	0.40421	0.42603	0.44685	0.4666	0.48258	0.49969
75	0.38954	0.4108	0.43173	0.45199	0.47112	0.48715	0.5041
80	0.39548	0.416	0.43609	0.45576	0.47427	0.49023	0.50691
85	0.3997	0.41946	0.4387	0.45776	0.47561	0.49136	0.50767
90	0.40107	0.42001	0.43864	0.45667	0.47409	0.48947	0.50605
95	0.39847	0.41645	0.43402	0.45149	0.4683	0.48343	0.49957
100	0.39071	0.40784	0.42447	0.44118	0.45745	0.47205	0.48889

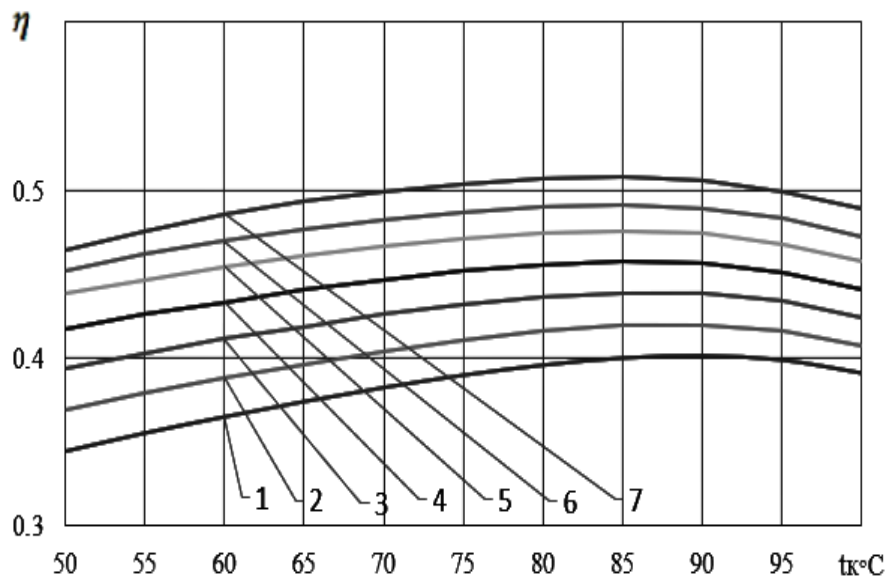


Рисунок 9 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η стандартної адсорбційної системи від температури свіжого повітря та температури регенераційного повітря після конденсатора, при товщині ротора 200 мм: 1- $t_0=0\text{ }^{\circ}\text{C}$, 2- $t_0=5\text{ }^{\circ}\text{C}$, 3- $t_0=10\text{ }^{\circ}\text{C}$, 4- $t_0=15\text{ }^{\circ}\text{C}$, 5- $t_0=20\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6- $t_0=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, 7- $t_0=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Результати розрахунків для теплонасосно-адсорбційної системи і ротора товщиною 200 мм представлені в таблицях 10,11 і на рис. 10.

Як видно з рисунків 9 і 10, характер впливу основних параметрів (температури регенераційного повітря на вході в ротор і температури зовнішнього повітря) остається таким же, як і для ротора товщиною 100 мм, однак абсолютні значення коефіцієнту енергоефективності суттєво вищі.

Таблиця 10 – Залежність температури та вологовмісту регенераційного повітря після проходження через ротор для теплонасосно-адсорбційної системи від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Параметри регенераційного повітря	
	d ₄ , г/кг.с.п.	t ₄ , °C
50	14.11	35
55	15.18	37
60	16.27	38
65	17.36	40
70	18.45	42
75	19.53	43
80	20.59	45
85	21.61	47
90	22.56	49
95	23.29	51
100	24.03	54

Таблиця 11 – Залежність реального коефіцієнту енергоефективності теплонасосно-адсорбційної системи консервування від температури регенераційного повітря та температури оточуючого середовища, при товщині ротора 200 мм

t ₃ , °C	Температура зовнішнього повітря						
	0	5	10	15	20	25	30
50	1.57386	1.5109	1.4334	1.33691	1.21829	1.0786	0.91764
55	1.60108	1.53959	1.46358	1.36849	1.25087	1.11352	0.95118
60	1.602	1.54837	1.47381	1.38021	1.26393	1.12744	0.96611
65	1.59111	1.53902	1.46644	1.37505	1.26436	1.12893	0.96797
70	1.56868	1.51833	1.44802	1.36341	1.25466	1.12109	0.96274
75	1.54261	1.49372	1.42534	1.34291	1.23667	1.10797	0.95213
80	1.51562	1.46264	1.40113	1.3205	1.21633	1.08979	0.93713
85	1.47797	1.42936	1.36966	1.29127	1.18973	1.06831	0.91869
90	1.43689	1.39241	1.3344	1.25619	1.15913	1.04045	0.89486
95	1.40422	1.36096	1.30449	1.23013	1.13648	1.01935	0.87099
100	1.32657	1.28576	1.23246	1.16216	1.07348	0.96447	0.82712

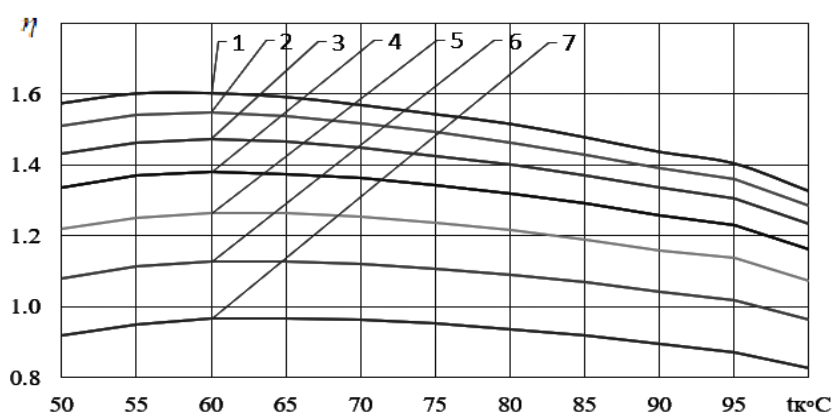


Рисунок 10 - Залежність реального коефіцієнту енергетичної ефективності η теплонасосно-адсорбційної системи від температури регенераційного повітря після конденсатора та температури свіжого повітря, при товщині ротора 200 мм: 1- t₀=0 °C, 2- t₀=5 °C, 3- t₀=10 °C, 4- t₀=15 °C, 5- t₀=20 °C, 6- t₀=25 °C, 7- t₀=30 °C

Порівняння енергоефективності базової і удосконаленої систем з теоретичним і реальним ротором. На рисунку 11 наведено загальний графік порівняння максимальних коефіцієнтів ефективності роботи (при оптимальних температурах регенераційного повітря на вході в ротор) для стандартної

адсорбційної системи та удосконаленої теплонасосно-адсорбційної системи за двох товщин ротора- 100 мм та 200 мм. З даного графіка видно, що на ефективність роботи систем суттєво впливають наступні чинники: товщина ротора і параметри свіжого повітря. Видно, що чим більша товщина ротора, тим ефективніше працюють системи як з теплонасосною установкою, так і без неї. Цікавою особливістю роботи систем є той факт, що збільшення температури зовнішнього повітря приводить до підвищення енергоефективності стандартної системи і до зменшення ефективності теплонасосно-адсорбційної системи. Це пояснюється тим, що у стандартній адсорбційної системи при підвищенні початкової температури необхідно витратити менше електричної енергії у калорифері системи, а у випадку теплонасосно-адсорбційної системи супутнє збільшення вологовмісту свіжого повітря приводить до збільшення навантаження на випарник ТН і до відповідного збільшення енергетичних затрат.

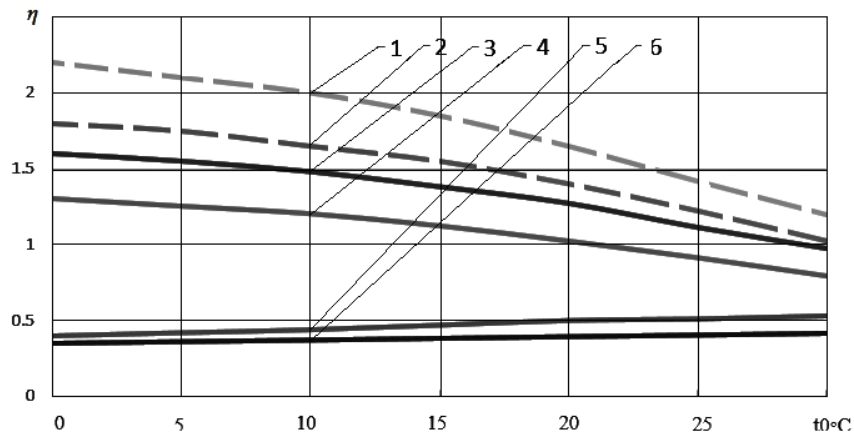


Рисунок 11 - Порівняння енергоефективності роботи теплонасосно-адсорбційної та стандартної адсорбційної системи консервування обладнання в залежності від температури свіжого повітря: 1, 2 – для теоретичної установки при температурі регенераційного повітря 60 °C і 65 °C; 3, 4 – для реальної установки при оптимальній температурі регенераційного повітря і товщині ротора 200 і 100 мм; 5, 6 – для стандартної системи без ТН при товщині ротора 200 мм і 100 мм відповідно

Виходячи із наведеного порівняння на рисунку 11, можна зробити висновок, що використання теплового насосу в системі підготовки регенераційного повітря суттєво покращує загальну енергоефективність роботи реальних систем, однак ефективність дещо нижча, ніж в теоретичних умовах [5], що обумовлено наявністю передачі теплоти від регенераційного повітря до робочого через ротор.

Висновки. З вищенаведених результатів розрахунків видно, що теплонасосно-адсорбційна схема консервування обладнання навіть з урахуванням реальних процесів осушення і зволоження повітря в адсорбційному роторі є більш ефективною ніж стандартна система з електронагрівачем та дозволяє суттєво економити енергоресурси. Особливостями роботи даної системи є те, що її ефективність зростає при зниженні температури свіжого повітря. Дана обставина обумовлена тим, що при зниженні температури свіжого повітря суттєво зменшується вологовміст повітря, що вимагає не такого глибокого переохолодження рециркуляційного повітря у випарнику, в результаті чого покращуються умови роботи теплового насосу і, як наслідок, підвищується енергетична ефективність роботи теплового насосу.

В результаті числового дослідження показано, що теплонасосно-адсорбційна система характеризується оптимальними значеннями температури регенераційного повітря на рівні 60 – 65 °C, при яких коефіцієнт енергоефективності досягає максимального значення. Також виявлено, що енергетична ефективність стандартної системи на базі електричного нагрівача досягає максимуму при температурі регенераційного повітря 85-90 °C, що свідчить про те, що перегрівати регенеративне повітря вище даних температур небажано, оскільки при більш високих температурах ефективність використання зовнішньої енергії знижується.

В зв'язку зі зменшенням оптимальної температури регенераційного повітря на вході в ротор для теплонасосно-адсорбційної системи в порівнянні з базовою системою слід мати на увазі, що при зменшенні температури регенеративного повітря знижується і поглинаюча потужність обладнання. Дана обставина змушує при використанні теплонасосно-адсорбційної системи збільшувати витрату повітря, яка задіяна в осушенні робочого тракту обладнання.

Список використаної літератури

1. Майстренко О. О. Консервування енергетичного обладнання методом продувки сухим повітрям / Майстренко О. О., Безродний М. К., Шаповал Б. А. // *Енергетика та електрифікація*-2018.- №4 -С. 3–5.
2. Чинні галузеві нормативні документи з експлуатації та ремонту Електростанцій та мереж [Електронний ресурс].– Режим доступу до ресурсу: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. Старцев В. И. Методические указания по консервации теплоэнергетического оборудования / Старцев В. И., Кострыкина Е. Ю., Модестова Т. Д. // Москва: СПО ОРГРЭС-1997.
4. Хмельнюк М. Г. Современные технологии осушения воздуха / Хмельнюк М. Г., Ваджинский Д. И., Жихарева Н. В. // *Холодильна техніка та технологія*-2014. - №3- С.15-21.
5. Безродний М.К., Майстренко О.О. Термодинамічний аналіз теплонасосно-адсорбційної схеми консервування енергетичного обладнання // *Енергетика: економіка, технології, екологія*. - 2019, № 2, с.49 – 58.
6. «Online Calculator» [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://calculator.cotes.com>

M. Bezrodny, Dr. Sc. Sciences., Prof. ORCID 0000-0002-3500-5165

O. Maistrenko, Master ORCID 0000-0003-1961-7548

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF HEAT PUMP AND ADSORPTION SYSTEM OF CONSERVATION OF ENERGY EQUIPMENT

The analysis of energy efficiency of heat pump-adsorption system of conservation of power equipment taking into account real processes of dehumidification and humidification of air in adsorption rotor in comparison with energy efficiency of standard system with electric heater of regenerative air is performed. The analysis shows that the heat pump-adsorption system is many times more energy-efficient under the condition of not only theoretical but also real (non-isoenthalpy) working processes in the adsorption rotor. It is also shown that there are optimal values of regeneration air temperature after the heat pump condenser at the inlet to the rotor, at which the energy efficiency of the heat pump-adsorption system reaches maximum values. It is established that the optimal values of regeneration air temperature change in a narrow range (at the level of 60...65 °C), and the maximum values of energy efficiency coefficient significantly decrease for a standard system with electric heater and increase for heat pump-adsorption system with decreasing ambient temperature.

Keywords: protection of metal equipment from corrosion, canning of power equipment, air drainage, adsorption dehumidifier, heat pump.

REFERENCES

1. O.O. Maisrenko, Konservuvannya energetichnoho obladdannya metodon produvki syhum povitryam / O.O. Maisrenko, M.K. Bezrodny, B.A. Shapoval // *Energetika I elektrifikaciya*-2018.-#4.-S.3-5.
2. Chinni haluzevi normativni dokumentu z ekspluatatsii ta remontu Elektrostancii ta merezh [Elektronnyj resurs].- Rezhym dostupu: https://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/GID-34.01.101-2009_2018_01_01_web.pdf.
3. V.I. Starcev, METODICHESKIE UKAZANIYA PO KONSERVVACII TEPLOENERGETICHESKOHO OBORUDOVANIYA / V.I. Starcev, E.U. Kostrukina, T.D. Modestova // Москва: СПО ОРГРЭС-1997.
4. M.H. Hmelnyuk, Sovremennue tehnologii osusheniya vozduha / M.H. Hmelnyuk, D.I. Vaddzinskiy, N.V. Zihaleva // *Hololilna tehnika ta tehnolohiyz*-2014.-#3.-S.15-21.
5. Bezrodny M.K., Maistrenko O.O. Thermodynamic analysis of heat pump-adsorption scheme of conservation of power equipment // *Energy: economics, technologies, ecology*. - 2019, № 2, p.49 - 58.
6. Web-source «Online Calculator» URL: <http://calculator.cotes.com>

Надійшла 12.11.2020

Received 12.11.2020