

DOI: 10.31319/2519-2884.41.2022.15

УДК 62-681

**Р.О. Клімов**, к.т.н., доцент, klroma@ukr.net

**А.П. Пододня**, магістр, annapodod@gmail.com

**А.С. Морозовська**, магістр, mrzvska@gmail.com

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

## ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У СУШАРКАХ

*У роботі наведено методику розрахунку сумісної роботи сушильної установки та теплових насосів. Дана методика дозволяє визначити оптимальну частку рециркуляції відхідного вологого повітря, обробленого в тепловому насосі, в сушарку. Тим самим можна досягти максимальної ефективності завантаження теплових насосів для рециркуляційного повітря та знизити споживання первинного палива для підігріву свіжого повітря на сушарку.*

**Ключові слова:** сушарка; калорифер; тепловий насос; матеріал; рециркуляція; температура.

*The paper presents a method for calculating the joint operation of a drying plant and heat pumps. This technique makes it possible to determine the optimal proportion of recirculation of the outgoing moist air treated in the heat pump to the dryer. In this way, it is possible to maximize the charging efficiency of the heat pumps for recirculated air and reduce the consumption of primary fuel for heating the fresh air to the dryer.*

**Keywords:** dryer; heater; heat pump; material; recirculation; temperature.

### Постановка проблеми

Швидке зростання цін на енергоносії в світі робить проблему енергозбереження актуальною для сьогодення. Сушка матеріалів є одним з самих енергоємних теплотехнологічних процесів. Незважаючи на високу витрату теплоти на процеси сушки якість отриманого матеріалу може не відповідати сучасним вимогам, а питома витрата енергії буде занадто високою. На це в першу чергу впливає якісний склад устаткування яке використовується для отримання кінцевого продукту сушки та відповідне впровадження енергозберігаючих технологій.

Для сушки матеріалів найчастіше використовують камерний та стрічковий типи сушарок [1—3]. Якщо ж порівнювати ці типи сушарок з прогресивними типами, до яких можна віднести сушарки киплячого типу та багатокамерні, то можна зробити висновок про те, що їх теплотехнічні параметри мають не такі високі показники, які необхідні в сучасних умовах, а впровадження новітніх технологій є достатньо інертним. Тому розгляд нових засобів і пристроїв для сушки матеріалів з використанням теплових насосів є перспективним.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Сьогоднішній розвиток теплонасосної технології, що використовує поновлювані та нетрадиційні джерела низькопотенційної енергії, пояснюється як можливою економією дефіцитного органічного палива у великих масштабах, так і підвищеними вимогами до екологічної чистоти виробництва теплоти [4—6]. Енергетична значимість застосування теплових насосів різного функціонального призначення незаперечно доведена досвідом успішної експлуатації працюючих теплових насосів у світі, а їх актуальність — темпами впровадження.

Теплові насоси різного конструктивного виконання знаходять широке використання в процесах сушіння. В роботі [5] проаналізовано стан сушильної технології і підраховано кількість води, що видаляється в промислових процесах на підприємствах. Так конденсаційна сушарка з тепловим насосом найбільш ефективно використовує теплову енергію витрачену на випаровування.

Від ступеня рециркуляції повітря залежить коефіцієнт корисної дії сушарки. У сушарках неможлива повна рециркуляція відхідних газів, так як збільшення вологовмісту повітря значно зменшує його сушильну здатність [1]. Але тепловий насос може бути ефективно засто-

сований як засіб видалення вологи з відхідних газів сушарок і при цьому можна збільшувати частку їх рециркуляції.

Якщо порівнювати різні типи сушарок зі ступенем видалення вологи  $3 \text{ кг}/(\text{кВт}\cdot\text{г})$  можна показати, що при однакових показниках споживання енергії в порівнянні з теплонасосними сушарками при паровому нагріванні коефіцієнт корисної дії має бути не менше 58 %, а в разі вогневого нагрівання — 75 %. Реальні значення ККД таких сушарок будуть нижчі, тому тепловий насос може дати економію палива [4].

#### Формування мети дослідження

Метою дослідження є визначення оптимального значення частки рециркуляції оброблених відхідних газів з сушарки при якій досягається найбільша економія енергоресурсів.

#### Виклад основного матеріалу

Проведемо дослідження того, як впливає встановлення теплового насосу або їх групи на процеси тепловологісної обробки матеріалу та витрату енергетичних ресурсів на цей процес. Для дослідження впливу теплового насосу на осушення відхідних газів з сушарки прийемо до розрахунку сушарку продуктивністю  $500 \text{ кг}/\text{г}$  в якій висушується мінеральне добриво.

Технологічна схема сушарки з тепловим насосом приведена на рис. 1. Частка відпрацьованого вологого повітря надходить до випарника теплового насосу, де осушується, і далі підігрівається в конденсаторі. Потім цей потік змішується зі свіжим повітрям та подається до калорифера.

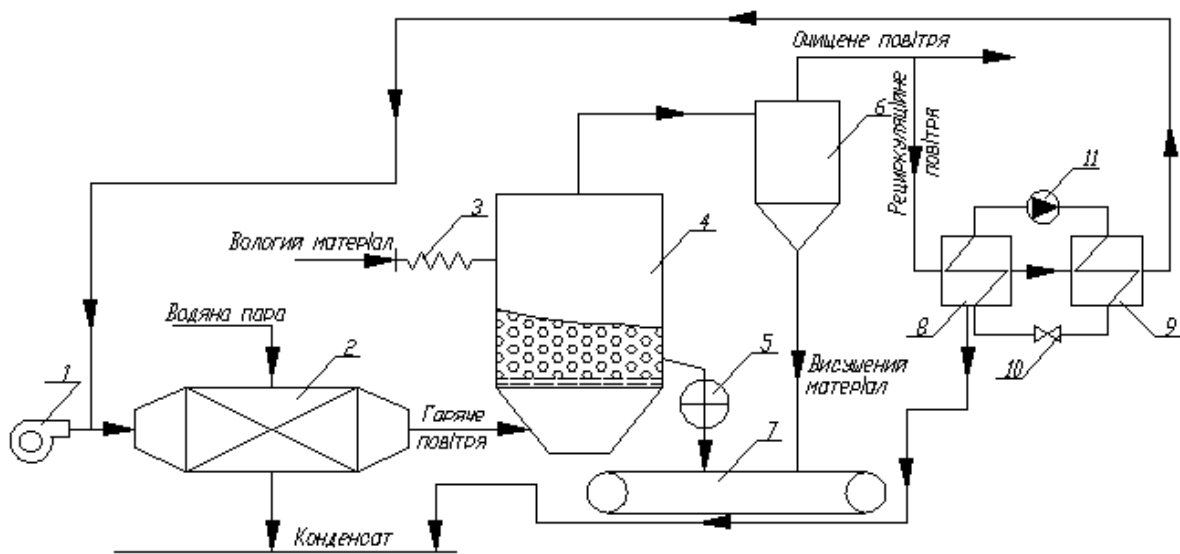


Рис. 1. Технологічна схема сушарки з тепловим насосом: 1 — вентилятор; 2 — калорифер; 3 — живильник; 4 — сушильна камера; 5 — дозатор; 6 — циклон; 7 — транспортер; 8 — випарник; 9 — конденсатор; 10 — дросельний пристрій; 11 — компресор

Розрахунки проводимо за допомогою рівнянь теплового балансу сушарки та процесів які відбуваються в ній. ККД системи підкоряється звичайним законам теплових насосів, коефіцієнт перетворення теплового насосу залежить від різниці температур випаровування і конденсації. Зниження різниці температур зазвичай досягається в сушарках з камерою змішування, де охоложене повітря з насиченою парою змішується з неохолодженим перед входом в конденсатор.

У сушарках можна застосовувати і звичайні системи відновлення тепла. Вони можуть грати і роль зневоднювальних пристроїв. Визначення оптимальної частки теплонасосних і звичайних систем відновлення тепла можна рекомендувати в якості корисного впровадження.

Розрахункова схема рециркуляції і обробки допоміжного вологого газу приведена на рис. 2.

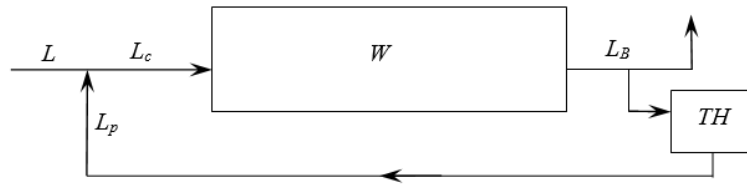


Рис. 2. Розрахункова схема рециркуляції і обробки рециркуляційного вологого газу

За загальною кількістю рециркуляційного газу можливо вибрати тепловий насос, який забезпечить сушку та охолодження газу у випарнику та підігрів в конденсаторі.

Визначення витрат і параметрів рециркуляційного та сухого газу за певного значення коефіцієнту рециркуляції  $k_p$ , є достатньо трудомісткою задачею. Для її вирішення складемо систему рівнянь.

Витрата рециркуляційного повітря

$$L_p = k_p L, \quad (1)$$

де  $L$  — витрата свіжого повітря, кг/с;  $k_p$  — коефіцієнт рециркуляції.

Загальна витрата повітря

$$L_c = L + L_p. \quad (2)$$

Параметри суміші після змішування

$$x_{cm} = k_p (x_p - x_0) + x_0; \quad (3)$$

$$I_{cm} = k_p (I_p - I_0) + I_0, \quad (4)$$

де  $x_0, x_p$  — вологовміст свіжого та рециркуляційного повітря, кг/кг;  $I_0, I_p$  — ентальпія свіжого та рециркуляційного повітря, Дж/кг;

Питома теплота пароутворення

$$r_{mm} = f(t_{mm}) = f(I_{cm}), \quad (5)$$

де  $t_{mm}$  — температура мокрого термометра.

Загальна витрата теплоти на сушарку

$$Q_z = 1,15(Q_g + Q_c), \quad (6)$$

де  $Q_g, Q_c$  — витрата теплоти на випаровування вологи, нагрів матеріалу, Вт.

$$Q_g = W(r_{mm} + c_n t_{zg} - c_g t_{m1}); \quad (7)$$

$$Q_c = G_k c_m (t_{m2} - t_{m1}), \quad (8)$$

де  $W$  — витрата вологи, що випаровується, кг/с;  $G_k$  — продуктивність по висушеному матеріалу, кг/с;  $c_n, c_g, c_m$  — теплоємність пари, води, матеріалу, Дж/(кг·К);  $t_m$  — температура матеріалу, °С;  $t_{zg}$  — температура вологих газів на виході, °С

Витрата теплоти на калорифер

$$Q_n = L_c (I_1 - I_{cm}), \quad (9)$$

де  $I_1$  — ентальпія підігрітого повітря, Дж/кг.

Внутрішній баланс сушильної камери має вигляд

$$\Delta = \frac{Q_c + Q_n}{W} - c_g t_{m1}. \quad (10)$$

Параметри теплоносія на виході з сушарки з урахуванням рециркуляції

$$x_g = \frac{(1 - k_p) x_0 (c_p t_1 + r_0 + \Delta) + c_2 (t_1 - t_{zg})}{\Delta + c_n t_{zg} + r_0 - k_p (c_n t_1 + r_0 + \Delta)}, \quad (11)$$

$$I_{\theta} = (c_2 + c_n x_{2\theta}) t_{2\theta} + r_0 x_{2\theta} \quad (12)$$

Ентальпія та вологовміст рециркуляційного повітря

$$I_p = I_{\theta} + \frac{-Q_v + Q_k}{L_p} - c_2 \Delta t, \quad \Delta t = (2 \div 5) \text{ } ^\circ\text{C}; \quad (13)$$

$$x_p = \frac{I_p - c_2 t_p}{c_n t_p + r_0}, \quad (14)$$

де  $Q_v, Q_k$  — теплова потужність випарника та конденсатора теплового насосу, Вт

$$Q_v = Q_k (1 - 1 / COP), \quad (15)$$

де  $COP$  — коефіцієнт перетворення теплового насосу.

Загальна витрата сухого газу

$$L_c = \frac{W}{x_{\theta} - x_{cm}}; \quad (16)$$

Питома витрата теплоти на сушку

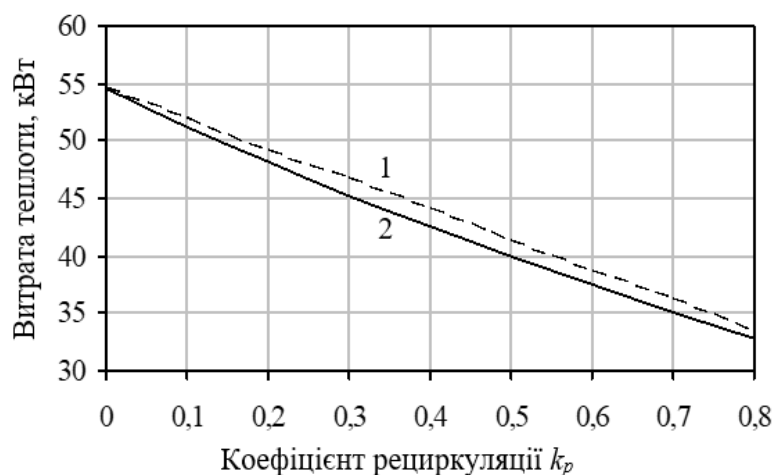
$$q = \frac{I_1 - I_{cm}}{x_{\theta} - x_{cm}}; \quad (17)$$

Коефіцієнт корисної дії сушарки [2]

$$\eta = \frac{Q_{\theta}}{qW}. \quad (18)$$

Для рішення системи рівнянь (1)—(18) потрібні початкові умови та теплофізичні характеристики газів та матеріалу.

Після розрахунку рівнянь (1)—(18) можливо визначити питомі показники процесу сушіння для різних значень  $k_p$ . Результати розрахунків для масиву значень  $k_p$  для витрати теплоти в калорифері для підігріву свіжого повітря  $Q_n = f(k_p)$  представлені на рис. 3. При цьому кількість теплових насосів була прийнята у відповідності до покриття розрахункових значень потужності [6].



1 — рециркуляція; 2 — рециркуляція з тепловим насосом

Рис. 3. Залежність витрати теплоти в калорифері від коефіцієнту рециркуляції

Рециркуляція відхідного вологого повітря з сушарки призводить до деякого збільшення необхідної кількості повітря для сушки внаслідок того, що зростає вологовміст первинного повітря яке надходить до сушарки. Сам процес проходить до встановлення як теплової так і вологісної рівноваги в сушильному агрегаті.

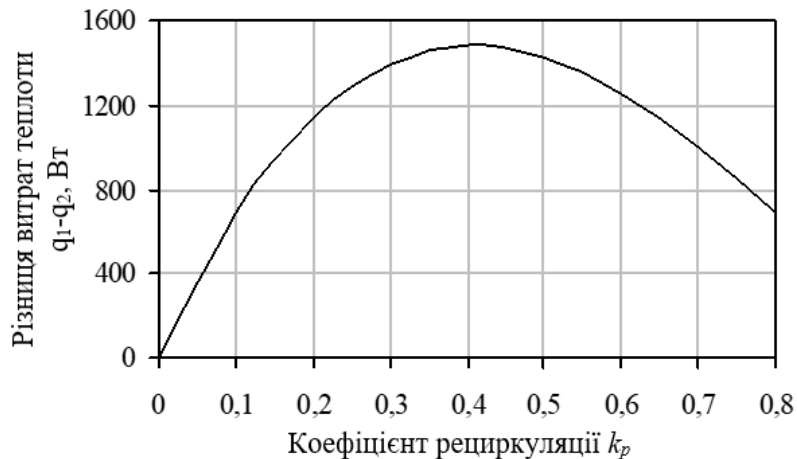


Рис. 4. Залежність різниці витрат теплоти в калорифері від коефіцієнту рециркуляції

Як видно з рис. 4, для прийнятої сушарки найбільшу ефективність від використання теплового насосу можна отримати при  $k_p = 0,41$ . При інших значеннях рециркуляції економія від використання теплового насосу, в порівнянні зі звичайною рециркуляцією, також буде, але в менших межах. Тобто використання теплового насосу в теплотехнічному аспекті є завжди ефективним.

#### Висновки

Проведені розрахунки сумісної роботи сушарки та теплових насосів за допомогою рівнянь теплового балансу сушарки у відповідності до процесів які відбуваються в ній. Встановлення теплового насосу за сушаркою на стороні відхідних газів впливає як на вологісний режим, так і на температурний при рециркуляції деякої частки відхідних зволжених газів оброблених в тепловому насосі на вхід до сушарки.

Як показали результати дослідження, використання теплового насосу для підсушування відхідного вологого газу та повернення його в цикл дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії сушарки на 3,1 %, але при цьому витрачається енергія на привід компресора теплового насосу. Відповідно до цього, також знижується витрата первинного палива для отримання необхідної кількості теплової енергії на підігрів.

Розроблена методика дозволяє визначити оптимальну частку рециркуляції відпрацьованого повітря в сушарках для досягнення найбільшої економії первинного палива в порівнянні зі звичайною рециркуляцією.

#### Список використаної літератури

1. Чагин О.В. Оборудование для сушки пищевых продуктов. Иваново. 2007. 138 с.
2. Филиппов В.А. Конструкция, расчет и эксплуатация устройств и оборудования для сушки минерального сырья. М.: Недра, 1979. 309 с.
3. Клімов Р.О. Теплоенергетичні системи промислових підприємств. Навчальний посібник. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2013. 200 с.
4. Рей Д. Тепловые насосы. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
5. Богун В.А., Щегольков Е.Е. Применение тепловых насосов для утилизации низкопотенциальной теплоты промышленного предприятия. *Промышленная энергетика*. 1988, №5. С. 9–10.

6. Коновалов В.И. Сушка с тепловыми насосами в химической промышленности: возможности и экспериментальная техника. *Вестник ТГТУ*. 2011. Том 17. №1. С. 153–178.

## OPTIMIZATION OF HEAT PUMPS IN DRYERS

Klimov R., Pododnia A., Morozovskaya A.

### Abstract

The rapid rise in energy prices in the world makes the problem of energy saving relevant for today. Drying of materials is one of the most energy-intensive heat-technological processes. Despite the high heat consumption for drying processes, the quality of the resulting material may not meet modern requirements, and the specific energy consumption will be too high. Therefore, consideration of new means and devices for drying materials using heat pumps is promising.

The efficiency of the dryer depends on the degree of air recirculation. In dryers, complete recirculation of exhaust gases is impossible, since an increase in the moisture content of the air significantly reduces its drying capacity. But the heat pump can be effectively used as a means of removing moisture from the exhaust gases of the dryers, while it is possible to increase the proportion of their recirculation.

The aim of the study is to determine the optimal value of the percentage of recirculation of the treated exhaust gases from the dryer, at which the greatest energy savings are achieved.

The installation of a heat pump downstream of the dryer on the flue gas side effects both the humidity and temperature conditions by recirculating some of the flue gases treated in the heat pump to the dryer inlet. As the results of the study showed, the use of a heat pump to dry the exhaust wet gas and return it to the cycle makes it possible to increase the efficiency of the dryer, but energy is wasted to drive the heat pump compressor. In accordance with this, the consumption of primary fuel is also reduced to obtain the required amount of thermal energy for heating.

The developed method makes it possible to determine the optimal proportion of exhaust air recirculation in dryers in order to achieve the greatest savings in primary fuel compared to conventional recirculation.

### References

- [1] Chagin, O.V. (2007) *Oborudovaniye dlya sushki pishchevykh produktov* [Food drying equipment]. Ivanovo [in Russian].
- [2] Filippov, V.A. (1979) *Konstruktsiya, raschet i ekspluatatsiya ustroystv i oborudovaniya dlya sushki mineral'nogo syr'ya* [Design, calculation and operation of devices and equipment for drying mineral raw materials]. M.: Nedra [in Russian].
- [3] Klimov, R.O. (2013). *Teploenergetichni sistemi promislovikh pidpriemstv* [Heat and power systems and industrial enterprises]. Dniprodzerzhinsk: DDTU [in Ukraine].
- [4] Rey, D. (1982) *Teplovyye nasosy* [Heat pumps]. M.: Energoizdat [in Russian].
- [5] Bogun, V.A., & Shchegol'kov, Ye. Ye. (1988) *Primeneniye teplovykh nasosov dlya utilizatsii nizkopotentsial'noy teploty promyshlennogo predpriyatiya* [The use of heat pumps for the utilization of low-grade heat of an industrial enterprise]. *Industrial energy*, №5, 9–10 [in Russian].
- [6] Konovalov, V.I. (2011) *Sushka s teplovymi nasosami v khimicheskoy promyshlennosti: vozmozhnosti i eksperimental'naya tekhnika* [Drying with heat pumps in the chemical industry: opportunities and experimental techniques]. *Bulletin of TSTU*, Vol.17, №1, 153–178 [in Russian].