

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ В ТЕПЛОМАСООБМІННОМУ МОДУЛІ ЗА УМОВИ ПІДВИЩЕНОГО ТИСКУ

В.О. Потапов, О.Ю. Гриценко

Проведено теоретичний аналіз і порівняння енергоефективності процесів конвективного та фільтраційного сушіння в тепломасообмінному модулі під дією підвищеного тиску. Показано, що запропонований спосіб сушіння приводить до збільшення енергоефективності процесу на 45...85% за умови надлишкового тиску 0,15...0,25МПа.

Ключові слова: сушіння, тепломасообмінний модуль, підвищений тиск, енергоефективність.

АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ В ТЕПЛОМАСООБМЕННОМ МОДУЛЕ ПРИ ПОВЫШЕННОМ ДАВЛЕНИИ

В.А. Потапов, О.Ю. Гриценко

Проведен теоретический анализ и сравнение энергоэффективности процессов конвективной и фильтрационной сушки в тепломассообменном модуле под действием повышенного давления. Показано, что предложенный способ сушки приводит к увеличению энергоэффективности процесса на 45...85% при избыточном давлении 0,15...0,25 МПа.

Ключевые слова: сушка, тепломассообменный модуль, повышенное давление, энергоэффективность.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF THE PROCESS OF DRYING IN THE HEAT-MASS TRANSFER MODULE AT HIGH PRESSURE

V.A. Potapov, O.Y. Gritsenko

The main methods of energy saving in the processes of convective drying are heat utilization of drying agent and forced drying of drying agent with the purpose of intensification of mass transfer. Earlier we proposed the method of drying in the heat-mass transfer module (HMTM) under increased pressure and the filtering of the drying agent through the material. According to this method, crushed wet material is placed in a hermetic heat-mass transfer module where an excessive pressure is created by external compressor. Due to compression in compressor the air is heated to the necessary temperature. Air is completely are saturating by

vapour during filtration through a porous structure of the wet material then condensed under excess pressure and vapour-liquid mixture is removed from heat-mass transfer module.

The work deals with the mathematical modeling of drying agent state during processes of convective drying and drying in the heat-mass transfer module under the excessive pressure

The estimates were performed for the consumption of the drying agent and power consumption of two methods of drying with the identical evaporating power.

It is shown that the consumption of drying agent at the same evaporating power is identically for standard mode of convective drying ($t_1=60\text{...}160\text{ }^\circ\text{C}$ $\varphi_2=0,4$) and filtration drying in HMTM under the excessive pressure ($p_1=0,15\text{...}0,4\text{ MPa}$). The energy consumption for convective drying in these modes is higher on 45...85% than for the filtration drying in heat-mass transfer module for the same value of evaporating power.

Keywords: *drying of wet materials, heat-mass transfer module, the overpressure, energy efficiency.*

Постановка проблеми у загальному вигляді. Відповідно до проведеного аналізу літературних джерел із техніки й технології сушіння харчової рослинної сировини найбільше використання на сьогодні одержав конвективний метод сушіння, реалізований у сушильних установках тунельного, конвеєрного й стрічкового типів, завдяки простоті їхньої конструкції, низькій вартості устаткування й експлуатації. Відповідно до зарубіжних джерел на сушіння припадає 25% національного споживання енергії промислово розвинених країн, а в харчовій і переробній промисловості – до 30%. У той же час питомі енерговитрати сучасних конвективних сушарок становлять 4000...9000 кДж/кг випаруваної вологи, що у 2...4 рази більше теоретичного мінімуму на випаровування 1 кг води. Аналіз енергетики процесу конвективного сушіння показує, що 30% із загального теплового балансу припадає на прямі втрати, із яких 70% – це втрати із сушильним агентом, що викидається в навколишнє середовище за підвищеної температури. У зв'язку з високою вартістю енергоресурсів завдання зниження споживаної енергії є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними сучасними методами енергозбереження в процесах сушіння є: утилізація тепла сушильного агента, примусове сушіння сушильного агента з метою інтенсифікації масообміну, керовані змінні режими зневоднювання [1]. Раніше нами був запропонований спосіб сушіння в тепломасообмінному модулі (ТМОМ) під дією підвищеного тиску за рахунок фільтрації сушильного агента через матеріал [2]. Відповідно до цього способу подрібнений вологий матеріал розміщується в герметичному ТМОМ, де створюється надлишковий

тиск за допомогою зовнішнього компресора [3]. При цьому в результаті стиснення повітря в компресорі нагрівається до необхідної температури. Під час фільтрації повітря через пористу структуру вологого матеріалу воно повністю насичується до стану конденсації пари й під дією надлишкового тиску парорідинна суміш виводиться з ТМOM[4]. Висушена зона поступово просувається від входу до виходу ТМOM. При цьому сушильний агент повністю використовує свій сушильний потенціал, охолоджуючись до температури навколишнього середовища і навіть нижче внаслідок роботи з витиснення парорідинної суміші з пористої структури [5]. У результаті практично відсутні втрати теплоти із сушильним агентом, що, як зазначено вище, є основною причиною низького ККД конвективних сушарок [6]. У даному способі сушіння функції калорифера й вентилятора сполучені в одному пристрої – компресорі. Таким чином, зникають додаткові енерговитрати на переміщення сушильного агента, як у конвективних сушарках.

На сьогодні відсутні кількісні оцінки порівняння енерговитрат для конвективного сушіння й сушіння в ТМOM за умови підвищеного тиску.

Мета статті – порівняння енергоефективності процесів конвективного сушіння й сушіння в тепломасообмінному модулі під дією підвищеного тиску.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для вирішення поставленого завдання було проведено математичне моделювання процесів конвективного сушіння й сушіння в ТМOM за умови підвищеного тиску (рис. 1).

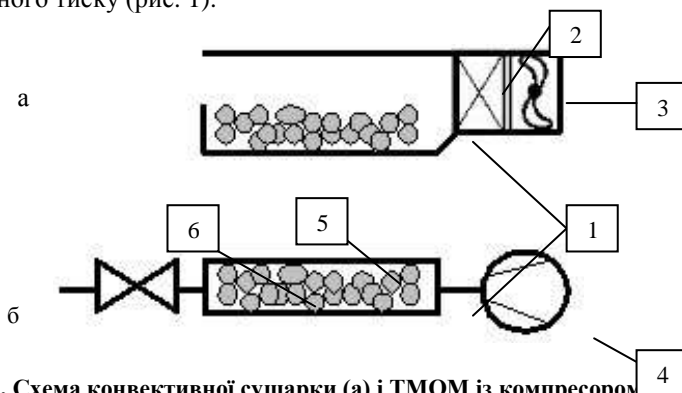


Рис. 1. Схема конвективної сушарки (а) і ТМOM із компресором
 1 – продукт; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – компресор; 5 – ТМOM;
 6 – дросель

Було розглянуто однаковий режим для обох сушарок, коли сушильний агент повністю насичується вологою до відносної вологості $\varphi_2=1$ на виході сушарки. І хоча для конвективного сушіння такий режим на практиці не використовується (звичайно $\varphi_2=0,3\dots 0\dots 0,4$), проте вологість $\varphi_2=1$ на виході із сушарки є теоретичною межею ефективності конвективного сушіння (за нормального атмосферного тиску). У той час для фільтраційного сушіння за умови підвищеного тиску, як зазначено вище, це основний робочий режим. Продуктивність за вологою, яка випаровувалася, для обох сушарок приймалася однаковою, як і температура сушильного агента.

Як відомо, температура під час адіабатичного процесу стиску в компресорі пов'язана з тиском у такий спосіб:

$$t_1 = (t_0 + 273) \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 273, \quad (1)$$

де t_0, t_1 – температура на вході й виході з компресора, °С; p_0, p_1 – тиск на вході й виході з компресора, Па; γ – показник адіабати для повітря ($\gamma=1,4$).

Розрахунок за цією формулою показує, що за умови збільшення тиску від 0,15 до 4 МПа температура на виході з компресора збільшується від 60 до 160° С (реально процес у компресорі є політропним і $\gamma=1,4$ відповідно температура на виході трохи менша).

У розрахунках приймалося, що для конвективного сушіння калорифер повинен нагрівати повітря до температури t_1 за нормального атмосферного тиску. У фільтраційному сушінні температура забезпечується стисненням у компресорі до відповідного тиску p_1 .

Для розрахунків параметрів стану вологого повітря використовувалися класичні рівняння:

$$\varphi = \frac{p}{p_h(t)} \cdot \frac{d}{0.622 + d}, \quad (2)$$

$$d = 0.622 \varphi \frac{p_h(t)}{p - \varphi p_h(t)}, \quad (3)$$

$$\rho = 2.17 \frac{p \cdot 10^{-3}}{t + 273} \cdot \frac{1 + d}{0.622 + d}, \quad (4)$$

$$\nu = 0.461 \frac{t + 273}{p \cdot 10^{-3}} (0.622 + d), \quad (5)$$

$$I = 10^3 [t + d(2500 + 1.875t)], \quad (6)$$

$$C = 1000 + 1875d, \quad (7)$$

де φ – відносна вологість повітря;

d – вологовміст повітря, кг пари/кг сух. повітря;

ρ – щільність повітря, кг/м³;

ν – питомий об'єм повітря, м³/кг;

I – ентальпія повітря, Дж/кг;

Z – питома теплоємність повітря, Дж/кг;

p – тиск, Па;

p_h – тиск насичених пар води, Па;

t – температура, 3° С;

Витрата повітря на процес сушіння розраховувалася в такий спосіб:

$$L = \frac{\Delta m}{\Delta \tau} \frac{\nu}{d_2 - d_0}, \quad (8)$$

де L – витрата повітря в сушарці, м³/з;

$\Delta m/\Delta \tau$ – швидкість сушіння, кг/з;

d_0, d_2 – вологовміст повітря на вході й виході із сушарки.

Параметри повітря на виході сушарки визначалися для ізоентальпійного процесу сушіння:

$$I(t_1, d_0) = I(t_2, d_2), \quad (9)$$

де t_1, t_2 – температура на вході й виході із сушарки.

Потужність, затрачена на процес сушіння для конвективного сушіння, розраховувалася за рівнянням (10):

$$P_{\text{конв}} = k_{\text{вент}} L \rho C (t_1 - t_0) , \quad (10)$$

де $P_{\text{конв}}$ – потужність, затрачена на процес сушіння, Вт;

$k_{\text{вент}}$ – коефіцієнт, що враховує потужність вентилятора сушарки (приймався $k_{\text{вент}}=1,1$).

Потужність, затрачена на процес фільтраційного сушіння під дією підвищеного тиску, розраховувалася виходячи з роботи в адиабатному процесі стиску в компресорі:

$$P_{\text{фільт}} = \frac{P_0 L}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] , \quad (11)$$

де $P_{\text{фільт}}$ – потужність, затрачена на процес фільтраційного сушіння в ТМОМ, Вт.

Параметри навколишнього повітря приймалися рівними $t_0=20^\circ\text{C}$; $d_0= 0,01$ кг/кг. Розрахунки за рівняннями (1–11) проводилися в пакеті Mathcad, для цього використовувались дані про тиск насичених парів води. Результати моделювання наведено на рис. 2, 3.

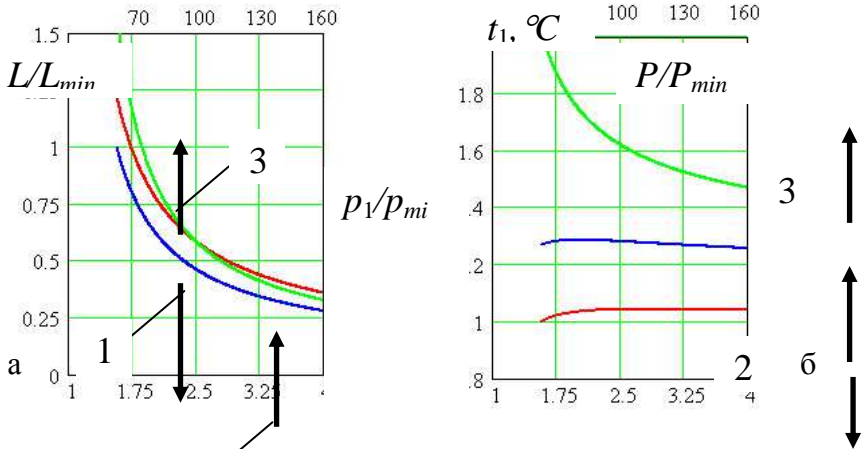


Рис. 2, 3. Відносні витрати: а – сушильного агента; б – потужності: 1 – фільтраційне сушіння в ТМОМ; 2 – конвективна сушарка $\phi_2=1$; 3 – конвективна сушарка $\phi_2=0,4$

Значення витрати сушильного агента й потужності, витраченої на сушіння, наведено у відносних одиницях, оскільки їхні абсолютні значення прямо пропорційні швидкості сушіння $\Delta m/\Delta \tau$. За мінімальні значення відповідних показників L , P прийняті їхні величини за мінімальних значень температури й тиску ($t_1=60^\circ\text{C}$; $p_{\min}=0,1\text{МПа}$). Зокрема, мінімальній витраті сушильного агента відповідає конвективна сушарка у всьому діапазоні температур при $\varphi_2=1$, що на 25...27% менше, ніж під час фільтраційного сушіння в ТМОМ. Це викликано тим, що з підвищенням тиску вологовміст повітря на лінії насичення зменшується відповідно до рівняння (2) і, як наслідок, зменшується поглинаюча здатність сушильного агента ($d \cdot 2^{-d_0}$), а відповідно й величина L . Проте при режимі конвективного сушіння $\varphi_2=0,4$, що використовується зазвичай, значення витрати сушильного агента під час конвективного й фільтраційного сушіння в ТМОМ однакові за величиною.

Розрахунок витраченої потужності (рис. 3) показує, що енергоефективність процесу фільтраційного сушіння в ТМОМ на 22...24% вища, ніж для конвективного сушіння при $\varphi_2=1$ і на 45...85% вища, ніж для конвективного сушіння при $\varphi_2=0,4$. Це викликано тим, що хоча й витрачена потужність прямо пропорційна витраті, наведеній у формулах (10, 11), проте для конвективного сушіння потужність прямо пропорційна різниці температур ($t \cdot I_{-10}$), тоді як для фільтраційного сушіння в ТМОМ залежність від тиску статична з показником $(\gamma-1/\gamma)=0,27$.

Збільшення тиску нагнітання більше на 0,25 Мпа не приводить до підвищення енергоефективності процесу (крива 1, рис. 3). Слід також зазначити, що в цих розрахунках не враховано частку вологи, що відділяється з вологого матеріалу без фазового переходу під дією надлишкового тиску. Частка такої вільної вологи може становити від 25 до 50%, а отже, на цю величину зменшуються енерговитрати для процесу фільтраційного сушіння в ТМОМ.

Висновки. Таким чином, проведені теоретичні дослідження дозволяють зробити такі висновки:

1. Перспективним напрямом підвищення енергоефективності процесу сушіння в тепломасообмінних модулях є застосування фільтрації сушильного агента під дією підвищеного тиску.

2. Витрата сушильного агента за рівної продуктивності по випарованій волозі однакова для типового режиму конвективного ($t_1=60...160^\circ\text{C}$, $\varphi_2=0,4$) і фільтраційного сушіння в ТМОМ під дією підвищеного тиску ($p_1=0,15...0,4\text{ МПа}$).

3. Величина енерговитрат для конвективного сушіння за $t_1=60\dots 160^\circ\text{C}$ $\varphi_2=0,4$ на 45...85% вища, ніж для фільтраційного сушіння в ТМОМ за однакової продуктивності за випарованою вологою.

4. Область раціональних тисків нагнітання компресора лежить у діапазоні 0,15...0,25 МПа. За умови подальшого підвищення тиску зниження енерговитрат відсутні.

Список джерел інформації /References

1. Kudra, T. (2004), Energy aspects in drying, *Drying Technology*, Vol. 22, No5, - p. 917-932.

2. Данилов І. Економія енергії при тепловому сушінні / І. Данилов, Б. Леончик. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.

Danilov, I., Leonchik B. (1986), “*Lecanora energy in thermal drying*” [*Jekonomija jenerгии pri teplovoj sushke*], *Energoatomizdat, Moscow*, 136 p.

3. Потапов В. О. Дослідження процесу сушіння у масообмінних модулях під дією підвищеного тиску / В. О Потапов, О. Ю.Гриценко, Ю. О.Пономаренко // Прогресивна техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі : зб. наук. пр. – Х. :ХДУХТ, 2013. – с. 148–153.

Potapov, V.A., Gritsenko, O.Yu., Ponomarenko, Yu.O. (2013), “*Research of process of drying in exchanging modules under the action of high pressure*”, *Progressive techniques and technologies of food production in the restaurant industry and trade : the CG. Sciences. other Agricultural : KSUFT*, [“*Doslidzhennja procesu sushinnja u masoobminnih moduljah pid dieju pidvishhenogo tisku*”, *Progresivna tehnika ta tehnologii harchovih virobniectv restorannogo gospodarstva i torgivli*], Н. :НДУХТ, pp. 148-153.

4. Погожих М. І. Технологія сушіння харчової сировини : навч. посібник / М. І. Погожих, В. О. Потапов, М. М. Цуркан. – Х. : ХДУХТ, 2008. – 229 с.

Pogozhii, M.I., Potapov, V.O., Curkan, M.M. (2008), “*Technology of drying of food raw material*”, *train aid* [“*Tehnologija sushinnja harchovoi sirovini*], *HDUHT*, Н, 229 p.

5. Термодинамічні властивості й процеси вологого повітря / В. С. Белоусов [та ін.], Єкатеринбург : ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2005. – 20 с.

Belousov, V.S., Nejskaja, S.A., Shirjaeva, N.P., Jasnikov, G.P., (2005), “*Thermodynamic properties and processes of moist air*” [“*Termodinamichni vlastivosti j procesi vologogo povitrya*”], *GOU VPO USTU - UPU, Yekaterinburg*, 20 p.

Потапов Володимир Олексійович, д-р техн. наук, проф., каф. холодильної та торговельної техніки, Харківський держаний університет харчування та торгівлі. Адреса вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел. 8-057-349-45-88; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

Потапов Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, проф., каф. холодильной и торговой техники, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес ул. Клочковская, 333, м. Харьков, Украина, 61051. Тел. 8-057-349-45-88; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

Volodymyr O. Potapov, Doctor Of Science (Tech.), Professor, Refrigeration and Trade Equipment Department, Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Refrigeration and Trade Equipment Department. Address: 333, Klochkivska St., Kharkiv, Ukraine 61051. Tel+38 057 3494588; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

Гриценко Олег Юрійович, асп, кафедри холодильної та торговельної техніки, Харківський держаний університет харчування та торгівлі. Адреса вул. Клочківська, 333, м. Харків, Україна, 61051. Тел. 8-057-349-45-88; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

Гриценко Олег Юрьевич, асп, кафедры холодильной и торговой техники, Харьковский государственный университет питания и торговли. Адрес ул. Клочковская, 333, м. Харьков, Украина, 61051. Тел. 8-057-349-45-88; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

Oleg Yu. Gritsenko, Postgraduate student, Engineer Refrigeration and Trade Equipment Department. Kharkiv State University of Food Technology and Trade. Address: 333, Klochkivska St., Kharkiv, Ukraine 61051. Tel+38 057 3494588; e-mail: htt_hduht@mail.ru.

*Рекомендовано до публікації д-ром техн. наук, проф. В.М. Михайловим.
Отримано 15.03.2014. ХДУХТ, Харків.*