

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ОСНОВНИХ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ЕКСЕРГЕТИЧНИЙ ККД КОНВЕКТИВНОЇ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ

¹Вінницький національний технічний університет

Запропоновано математичну модель для числового дослідження ексергетичних втрат в камерній конвективній сушильній установці та визначення впливу основних режимних параметрів під час конвективного сушіння на ексергетичний коефіцієнт корисної дії конвективної сушильної установки. Математична модель реалізована в середовищі MathCad. Як об'єкт дослідження вибрано камерну сушарку СКРР-400 періодичної дії для сушіння сільськогосподарської продукції з разовим завантаженням 400 кг.

Визначено такі складові ексергетичних втрат, які найбільше впливають на термодинамічну досконалість сушильної установки і зазначено шляхи для зменшення їхньої відносної ваги в ексергетичному балансі. Виконано числові дослідження впливу на ексергетичний коефіцієнт корисної дії сушарки таких параметрів як: температура навколишнього середовища, температура теплоносія на вході в сушильну установку, температура теплоносія на виході з сушильної установки — відпрацьованого теплоносія, температура конденсату пари в калорифері. За результатами числового експерименту встановлено, що зі зростанням початкової температури повітря корисні затрати питомої ексергії на випаровування вологи зменшуються, а зміна видатності сушарки на загальні ексергетичні втрати не впливає.

Встановлено, що енергетичний або тепловий і ексергетичний ККД сушарки суттєво відрізняються. За розрахунками ексергетичний ККД камерної сушарки, який відображає її термодинамічну досконалість не перевищує 14,5%. Порівняння ексергетичного ККД з енергетичним або тепловим ККД сушарки СКРР-400 показало, що тепловий ККД сушарки значно вищий (50,4% проти 14,5%). Висунуто гіпотезу, що це викликано тим, що тепловий ККД не враховує явищ незворотності процесів тепло- і масообміну.

Встановлено, що втрати з відпрацьованим теплоносієм в ексергетичному балансі складають 8%, а в тепловому — 33,2%. За результатами проведеного числового експерименту показано, що підвищення ефективності сушильних установок можна досягти за рахунок вдосконалення їхніх нагрівальних пристроїв і зниження в них втрат.

Ключові слова: сушіння, сушарка, ексергія, ексергетичний коефіцієнт корисної дії, тепловий баланс.

Вступ

Процес сушіння, тобто видалення вологи з поверхні, а також із внутрішніх шарів різних речовин і матеріалів можна віднести до найпоширеніших процесів в технологіях промисловості та сільськогосподарства. Під час сушіння (зневоднення) в матеріалі можуть відбуватися структурно-механічні, реологічні, хімічні, біохімічні та інші зміни, що сприяють зміні зовнішніх та внутрішніх властивостей матеріалів. Саме сушіння відноситься до тих технологічних процесів, які найпростіше реалізувати і одним із самих енергозатратних, тому основним завданням в процесі конструювання нової сушильної техніки і модернізації старої є зменшення енергетичних втрат сушильною установкою [1].

Відповідно до можливості використання, енергію можна розділити на два види:

- впорядкована, чи організована енергія, яку можна повністю перетворити в інший вид енергії;
- неупорядкована енергія, яка не може бути повністю перетворена на інший вид, а можливість перетворення визначається її характеристиками та параметрами навколишнього середовища.

Відповідно до закону збереження енергії впорядкована та неупорядкована енергії рівноцінні. Але у відповідності до другого закону термодинаміки під час будь-якого незворотного процесу відбувається зниження якості енергії і зростає ентропія системи [2].

Для неупорядкованої енергії максимально можлива робота може бути отримана під час переходу системи у стан рівноваги з довкіллям. Така робота називається ексергією. У стані рівноваги з довкіллям система роботу виконувати не може і її енергетична цінність та ексергія дорівнюють нулю [3]. Введення поняття «ексергія» дозволяє зробити єдине оцінювання енергії різного виду шляхом її переведення в безентропійну величину, оскільки тільки енергія, яка не переходить в ентропію є корисною, тобто може бути отримана з вихідної у оборотному процесі.

Метою роботи є дослідження впливу основних режимних параметрів процесу сушіння на втрати ексергії та ексергетичний ККД конвективної сушильної установки.

Результати дослідження

Математична модель містить 23 лінійних рівняння. Така модель є детермінованою, відносно розмірності простору — одновимірною, статичною, структурно-функціональною, відносно зміни параметрів модель є дискретною. Модель є оптимізаційною, критерієм оптимізації є тепловологісні параметри процесу сушіння для зниження ексергетичних втрат.

Прихід ексергії палива, кВт

$$E_t = G_t \cdot e_0, \quad (1)$$

де e_0 — питома ексергія палива, кДж/кг; G_t — витрата палива, кг/с.

У розрахунку на 1 кг випарованої вологи

$$e_{it} = \frac{G_t \cdot e_0}{W}, \quad (2)$$

де W — кількість випарованої вологи за одиницю часу, кг/с.

Питома ексергія продуктів згорання

$$e_{pc} = e_t + e_p + e_0, \quad (3)$$

де $e_t = Cp_{nc}(t - t_0) - T_0 Cp_{nc} \cdot \ln \frac{T}{T_0}$; $e_p = T_0 R_{nc} \cdot \ln \frac{P}{P_0}$; e_0 , e_t — хімічна і термічна складові ексергії

продуктів згорання, кДж/кг; e_p — ексергія, що виникає через різницю тисків продуктів згорання і тиску навколишнього середовища; Cp_{nc} — середня ізобарна теплоємність димових газів (продуктів згорання), кДж/(кг·К); R_{nc} — газова стала продуктів згорання, кДж/(кг·К).

Ексергетичні втрати під час горіння палива

$$\Delta E_r = E_t - e_{pc} G_{vg} = E_t - E_r, \quad (4)$$

де G_{vg} — витрата відхідних газів, кг/с.

Ексергію теплоносія на виході з сушильної камери визначають як ексергію вологого повітря, при цьому ексергію вологи, яка випаровувалася з матеріалу, не враховують

$$E''_{ca} = L'_{ca} e''_{ca} (1 + k), \quad (5)$$

де L'_{ca} — витрата теплоносія на вході, кг/с; e'_{ca} — питома ексергія теплоносія на виході з сушарки без урахування випареної вологи, кДж/кг; k — коефіцієнт, який враховує підсос повітря в сушильну камеру.

У розрахунку на 1 кг випареної вологи, значення E_r відносять до різниці вологовмісту продуктів згорання на вході і виході з сушарки ($d'' - d'$).

Ексергетичні втрати при змішуванні продуктів згорання з повітрям

$$\Delta E_{cp} = E_r - L'_{ca} e'_{ca} = E_r - E'_{ca}, \quad (6)$$

де E'_{ca} — ексергія сушильного агента на вході в сушильну камеру.

Приріст ексергії повітря у вентиляторі

$$E_{vn} = N \eta, \quad (7)$$

де η — ККД вентилятора; N — потужність яку споживає вентилятор, кВт.

Цю ексергію можна розрахувати як роботу під час ізотермічного розширення стисненого повітря

$$E_{vn} = L_n T_0 R_n \ln \frac{p}{p_0}, \quad (8)$$

де p — тиск повітря після вентилятора, Па; L_n — масова витрата повітря, кг/с; p_0 — атмосферний тиск, Па;

Під час нагрівання вологого матеріалу ексергетичні втрати на нагрівання вологи в ньому

$$e_{vln} = h_{vl} - h'_{vl} - T_0 (s_{vl} - s'_{vl}) = C_{p_{vl}} (T_n - T_0) - T_0 C_{p_{vl}} \cdot \ln \frac{T_n}{T_0}, \quad (9)$$

де h_{vl} , h'_{vl} — ентальпія вологи в стані насичення за температури мокрого термометра та на вході в сушарку відповідно, кДж/кг; s_{vl} , s'_{vl} — ентропія вологи в стані насичення за температури мокрого термометра та на вході в сушарку відповідно, кДж/(кг·К); T_n — температура адиабатного насичення, К.

Корисна витрата ексергії на випаровування вологи:

$$\text{— питома, кДж/кг} \quad \Delta e_{vp} = h_n - h_{vl} - T_0 (s_n - s_{vl}) + a_{sn}, \quad (10)$$

$$\text{— загальна, кВт} \quad \Delta E_{vp} = \Delta e_{vp} W, \quad (11)$$

де h_n , s_n — ентальпія і ентропія пари в стані насичення за температури T_n ; a_{sn} — робота, витрачена на розрив зв'язку вологи з матеріалом.

Питомі ексергетичні втрати на перегрів пари з сировини до температури теплоносія на виході з сушильної камери

$$\Delta e_{vp} = h_{pp} - h_p - T_0 (s_{pp} - s_p), \quad (12)$$

де h_{pp} , s_{pp} — відповідно ентальпія і ентропія пари за температури теплоносія на виході з сушильної камери.

Якщо парціальний тиск пари невисокий, то

$$\Delta e_{vp} = C_{p_p} (T'' - T_n) - T_0 C_{p_p} \cdot \ln \frac{T''}{T_n}, \quad (13)$$

тоді ексергетичні втрати на нагрівання вологи і перегрівання пари

$$\Delta E_{vl} = (\Delta e_{vn} + \Delta e_{vp}) W. \quad (14)$$

Ексергетичні втрати у разі змішування випарованої вологи з сушильним агентом

$$\Delta E_{cmv} = T_0 \Delta s_{cm} L'_{ca} (1 + d''), \quad (15)$$

де d'' — вологовміст теплоносія на виході з сушарки, кг/кг; Δs_{cm} — зміна ентропії у разі змішування випарованої вологи з сушильним агентом, кДж/(кг·К).

Питомий приріст ентропії суміші ідеальних газів

$$\Delta s_{cm} = R \left(\frac{m_{ca}}{M_{ca}} \ln \frac{M_{ca}}{m_{ca} M_{cm}} + \frac{m_p}{M_p} \ln \frac{M_p}{m_p M_{cm}} \right), \quad (16)$$

де m_{ca} , M_{ca} — масова частка і молярна маса сушильного агента відповідно; m_p , M_p — масова частка і молярна маса пари відповідно.

Приріст термічної ексергії матеріалу

$$\Delta E_m = G'' \left[c_m (\theta'' - \theta') - T_0 c_m \ln \frac{\theta''}{\theta'} \right], \quad (17)$$

де G'' — продуктивність установки за висушеним матеріалом, кг/с; c_m — теплоємність висушеного матеріалу, кДж/(кг·К); θ'' , θ' — температура самого матеріалу до і після сушіння, К.

Ексергетичні втрати, зумовлені необоротністю внутрішнього масоперенесення, можуть бути визначені методами термодинаміки незворотних процесів [4]. Ці втрати невеликі і зростають з підвищенням рушійних сил переносу, можуть бути відчутними переважно в високотемпературних процесах. Ексергетичні втрати від незворотності зовнішнього теплообміну більші. Проте, їхній розрахунок досить складний, тому ці втрати визначимо як різницю між ексергією теплоносія на вході в сушильну (робочу) камеру і сумою всіх витрат ексергії.

Ексергетичні втрати внаслідок гідравлічного опору

$$\Delta E_g = R_{ca} T_0 \cdot \ln \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right) L_{ca}, \quad (18)$$

де p — тиск на виході з сушарки, Па; Δp — гідравлічний опір сушарки, Па, R_{ca} — газова стала повітря, кДж/(кг·К).

Втрати ексергії в навколишнє середовище

$$\Delta E_{nc} = Q_{nc} \left(1 - \frac{T_0}{T} \right), \quad (19)$$

де Q_{nc} — теплота, втрачена в навколишнє середовище через теплову ізоляцію, кВт.

Питома ексергія відхідних газів з урахуванням вологи, що випарувалася в сушильній камері

$$e_{vh} = h'' - h_0 - T_0 (s'' - s_0). \quad (20)$$

В розрахунок застосуємо наближену формулу

$$e_{vh} = C p_{vp}'' (T'' - T_0) - T_0 \left[C p_{vp}'' \cdot \ln \frac{T''}{T_0} - R_p (d'' - d_0) \right], \quad (21)$$

де R_p — газова стала водяної пари, кДж/(кг·К).

Ексергія відхідних газів

$$E_{vh} = e_{vh} \cdot G_{vg}. \quad (22)$$

З вищезазначеного випливає, що ексергетичний баланс сушильної установки можна записати в такому вигляді:

$$E_t + E_{vn} + E_{dod} = E_{ca}'' + \Delta E_r + \Delta E_{cp} + \Delta E_{vln} + \Delta E_{vp} + \Delta E_{vpr} + \Delta E_m + \Delta E_{vl} + \Delta E_{cmv} + \Delta E_g + \Delta E_{nc} + \Delta E_{vh} \quad (23)$$

за умови, що $E_{dod} = 0$ (прихід ексергії від додаткових джерел в сушарці).

Математична модель, реалізована в середовищі MathCad. Подамо результати проведених числових експериментів.

Досліджувався вплив таких параметрів на основні складові ексергетичного балансу:

- температури навколишнього середовища;
- температури сушильного агента (теплоносія) на вході і виході з робочої камери;
- температури конденсату нагрівальної пари;
- продуктивності сушарки.

На рис. 1 показана графічна залежність ексергетичного ККД сушарки від зміни температури навколишнього середовища для реальних погодних умов. З ростом температури навколишнього середовища, ексергетичний ККД зменшується, оскільки зменшується різниця температур.

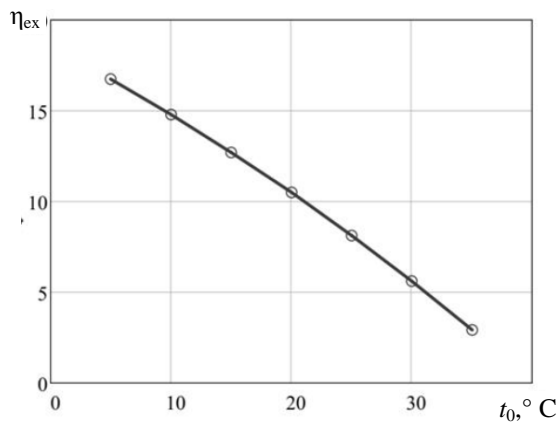


Рис. 1. Зміна ексергетичного ККД від температури навколишнього середовища

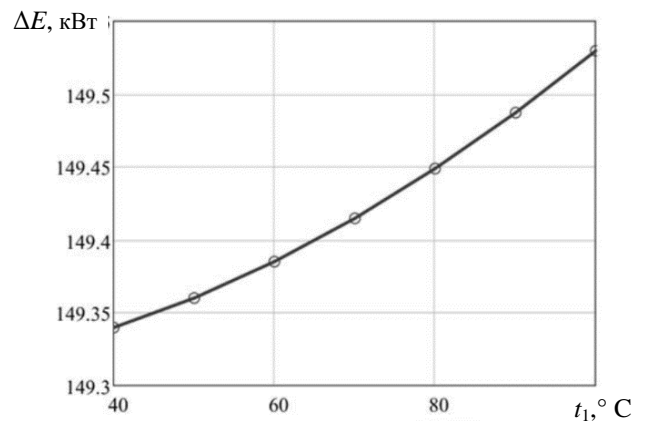


Рис. 2. Зміна ексергетичних втрат зі зростанням температури теплоносія

На рис. 2 показано зміну втрат ексергії зі зростанням температури сушильного агента, що пода-

ється в сушильну камеру після підігрівання в калориферах. З графіка випливає, що зі збільшенням значення температури теплоносія втрати ексергії зростають за гіперболічним законом.

На рис. 3 показано зміну ексергетичних втрат зі зростанням температури відпрацьованого теплоносія. Залежність є обернено пропорційною до залежності, яка показана на рис. 2.

На рис. 4 проілюстровано вплив видатності сушарки на втрати ексергії в сушарці. Із залежності видно, що видатність сушарки практично не впливає на ексергетичні втрати.

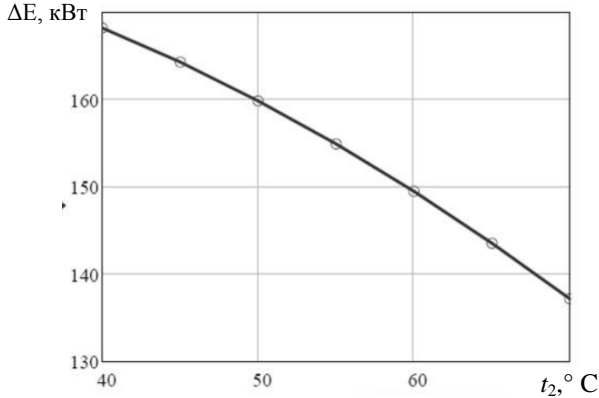


Рис. 3. Зміна ексергетичних втрат зі зростанням температури відпрацьованого теплоносія

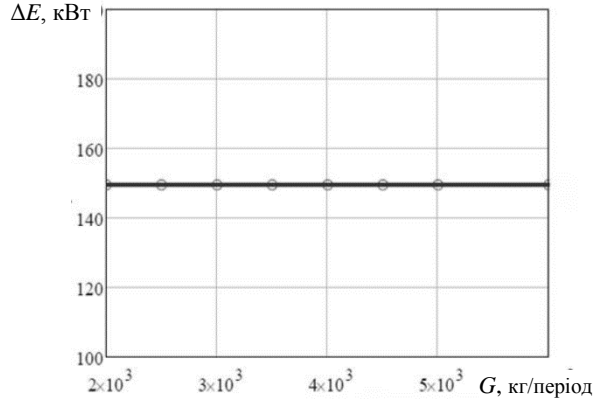


Рис. 4. Вплив продуктивності сушарки на загальні втрати ексергії

На рис. 5 показана залежність ексергетичного ККД камерної конвективної сушильної установки від температури конденсату пари, у випадку використання парових калориферів в якості джерела теплоти в сушарці. Взаємозалежності температури навколишнього середовища, ексергетичних втрат та корисних ексергетичних витрат на випаровування вологи в сушарці показані на рис. 6.

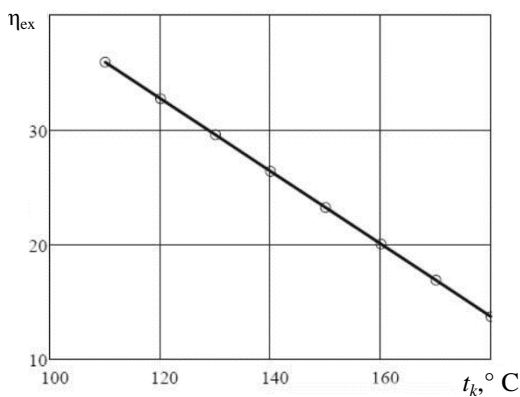


Рис. 5. Вплив температури конденсату грійної пари на ексергетичний ККД

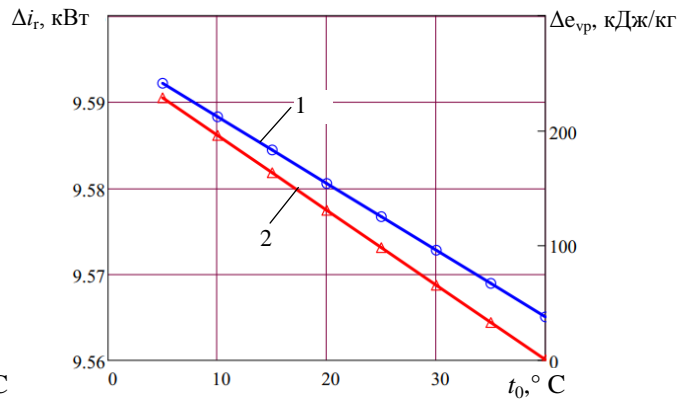


Рис. 6. Вплив початкової температури повітря на ексергетичні втрати в калорифері (1) та корисні затрати ексергії на випаровування вологи (2)

З рис. 5 видно, що ексергетичний ККД залежить від температури конденсату пари прямопропорційно та зменшується зі збільшенням його температури в досить широких межах. Так, для температури конденсату 100°C ексергетичний ККД становить 37 %, а для температури 180°C зменшується до 14 %. З графічних залежностей (рис. 6) видно, що ексергетичні втрати збільшуються зі зростанням температури навколишнього середовища.

Висновки

Аналіз ексергетичного балансу камерної сушильної установки показує, що корисні витрати ексергії на випаровування вологи відносно малі і складають 14,5 %. Найбільші ексергетичні втрати відбуваються в паровому калорифері (у випадку його застосування) і досягають 50,4 %. Зменшити ексергетичні втрати в калорифері можна через зменшення тиску нагрівальної пари. Слід зазначити, що втрати з відпрацьованим теплоносієм в ексергетичному балансі становлять 8 %, а в тепловому — 33,2 %.

Такі порівняно малі ексергетичні втрати з відпрацьованим теплоносієм можна пояснити його низьким тепловим потенціалом. Як видно, втрати ексергії на нагрів матеріалу складають 0,12 %, перегрів транзитної вологи (тієї, що надходить в сушарку зі свіжим повітрям) — 0,25 %, а на нагрів вологи в сировині — 46 %.

Суттєво відрізняються енергетичний (тепловий) і ексергетичний ККД. Енергетичний ККД, визначений з теплового балансу сушарки, дорівнює 50,4 %, а ексергетичний, який відображає термодинамічну досконалість установки, становить 14,5 %. Це можна пояснити тим, що тепловий ККД не враховує незворотність процесів тепло- і масообміну під час сушіння.

В результаті роботи і проведення числового експерименту з використанням запропонованої математичної моделі можна зробити висновок, що підвищення ефективності сушильних установок можна досягти за рахунок вдосконалення їхніх нагрівальних пристроїв і зниження втрат в них.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. Й. Ткаченко, і О. Ю. Співак, *Сушильні процеси та установки*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2008, 98 с.
- [2] Rant Zoran, *Termodinamika: knjiga za uk in prakso*. Ljubljana, Slovenija: Fakulteta za strojništvo, 2000, 644 s.
- [3] *Эксергетические расчеты технических систем*, справ. пос., А. А. Долинский и В. М. Бродянский, Ред. Киев, Украина: Наукова думка, 1991, 361 с.
- [4] В. О. Тарасова, «Розвиток теорії та методів термoeкономічного аналізу, синтезу, оптимізації інноваційних систем термотрансформації.» дис. д-ра техн. наук, 05.14.06. Харків, 2019, 410 с.

Рекомендована кафедрою теплоенергетики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 07.02.2023

Співак Олександр Юрійович — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: spivak000@gmail.com ;

Резидент Наталія Володимирівна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики, e-mail: rezidentnv1@ukr.net .

Вінницький національний технічний університет, Вінниця

O. Yu. Spivak¹
N. V. Rezydent¹

Studies of the Main Mode Parameters Impact on Exergetic Efficiency of the Convective Dryer

¹Vinnitsia National Technical University

Mathematical model is proposed for the numerical study of exergy losses in a chamber convective drying unit and the determination of the impact of the main mode parameters during convective drying on the exergy coefficient of the useful effect of the convective drying unit. The mathematical model is implemented in the MathCad environment. The SKRR-400 intermittent chamber dryer for drying agricultural products with a one-time load of 400 kg was chosen as the object of the study.

The components of exergy losses, which have the greatest influence on the thermodynamic perfection of the drying plant, are determined, and the ways of reducing their specific weight in the exergy balance are indicated. Numerical studies of the effect on the exergetic efficiency coefficient of the dryer of such parameters as the ambient temperature, the temperature of the coolant at the entrance to the drying installation, the temperature of the coolant at the outlet of the drying installation — spent coolant, the temperature of the steam condensate in the heater have been carried out. A numerical experiment showed that with the increase in the initial air temperature, the useful specific exergy consumption for moisture evaporation decreases and the change the prominence of the dryer performance does not affect the total exergy losses.

It is established that the energy or exergetic and thermal efficiency factors of the dryer differ significantly. According to the calculations, the exergetic efficiency of the chamber dryer, which reflects its thermodynamic perfection, does not exceed 14.5%. Comparison of exergetic efficiency with the energy or thermal efficiency of SKRR-400 type dryer showed that the thermal efficiency of dryers is significantly higher (50.4% versus 14.5%). It is hypothesized that this is due to the fact that thermal efficiency does not take into account the phenomena of irreversibility of heat and mass transfer processes.

It was established that losses with waste coolant in the exergy balance make up 8%, and in the thermal balance — 33.2%. According to the results of the numerical experiment, it is shown that increasing the efficiency of drying units can be achieved by improving their heating devices and reducing their losses.

Keywords: drying, dryer, exergy, exergy coefficient of the useful effect, heat balance.

Spivak Oleksandr Yu. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: spivak000@gmail.com ;

Rezydent Nataliia V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Thermal Power Engineering, e-mail: rezidentnv1@ukr.net