

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ЕКОЛОГІЯ

О. С. Івашук, В. М. Атаманюк, Р. А. Чижович, С. А. Барабах

Національний університет "Львівська політехніка",

кафедра хімічної інженерії

oleksandr.s.ivashchuk@lpnu.ua

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ЯЧМІННОЇ ПИВНОЇ ДРОБИНИ

<https://doi.org/10.23939/ctas2024.01.183>

У роботі виконано розрахунок питомих енергетичних витрат для проведення процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини. Визначено, що найнижчі сумарні затрати енергії на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини від початкової вологості матеріалу $\omega_1 = 77,88$ % (мас.) до кінцевого значення $\omega_2 = 10$ % (мас.) становлять 14898,087 кДж/кг H_2O або 4,138 кВт/кг H_2O для таких параметрів процесу: висоти шару осушуваного матеріалу $H = 120$ мм, температури теплового агенту $T = 90$ °С, швидкості теплового агенту $v_0 = 1,81$ м/с. Визначення технологічно доцільних параметрів процесу, за яких можливі найменші енергетичні витрати на осушення матеріалу, важливі для проєктування сушильного обладнання.

Ключові слова: сушіння; фільтраційне сушіння; пивна дробина; біомаса; розрахунок; оптимальні параметри.

Вступ

Екологічна ситуація у всьому світі постійно погіршується через збільшення потреб світової популяції людей, яка зростає. Це призводить до численних проблем, які потребують постійної уваги: дефіцит природних ресурсів, надмірне накопичення вторинної сировини та відходів виробництва, збільшення рівня забруднення довкілля через викиди шкідливих речовин тощо.

Однією із актуальних проблем, яка безпосередньо впливає на екологічну ситуацію, є нагромадження великих обсягів промислової вторинної сировини, що часто непридатна для тривалого зберігання, зважаючи на високу вологість побічного продукту (± 70 %), і стає джерелом забруднення довкілля [1, 2]. Одним із таких високовологих відходів виробництва є пивна дробина, що утворюється під час фільтрування пивного суслу від твердих частинок зерна – невикористані залишки процесу виробництва пива, із характерним запахом, які складаються переважно з лущиння ячменю та інших рослинних залишків. Склад цих відходів може змінюватися за-

лежно від різноманітних факторів, наприклад, типу використаного ячменю та умов його вирощування [3].

Зважаючи на те, що пивна дробина становить близько 85 % від усієї кількості відходів, що утворюються в пивоварній промисловості [4], надзвичайно важливо досліджувати її характеристики та можливості повторного використання. Відомо, що пивна дробина набула поширення у різних сферах, зокрема в харчовій промисловості [4, 5], а також як кормова добавка для тварин [6, 7]. Крім того, її можна використовувати як добриво для сільськогосподарських угідь [8], для промислового виробництва біогазу [9] або для отримання альтернативного твердого палива [10].

Згадані напрями можливого застосування пивної дробини потребують її попереднього осушення для забезпечення технологічних параметрів її використання, а також продовження терміну придатності матеріалу. У промисловості широко використовують сушарки барабанного типу для осушення рослинної біомаси [11, 12].

Однак ці сушарки мають недоліки, такі як значна тривалість процесу, великі розміри установки, потреба у додатковому обладнанні для очищення відпрацьованого теплового агента та високі втрати тепла у довкілля. Тому для стадії зневоднення пивної дробини доцільно використовувати метод фільтраційного сушіння, який має переваги порівняно із іншими поширеними способами осушення – економічними, зокрема [13, 14].

Пошук оптимальних параметрів сушіння пивної дробини важливий із міркувань ефективності та економічної вигоди [15]. До регульованих параметрів фільтраційного сушіння насамперед належать висота шару осушувачого матеріалу, температура та швидкість теплового агента. Встановлення оптимальних параметрів сушіння дає змогу досягти найменших затрат на видалення вологи із дробини, забезпечуючи збереження корисних властивостей матеріалу та прийнятну ціну отриманої осушеної сировини. Отже, пошук оптимальних параметрів сушіння є важливим етапом для проектування сушильного обладнання – для подальшого вторинного застосування пивної дробини, що допомагає забезпечити раціональне використання ресурсів та збереження навколишнього середовища.

Метою роботи був розрахунок та вибір технологічно доцільних параметрів для процесу осушення ячмінної пивної дробини, отриманої на технологічній лінії пивоварні “Кумпель” (Україна, Львів) [10], за допомогою методу фільтраційного сушіння, з огляду на одержані експериментальні дані.

Матеріали та методи досліджень

Експериментальні дослідження осушення ячмінної пивної дробини фільтраційним методом виконано на лабораторній установці, детально описаній у [13]. Для розміщення осушувачого матеріалу використано циліндричний контейнер із термоізолювальною вставкою [16].

Виконано три серії дослідів із зміною одного із параметрів стаціонарного шару та теплового агента: за різних висот вологого матеріалу H (40 мм, 80 мм, 120 мм, 160 мм), різних температур теплового агента T (50 °C, 70 °C, 80 °C, 90 °C) та фіктивних швидкостей руху теплового агента крізь стаціонарний шар матеріалу v_0 (1,26 м/с, 1,81 м/с, 2,31 м/с, 2,82 м/с). Один із дослі-

джуваних параметрів (H , T або v_0) змінювали у кожній із серій дослідів, інші два залишались незмінними. Детальний опис методики виконання експериментів та супутніх вимірювань наведено також у роботі [13].

Для визначення часу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини використано експериментально розраховані залежності, що описують тривалість процесу в обох умовних періодах сушіння – повного насичення теплового агента вологою (перший умовний період сушіння) та часткового насичення теплового агента вологою (другий умовний період сушіння) [17]:

$$\tau_I = \frac{1 - w_0^c}{7.093 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1.781} \cdot v_0^{0.765} \cdot e^{-12.136H}} \quad (1)$$

$$\tau_{II} = \frac{0.596 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) \cdot \ln\left(\frac{w^c - w_0^c}{w_{cr}^c - w_0^c}\right)}{0.596 \cdot N} \quad (2)$$

де w^c , w_0^c , w_{cr}^c , w_{cr}^c – поточне, початкове, рівноважне значення вологовмісту матеріалу та критичний вологовміст матеріалу закінчення періоду повного насичення теплового агента вологою відповідно, кг H_2O /кг сухого матеріалу; τ – час сушіння, с; τ_{cr} – критичний час досягнення значення вологовмісту w_{cr}^c , с; T – температура теплового агента, °C; H – висота шару матеріалу, м; N – швидкість сушіння у періоді повного насичення теплового агента вологою, кг H_2O / (кг сухого матеріалу · с).

Час сушіння τ визначали за допомогою залежностей (1) та (2). Автори рекомендували для значень вологовмісту $w_{cr}^c < w^c < 0,5$ кг H_2O / кг сухого матеріалу під час розрахунку часу фільтраційного сушіння у другому умовному періоді враховувати додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної вологи за допомогою уточнювального коефіцієнта $0,7 \div 0,9$:

$$\tau = \tau_I + (0,7 \div 0,9) \tau_{II} \quad (3)$$

Осушення розраховано від початкової вологості матеріалу $\omega_1 = 77,88$ % (мас.) до кінцевого значення $\omega_2 = 10$ % (мас.), вибраного як середнє із значень $7 \div 14$ % (мас.), рекомендованих для тривалого зберігання біомаси та формування альтернативного твердого палива [18]. Вологовміст початкового w_0^c та осушеного w^c матеріалу визначали на основі показників вологості:

$$w^c = \frac{\omega}{100 - \omega} \quad (4)$$

Кількість випаруваної вологи W визначали за даними розрахунку матеріального балансу:

$$G_1 = G_2 + W, \quad (5)$$

де G_1, G_2 – початкова та кінцева маса вологого матеріалу, кг; W – кількість випаруваної вологи, кг.

Зважаючи на показники значень вологості матеріалу:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2}, \quad (6)$$

$$W = G_1 - G_2. \quad (7)$$

Результати досліджень та їх обговорення

Щоб знайти оптимальні параметри фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини на лабораторній установці, визначили енергетичні витрати на нагрівання теплового агента, щоб видалити 1 кг вологи з шару матеріалу $Q_{t.a.}^{lab}$, за допомогою видозміненого класичного рівняння [19]:

$$Q_{t.a.}^{lab} = \frac{c_{t.a.} G_{t.a.}^{lab} (T_1 - T_0) \tau}{\eta_{t.a.} W}, \quad (8)$$

де $Q_{t.a.}^{lab}$ – енергетичні витрати на нагрівання теплового агента для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу, кДж/кг H_2O ; $c_{t.a.}$ – теплоємність повітря, становить 1,01 кДж/кг·°C; $G_{t.a.}^{lab}$ – масова витрата теплового агента, кг/с; T_1 – початкова температура теплового агента, °C; T_0 – температура довкілля, $T_0 = 20$ °C; $\eta_{t.a.}$ – коефіцієнт, який враховує втрати тепла у навколишнє середовище, $\eta_{t.a.} = 0,6$.

Також було виконано розрахунок затрат енергії на створення перепаду тисків для видалення 1 кг вологи під час сушіння $Q_{\Delta P}^{lab}$ [20]:

$$Q_{\Delta P}^{lab} = \frac{\Delta P \cdot V_{t.a.}^{lab} \cdot \tau}{\eta_{\Delta P} W \cdot 1000}, \quad (9)$$

де $Q_{\Delta P}^{lab}$ – енергетичні витрати на подолання перепаду тисків для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу, кДж/кг H_2O ; ΔP – втрати тиску в шарі матеріалу, Па; $V_{t.a.}^{lab}$ – об'ємна витрата теплового агента, м³/с; $\eta_{\Delta P}$ – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії, $\eta_{\Delta P} = 0,5$.

Загальні затрати на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини Q^{lab} розраховували за формулою:

$$Q^{lab} = Q_{t.a.}^{lab} + Q_{\Delta P}^{lab}. \quad (10)$$

Експериментальну масову витрату теплового агента $G_{t.a.}^{lab}$ розраховували за рівнянням:

$$G_{t.a.}^{lab} = S \cdot v_0 \cdot \rho_{t.a.}, \quad (11)$$

де S – площа поперечного перерізу циліндра для сушіння, м² [16]; v_0 – фіктивна швидкість теплового агента, м/с; $\rho_{t.a.}$ – густина повітря, кг/м³.

Втрати тиску в шарі матеріалу ΔP визначали за даними попереднього дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння крізь шар ячмінної пивної дробини згідно із рівнянням [16]:

$$\Delta P = 47046,56141 \cdot H \cdot v_0 + 27655,11293 \cdot H \cdot v_0^2. \quad (12)$$

Результати експериментального визначення оптимальних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини наведено у табл. 1 та табл. 2, номери експериментів у цих таблицях збігаються.

Необхідно відзначити хорошу кореляцію одержаних показників розрахованих часу сушіння та втрат тиску в шарі матеріалу (табл. 1) із експериментальними даними [16, 17].

Таблиця 1

Вихідні показники для розрахунку енергетичних витрат для фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини

№	H , м	T_1 , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_1 , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с	
1	0,04	70	1,81	1,029	0,136	0,103	0,014	0,014	7030	1125	
2	0,08			1,029	0,273	0,206	0,014	0,014	14060	2126	
3	0,12			1,029	0,409	0,308	0,014	0,014	21090	3293	
4	0,16			1,029	0,545	0,411	0,014	0,014	28120	4523	
5	0,12	50	1,26	1,093	0,409	0,308	0,015	0,014	21090	6301	
6		80		1	0,409	0,308	0,014	0,014	21090	2764	
7		90		0,973	0,409	0,308	0,013	0,014	21090	2147	
8		70		1,26	1,029	0,409	0,308	0,010	0,009	12382	5211
9				1,55	1,029	0,409	0,308	0,012	0,012	16723	3790
10				2,31	1,029	0,409	0,308	0,018	0,017	30749	3010
11				2,82	1,029	0,409	0,308	0,022	0,021	42311	2757

**Питомі енергетичні витрати на фільтраційне сушіння
ячмінної пивної дробини**

№	$Q_{t.a.}^{lab}$, кДж/кг H ₂ O	$N_{t.a.}^{lab}$, кВт·год/кг H ₂ O	$Q_{\Delta P}^{lab}$, кДж/кг H ₂ O	$N_{\Delta P}^{lab}$, кВт·год/кг H ₂ O	Q^{lab} , кДж/кг H ₂ O	N^{lab} , кВт·год/кг H ₂ O
1	12938,253	3,594	2100,479	0,584	15038,732	4,177
2	12221,669	3,395	3968,288	1,102	16189,956	4,497
3	12620,382	3,506	6146,621	1,707	18767,003	5,213
4	12998,434	3,611	8440,996	2,345	21439,430	5,955
5	15388,956	4,275	11760,262	3,267	27149,218	7,541
6	12353,043	3,431	5159,077	1,433	17512,120	4,864
7	10891,152	3,025	4006,934	1,113	14898,087	4,138
8	13902,327	3,862	3975,166	1,104	17877,493	4,966
9	12437,486	3,455	4803,277	1,334	17240,763	4,789
10	14723,368	4,090	10454,985	2,904	25178,353	6,994
11	16461,445	4,573	16084,252	4,468	32545,697	9,040

Як свідчать дані розрахунку, найнижчі енергетичні витрати на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу $Q_{t.a.}^{lab}$ для таких параметрів фільтраційного сушіння: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температури теплового агенту $T = 90$ °С, швидкості руху теплового агенту $v_0 = 1,81$ м/с (експеримент № 7, табл. 2). За цих параметрів процесу на підігрівання теплового агенту потрібно витратити $Q_{t.a.}^{lab} = 10891,152$ кДж/кг H₂O або 3,025 кВт·год/кг H₂O.

Що стосується енергетичних витрат на подолання гідравлічного опору шару матеріалу $Q_{\Delta P}^{lab}$, то, прогнозовано, вони будуть найнижчими для найменшої товщини шару матеріалу $H = 40$ мм і становитимуть $Q_{\Delta P}^{lab} = 2100,479$ кДж/кг H₂O або 0,584 кВт·год/кг H₂O (експеримент № 1, табл. 2).

Найнижчі сумарні затрати енергії на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини Q^{lab} для параметрів експерименту № 7 ($H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,81$ м/с), що становлять 14898,087 кДж/кг H₂O або 4,138 кВт·год/кг H₂O (табл. 2).

Аналізуючи сумарні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи з ячмінної пивної дробини, відзначимо такі залежності від параметрів фільтраційного методу осушення: питомі показники Q^{lab} зменшуються зі зниженням висоти шару матеріалу, зростанням температури теплового агенту та зниженням швидкості теплового агенту; єдине незначне відхилення даних експерименту № 8 ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С,

$v_0 = 1,26$ м/с), ймовірно, пов'язане із похибкою розрахунку теоретичного часу сушіння.

Висновки

У роботі виконано розрахунок питомих енергетичних витрат для здійснення процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за лабораторних умов. Розраховано енергетичні витрати на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу $Q_{t.a.}^{lab}$, енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару матеріалу $Q_{\Delta P}^{lab}$ та сумарні затрати енергії на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини Q^{lab} . Визначено, що найнижчі сумарні затрати енергії на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини від початкової вологості матеріалу $\omega_1 = 77,88$ % (мас.) до кінцевого значення $\omega_2 = 10$ % (мас.) становлять 14898,087 кДж/кг H₂O або 4,138 кВт·год/кг H₂O для параметрів процесу $H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,81$ м/с. Визначення оптимальних параметрів процесу, за яких можливі найменші енергетичні витрати на осушення матеріалу, важливе для проектування сушильного обладнання.

References

1. Eliopoulos, C., Arapoglou, D., Chorianopoulos, N., Markou, G., & Haroutounian, S. A. (2021). Conversion of brewers' spent grain into proteinaceous animal feed using solid state fermentation. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(20), 29562–29569. - <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15495-w>

2. Bianco, A., Budroni, M., Zara, S., Mannazzu, I., Fancello, F., & Zara, G. (2020). The role of microorganisms on biotransformation of Brewers' spent grain. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 104(20), 8661–8678. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10843-1>
3. Santos, M., Jiménez, J. J., Bartolomé, B., Gómez-Cordovés, C., & del Nozal, M. J. (2003). Variability of brewer's spent grain within a brewery. *Food Chemistry*, 80(1), 17–21. [https://doi.org/10.1016/s0308-8146\(02\)00229-7](https://doi.org/10.1016/s0308-8146(02)00229-7)
4. Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *J. Cereal Sci.*, 43(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
5. Ktenioudaki, A., Chaurin, V., Reis, S. F., & Gallagher, E. (2012). Brewer's spent grain as a functional ingredient for breadsticks. *International Journal of Food Science & Technology*, 47(8), 1765–1771. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2012.03032.x>
6. Ikram, S., Huang, L., Zhang, H., Wang, J., & Yin, M. (2017). Composition and Nutrient Value Proposition of Brewers Spent Grain. *J. Food Sci.*, 82(10), 2232–2242. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13794>
7. Bianco, A., Budroni, M., Zara, S., Mannazzu, I., Fancello, F., & Zara, G. (2020). The role of microorganisms on biotransformation of brewers' spent grain. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 104, 8661–8678. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10843-1>
8. Aboukila, E. F., Nassar, I. N., Rashad, M., Hafez, M., & Norton, J. B. (2013). Reclamation of calcareous soil and improvement of squash growth using brewers' spent grain and compost. *J. Saudi Soc. Agric. Sci.*, 17(4), 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.005>
9. Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications. *J. Sci. Food Agric.*, 94(7), 1264–1275. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6486>
10. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiiaieva, S. S., Duleba, V. P., & Sobechko, I. B. (2022). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(2), 216–221. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i2.256749>
11. Mujumdar, A.S. (Ed.). (2014). *Handbook of Industrial Drying* (4th ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208>
12. Thibault, J., Alvarez, P. I., Blasco, R., & Vega, R. (2010). Modeling the mean residence time in a rotary dryer for various types of solids. *Drying Technology*, 28(10), 1136–1141. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.483045>
13. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A., & Zhrebetskyi, R. R. (2021). Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (4), 58–65. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65>
14. Mykychak, B., Biley, P., & Kindzera, D. (2013). External heat-and-mass transfer during drying of packed birch peeled veneer. *Chemistry & Chemical Technology*, 7(2), 191–195. <https://doi.org/10.23939/chcht07.02.191>
15. Burdo, O. G., Terzsev, S. G., Knuish, A. I., & Kovalenko, E. A. (1997). The New Ways of organization Heat Transfer in Food Industry Apparatuses. *Proc. 5-th Int. Heat Pipes Symp.*, 7–14.
16. Chyzhovych, R. A., Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M. (2023). CFD-modeling of thermal agent flow through a layer of barley brewer's spent grain. *2023 4th International Scientific Conference "Chemical Technology and Engineering". Proceedings*, 31–37. <https://doi.org/10.23939/cte2023.031>
17. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrskaya, V., Barabakh, S., & Hnativ Z. (2024). Kinetic regularities of the barley brewer's spent grain filtration drying. *Chemistry & Chemical Technologies*, 18 (1), 66–75.
18. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiiaieva, S. S., Zhrebetskyi, R. R., & Sobechko, I. B. (2022). Preparation of an alternate solid fuel from alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 54–59. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-140-1-54-59>
19. O'Keeffe, D., Lofts, G., Nelson, P., Pentland, P., et al. (2019). *Jacaranda physics 1 VCE units 1 and 2* Fourth edition learnon and print. John Wiley & Sons Australia, Ltd. ISBN 978-0-730-37315-5
20. Van't Land, C.M. (2012). *Drying in the Process Industry*. Wiley. ISBN 978-0-470-13117-6

O. S. Ivashchuk, V. M. Atamanyuk, R. A. Chyzhovych, S. A. Barabakh

Lviv Polytechnic National University,
Department of the Chemical Engineering

DETERMINATION OF OPTIMAL PARAMETERS OF THE BARLEY BREWER'S SPENT GRAIN FILTRATION DRYING

In this work, the calculation of specific energy consumption for the process of the barley brewer's spent grain filtration drying was investigated. It has been determined that the lowest total energy consumption for the evaporation of 1 kg of moisture during the filtration drying of barley brewer's spent grain from the initial moisture content of the material $\omega_1 = 77.88\%$ (wt.) to the final value $\omega_2 = 10\%$ (wt.) is 14898.087 kJ/kg H₂O or 4.138 kW/kg H₂O for the following process parameters: the height of the layer of dried material $H = 120$ mm, the thermal agent temperature $T = 90$ °C, the thermal agent velocity $v_0 = 1.81$ m/sec. Determining the optimal process parameters at which the lowest energy costs for drying the material are possible is important for the design of drying equipment.

Key words: drying; filtration drying; brewer's spent grain; biomass; calculation; optimal parameters.