

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 674.02.055

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/41>

**Кіндзера Д.П.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Госовський Р.Р.**

Національний університет «Львівська політехніка»

### ЗАСТОСУВАННЯ СЕРЦЕВИНИ СТЕБЕЛ СОНЯШНИКА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

На основі огляду джерел літератури виявлено, що стебла соняшника не утилізуються належним чином і в повній мірі, тому проблема поводження з такими відходами є однією з актуальних проблем сьогодення. Зокрема, запропоновані методи використання серцевини стебел соняшника не покривають потребу її більш повної раціональної утилізації. Таким чином, зважаючи тенденцію щодо залучення рослинних матеріалів для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, виникла зацікавленість щодо можливості залучення серцевини стебел соняшника у виробництво теплоізоляційних плит, панелей та біокомпозитів. Зважаючи на високу початкову вологість серцевини, перед залученням у виробничий процес, її необхідно висушувати. Для реалізації процесу сушіння запропоновано фільтраційний метод, який, як показали дослідження, дає можливість зменшити тривалість сушіння, є енергоефективним, що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції. Проведені дослідження також показали наявність зонального механізму фільтраційного сушіння, що з наукової точки зору є цінним для розвитку теоретичних засад фільтраційного сушіння як наукового напрямку. Низьке значення теплотворної здатності  $7.39 \pm 0.02$  МДж/кг підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива, в той час як анатомічна структура, низьке значення густини  $29,6 \text{ кг/м}^3$  серцевини стебел соняшника та теплопровідність плитного матеріалу ( $0,04 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ ) вказали на добрі теплоізоляційні властивості. Таким чином, серцевина стебел соняшника рекомендована для виробництва теплоізоляційних матеріалів. Дане рішення сприятиме розширенню методів раціональної утилізації природнього сировинного матеріалу та сприятиме розширенню асортименту теплоізоляційних матеріалів на ринку.

**Ключові слова:** серцевина стебел соняшника, утилізація, теплоізоляційні матеріали, фільтраційне сушіння.

**Постановка проблеми.** Соняшник (*Helianthus annuus*) – швидкозростаюча високоврожайна культура, яка культивується, основним чином, для отримання олії та насіння. Посівні площі соняшнику у світі перевищують 26,5 млн га. В Україні більшість посівних площ соняшнику засіяно сортами й гібридами олійної групи (у довоєнний період в Україні – 6,5 млн. га, у воєнний час – близько 4,7 млн. га). Зважаючи на високу середню врожайність соняшнику (75 т/га по Україні), у післязбиральний період накопичуються багатотоннажні відходи зеленої біомаси. Подрібнені стебла соняшника використовуються для годівлі худоби (в тому числі силосовані), виступають природним добривом та сировинним матеріалом для отримання рідкого та газоподібного біопалива [1–3], однак, значні обсяги біомаси не утилізуються належним чином і в повній мірі, тому проблема поводження з такими відходами є однією з актуальних проблем сьогодення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних умовах нестачі природних ресурсів, утилізація сільськогосподарських відходів шляхом їх залучення у виробничі цикли в якості вторинних сировинних матеріалів для отримання нових продуктів з впровадженням енергоефективних технологічних рішень, є важливим завданням сьогодення.

Стебла соняшнику із значною висотою (0,6–2,5 м) і товщиною (діаметр стебла 2–7 см),

мають складну багат шарову анатомічну будову, властиву лише цій культурі. Значна заповненість стебел соняшника губчастою тонкостінною великоклітинною паренхімною тканиною (серцевиною) робить їх унікальним сировинним матеріалом для подальшого використання.

Огляд літературних джерел показав напрямки залучення стебел соняшника у промисловий сектор з реалізацією попереднього їх розділення на кору і серцевину [4, 5]. Зовнішні тканини стебел (кору) використовують як джерело натуральних волокон для виробництва паперу [6], термопластичних композитів [7], деревинно-стружкових плит [8], в той час як серцевина стебел соняшнику часто не знаходить раціонального застосування і в більшій мірі є лише сировинним матеріалом для добування пектину та глюкози [9]. Тому, серцевина стебла соняшнику привернула нашу увагу з огляду на можливість її більш повного використання, для чого необхідним є вивчення її характеристик, які передбачувано відрізнятимуться від характеристик зовнішніх тканин стебел.

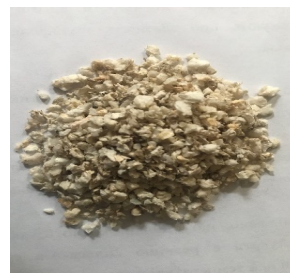
**Постановка завдання.** Ізоляційні біокомпозити, плити та панелі, зазвичай, виготовляються з неорганічних (синтетичних) матеріалів, значна кількість з яких не є екологічно безпечними. На даний час, все більшої популярності набувають ізоляційні матеріали виготовлені на основі натуральних волокон з відновлюваних сировинних ресурсів. Авторами роботи [10] повідомляється про виготовлення теплоізоляційних матеріалів із використанням стебел бавовни, автори роботи [11] досліджували новий ізоляційний матеріал, отриманий з відходів бавовни та текстильного попелу, у роботі [12] подаються відомості щодо застосування відходів бавовни та золи-винесення ТЕС для отримання тепло- та звукоізоляційних матеріалів. Авторами роботи [13] стебла пшениці були використані для виготовлення композитних панелей. Таким чином, зважаючи тенденцію щодо залучення природної сировини для виготовлення теплоізоляційних матеріалів, виникає цікавість щодо можливості залучення серцевини стебел соняшника у виробництво теплоізоляційних плит, панелей та біокомпозитів.

Зважаючи на високу початкову вологість серцевини стебел соняшника, перед залученням у виробничий процес, її необхідно висушувати. Для реалізації сушіння серцевини стебел соняшника запропоновано фільтраційний спосіб, який дозволяє зменшити енергетичні витрати та інтенсифікувати процес, як це спостерігається при сушінні інших видів рослинної сировини [14,

15], що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції.

Мета роботи полягає у дослідженні особливостей фільтраційного сушіння серцевини стебел соняшника та вивченні характеристик висушеного матеріалу для вибору напрямку раціональної утилізації.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Об'єктом дослідження вибрано серцевину стебел соняшника (паренхіму), яка була отримана шляхом її відділення (відрізання) від зовнішніх тканин стебел. Відділену тканину подрібнювали у дробарці до частинок розмірами 0,01–5 мм. Зразок дрібнодисперсного матеріалу представлений на рис. 1.



**Рис. 1. Подрібнена серцевина (паренхіма) стебел соняшника**

Визначення початкового вологовмісту серцевини стебел соняшника проводили з використанням методу зважування та висушування зразка у сушильній шафі до кінцевої вологості і розраховували згідно залежності:

$$\omega^c = \frac{G_n - G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}}}, \quad (1)$$

де  $G_n$  – початкова маса серцевини стебел соняшника, кг;  $G_{\text{сух}}$  – маса сухого матеріалу, кг.

Середній початковий вологовміст подрібненої серцевини соняшника становив 0,67 кг  $\text{H}_2\text{O}$ /кг сух. мат. Дослідження кінетики процесу сушіння подрібненої серцевини соняшника фільтраційним методом проводили на експериментальній установці [14, 15]. На перфорованому дні циліндричного контейнера формували стаціонарний шар з подрібненої серцевини стебел соняшника (висота шару  $H$  становила 30; 60; 90; 120; 160 мм), для сушіння якого тепловий агент, попередньо нагрітий в калорифері до температури 353К, подавали в напрямку «вологий матеріал – перфороване дно» з швидкістю 1,66 м/с (витрата теплового агента реєструвалась електронним витратоміром). Дослідження проводились до досягнення кінцевого вологовмісту матеріалу, який становив 4–6 кг  $\text{H}_2\text{O}$ /кг сух. мат.

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння, у діапазоні зміни висоти шару подрібненої серцевини стебел соняшника від 30 до 160 мм, представлені у вигляді графічних залежностей  $w^c = f(\tau)$  на рис. 2, з яких видно, що зростання висоти шару приводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється зростанням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованого дна котейнера. Загалом, тривалість сушіння є значно меншою, ніж за реалізації процесу у барабанній сушарці, що вказує на доцільність використання такого методу сушіння, як енергоефективного.

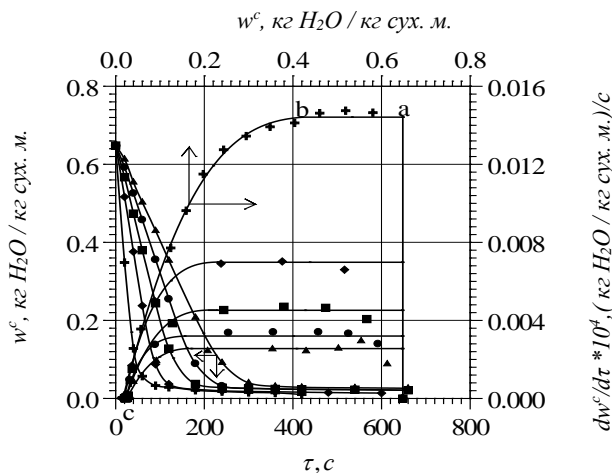


Рис. 2. Кінетика та швидкість сушіння подрібненої серцевини соняшника за різних висот шару матеріалу ( $T = 353\text{ K}$ ;  $v_0 = 1,66\text{ м/с}$ )

На рис. 2 також представлені залежності  $dw^c/d\tau = f(w^c)$ , тобто швидкості сушіння залежно від вологовмісту матеріалу, аналіз яких показує наявність зонального механізму фільтраційного сушіння – для усіх висот шару подрібненої серцевини стебел соняшника криві швидкості характеризуються наявністю кількох ділянок. Горизонтальні лінії (a-b) характеризують періоди повного насичення теплового агенту вологою і їх довжини залежать від висот шару подрібненої серцевини. Таким чином, наявність періодів повного насичення теплового агенту парами вологи та їх тривалості визначаються висотами шару вологого матеріалу та величинами рушійної сили процесу сушіння, а саме – різницею парціальних тисків пари у теплового агента і на поверхні частинок серцевини. Фронт масообміну, з плином часу, переміщається і досягає перфорованого дна контейнера (точка b), насичення теплового агенту вологою зменшується і, таким чином, настає період часткового його насичення парами вологи (похилі лінії).

Висушена фільтраційним методом подрібнена серцевина стебел соняшника використовувалась для проведення подальших досліджень. Згідно з даними [16, 17], серцевина стебел соняшника

містить 31.5–45.4% целюлози та характеризується низьким вмістом геміцелюлози (в межах 3–4%) та лігніну (в межах 2,5–3,2%). Низький вміст геміцелюлози та лігніну вказує на нижчі значення теплотворної здатності такого матеріалу, у порівнянні з зовнішніми тканинами стебла соняшника, де вміст цих компонентів є значно вищим (близько 32% та 17%, відповідно). Теплотворну здатність серцевини стебел соняшнику визначали за допомогою прецизійного бомбового калориметра Б-06-М з ізотермічною ( $\pm 0,015^\circ\text{C}$ ) оболонкою. Отримане значення теплотворної здатності становило  $7.39 \pm 0.02\text{ МДж/кг}$ . Як і очікувалось, низьке значення теплотворної здатності підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива.

Подальші дослідження були спрямовані на визначення густини серцевини стебел соняшника та густини матеріалу із зовнішніх тканин стебел, з метою їх порівняння. За результатами досліджень, отримані середні значення густини (за результатами п'яти замірів) становили  $29,6\text{ кг/м}^3$  для серцевини та  $355,8\text{ кг/м}^3$  для дрібнодисперсного матеріалу, утвореного із зовнішніх тканин стебла. Таким чином, приймаючи до уваги анатомічну структуру серцевини (губчата, великоклітинна паренхіма з тонкими клітинними оболонками, що досліджено методом електронного спектроскопічного аналізу) та низьке значення густини серцевини стебел соняшника, очікуваним було те, що вона проявить хороші теплоізоляційні властивості, для дослідження яких матеріал піддавали пресуванню.

Подрібнену серцевину стебла соняшника засипати в прес-форму (рис. 3), яку поміщали в гідравлічний прес ИП-1000М і прикладене зусилля для пресування контролювали електронним силовимірником пресу з похибкою  $\pm 1\%$ . Видалення спресованого матеріалу з матриці відбувалося за рахунок виштовхування матриці пуансоном. Таким самим чином було отримано і спресований матеріал із зовнішніх тканин стебел соняшника.

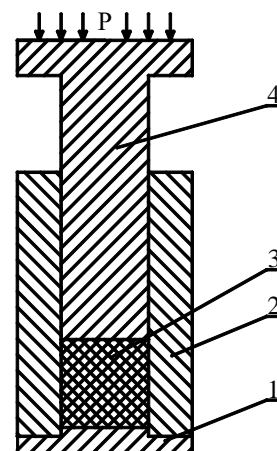


Рис. 3. Прес-форма для формування плитного матеріалу: 1 – основа, 2 – матриця, 3 – матеріал, 4 – поршень

**Порівняння теплопровідності серцевини та зовнішніх тканин стебел соняшника із іншими природними матеріалами**

Природні матеріали	Теплопровідність, Вт/мК	Джерела
Серцевина стебел соняшника	0.04	Отримані результати
Зовнішні тканини стебла соняшника	0.14	Отримані результати
Льон	0.035-0.075	[18]
Конопля	0.040-0.094	[18]

Плитний матеріал, утворений методом пресування подрібненої серцевини стебел соняшника, представлений на рис. 4.

Як і очікувалося, серцевина стебел соняшнику показала нижче значення теплопровідності (0,04 Вт/мК), ніж зовнішні тканини стебла (0,14 Вт/мК) та отримане значення узгоджувалося із теплопровідністю інших природних матеріалів, які зарекомендували себе як теплоізоляційні (табл. 1).

**Висновки.** Низьке значення теплотворної здатності  $7.39 \pm 0.02$  МДж/кг підтвердило недоцільність використання об'єкту досліджень для виробництва твердого біопалива, в той час як анатомічна структура, низьке значення густини  $29,6$  кг/м<sup>3</sup>

серцевини стебел соняшника та теплопровідність плитного матеріалу (0,04 Вт/мК) вказали на добрі теплоізоляційні властивості. Таким чином, серцевина стебел соняшника рекомендована для виробництва теплоізоляційних матеріалів. Дане рішення сприятиме розширенню методів раціональної утилізації природного сировинного матеріалу та сприятиме розширенню асортименту теплоізоляційних матеріалів на ринку. Для реалізації процесу сушіння серцевини стебел соняшника запропоновано фільтраційний метод, який, як показали дослідження, дає можливість зменшити тривалість сушіння, є енергоефективним, що позитивним чином вплине на собівартість цільової продукції.

**Список літератури:**

1. N. Manmai, Y. Unpaprom, and R. Ramaraj. "Bioethanol production from sunflower stalk: application of chemical and biological pretreatments by response surface methodology (RSM)," *Biomass Conversion and Biorefinery*, vol. 11, pp.1759–1773, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00602-7>
2. S.M. Hesami, H. Zilouei, K. Karimi, and A. Asadinezhad. "Enhanced biogas production from sunflower stalks using hydrothermal and organosolv pretreatment," *Industrial Crops and Products*, vol. 76, pp. 449-455, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.07.018>
3. M. Zhurka, A. Spyridonidis, I.A. Vasiliadou, and K. Stamatelatou. "Biogas production from sunflower head and stalk residues: Effect of alkaline pretreatment," *Molecules*, vol. 25(1), pp. 164-179, 2020. <https://doi.org/10.3390/molecules25010164>
4. J. D. Mathias, A. Alzina, and M. Grédiac et al., "Upcycling sunflower stems as natural fibers for biocomposite applications," *BioResources*, vol. 10(4), pp. 8076-8088, 2015. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.8076-8088>
5. L. Wang, H. Ren, S. Zhai, and H. Zhai. "Anatomy and cell wall ultrastructure of sunflower stalk rind," *Journal of Wood Science*, vol. 67(1), pp. 2-9, 2021. <https://doi.org/10.1186/s10086-021-02001-6>
6. H. Rudi, H. Resalati., R.B. Eshkiki., and H. Kermanian. "Sunflower stalk neutral sulfite semi-chemical pulp: An alternative fiber source for the production of fluting paper," *Journal of Cleaner Production*, vol. 127, pp. 562–566, 2016. <https://doi.org/doi:10.1016/j.jclepro.2016.04.049>
7. A. Kaymakci, N. Ayrimis, F. Ozdemir, and T. Gulec. "Utilization of sunflower stalk in the manufacture of thermoplastic composite," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 21, pp. 1135–1142, 2013. <https://doi.org/10.1007/s10924-012-0564-9>
8. I. Bektas, C. Guler, H. Kalaycioglu et al., "The manufacture of particleboards using sunflower stalks (*helianthus annuum* L.) and poplar wood (*populus alba* L.)," *Journal of Composite Materials*, vol. 39(5), pp. 467-473, 2005. <https://doi.org/10.1177/0021998305047098>
9. Q. Zhang, L. Cheng, X. Ma, X. Zhou, and Y. Xu. "Revalorization of sunflower stalk pith as feedstock for the coproduction of pectin and glucose using a two-step dilute acid pretreatment process," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 14:194, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13068-021-02045-2>
10. Zhou X, Zheng F, Li H, Lu C. An environment-friendly thermal insulation material from cotton stalk fibres. *Energy Build* 2010;42:1070–4. <https://DOI:10.1016/j.enbuild.2010.01.020>
11. Binici H, Gemci R, Aksogan O, Kaplan H. Insulation properties of bricks made with cotton and textile ash wastes. *Int J Mater Res* 2010;101:894–9. <https://DOI:10.3139/146.110348>
12. Binici H, Gemci R, Kucukonder A. Investigating the sound insulation, thermal conductivity and radioactivity of chipboards produced with cotton waste, fly ash and barite May 2012 101(7):894-899 <https://DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.12.064>

13. Mengeloglu F, Alma MH. Wheat stems using composite panel production. *J Eng Sci* 2002;5:37–48. <https://doi.org/10.20528/cjcr.2020.04.003>
14. I. Huzova, V. Atamanyuk “Dynamics of drying processes of plant raw material in the period of decreasing speed,” *Journal of Chemistry and Technologies*, vol. 30(3), pp. 419–430, 2022. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i3.259694>
15. V. Atamanyuk, Z. Gnativ, and D. Kindzera, et al., “Hydrodynamics of cotton filtration drying,” *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 14(3), pp. 426–432, 2020. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.426>
16. V. Marechal and L. Rigal. “Characterization of by-products of sunflower culture – commercial applications for stalks and heads,” *Industrial Crops and Products*, vol. 10(3), pp. 185-200, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(99\)00023-0](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(99)00023-0)
17. M. Xu, M. Qi, HD. Goff, and SW. Cui. “Polysaccharides from sunflower stalk pith: chemical, structural and functional characterization,” *Food Hydrocolloid*, vol. 100, 105082, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.04.053>
18. Kymäläinen, H.-R., and Sjöberg, A.-M. (2008). “Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations,” *Build. Environ.* 43(7), 1261-1269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.03.006>

### **Kindzera D.P., Hosovskyi R.R. APPLICATION OF SUNFLOWER STEMS' PITH FOR THE PRODUCTION OF THERMAL INSULATION MATERIALS**

*Based on a review of literature sources, it was found that sunflower stalks are not properly and fully disposed of, so the problem of handling such waste is one of the urgent problems of today. In particular, the proposed methods of using the pith of sunflower stems do not cover the need for its more completely rational disposal. Thus, considering the trend of using plant materials to produce thermal insulating materials, interest has arisen in the possibility of using the pith of sunflower stems to produce thermal insulating boards, panels, and biocomposites. Due to the high initial moisture content of the pith, it must be dried before being involved in the production process. For the implementation of the drying process, a filtration method is proposed, which, as research has shown, makes it possible to reduce the drying duration, and is energy efficient, which will positively affect the cost of the target products. The conducted studies also showed the existence of a zonal mechanism of filtration drying, which from a scientific point of view is valuable for the theoretical foundations of filtration drying development as a scientific direction. The low calorific value of  $7.39 \pm 0.02$  MJ/kg confirmed the impracticality of using the object of research for the production of solid biofuel, while the anatomical structure, the low value of the density  $29.6 \text{ kg/m}^3$  of sunflower stems' pith and the thermal conductivity of the plate material ( $0.04 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) indicated good thermal insulation properties. Thus, the pith of sunflower stems is recommended for the production of thermal insulating materials. This decision will contribute to the expansion of rational utilization methods of natural raw materials, as well as provide to the expansion of the range of thermal insulation materials on the market.*

**Key words:** *pith of sunflower stems, utilization, thermal insulating materials, filtration drying.*