

ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 66.04

ІВАЩУК О. С.*, АТАМАНЮК В. М., ЧИЖОВИЧ Р. А.
Національний університет «Львівська політехніка»

ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІКИ РУХУ ТЕПЛООВОГО АГЕНТУ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ БУРЯКОВОГО ЖОМУ

У статті представлено результати експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому за фільтраційного методу сушіння. Показано, що гідравлічний опір шару дослідженої біомаси зростає із збільшенням його висоти. Виконано комп'ютерне моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому за допомогою програмного комплексу ANSYS Fluent 2022 R2. Розраховано відносне середнє відхилення теоретично розрахованих результатів від одержаних експериментальних даних, що для висот шару осушеного матеріалу 90÷110 мм становить 2,19 %, для висот шару осушеного матеріалу 80÷120 мм – 4,09 %. Одержані результати можуть бути використані для практичних розрахунків сушильного обладнання.

Ключові слова: буряковий жом, біомаса, фільтраційне сушіння, гідродинаміка, CFD-моделювання, вторинна сировина, ресурсозбереження

DOI: 10.20535/2617-9741.3.2024.312415

*Corresponding author: oleksandr.s.ivashchuk@lpnu.ua

Received 22 August 2024; Accepted 05 September 2024

Постановка проблеми. Повторне використання та переробка вторинної сировини мають важливе значення для забезпечення сталого розвитку та раціонального використання природних ресурсів. Ці процеси сприяють зниженню потреби в первинних сировинних ресурсах, що зменшує тиск на екосистеми та сприяє збереженню біорізноманіття. Використання вторинної сировини також дозволяє знизити кількість відходів, які потрапляють на сміттєзвалища, і як наслідок, скоротити викиди продуктів гниття та парникових газів у атмосферу. Окрім екологічних, переробка вторинної сировини має економічні переваги, оскільки операції доступною і відносно недорогою сировиною, створює нові робочі місця та сприяє розвитку інноваційних технологій у сфері переробки та утилізації відходів.

Одним із важливих видів вторинної сировини є відходи харчових виробництв рослинного походження, що у великій кількості утворюються на підприємствах – післяспиртова барда, відходи виробництва кави, пивна дробина та інші. До таких відходів належить також жом цукрового буряка, що є цінним ресурсом для подальшого використання. Інтеграція його переробки та повторного використання у систему сталого розвитку є важливою та актуальною задачею [1].

Аналіз попередніх досліджень. Буряковий жом – це кормовий відхід цукробурякового виробництва, що утворюється після видалення соку з бурякової стружки, і становить основну частину відходів цукрового виробництва. З однієї тони цукрових буряків на суху масу отримують ≈ 130 кг цукру та ≈ 50 кг осушеного жому [2]. У 2023 році обсяги врожаю цукрового буряка в Україні становили ≈ 10 млн. тон, що вказує на значну кількість вторинної сировини, що утворюється під час переробки рослинної сировини [3].

Буряковий жом є важливим видом вторинної сировини завдяки високому вмісту органічних речовин [4]. Це робить його цінним ресурсом для різних галузей, сприяючи раціональному використанню відходів і зменшенню навантаження на довкілля. Зокрема, буряковий жом може бути використаний у кормовій промисловості для годування тварин [5, 6], може використовуватися для у виробництві біоетанолу [7, 8]. Ще одним перспективним напрямком використання бурякового жому є виготовлення альтернативного твердого палива [9, 10].

Однією з основних проблем при використанні бурякового жому є його висока вологість, що становить ≈ 80 % мас. [11]. Така вологість ускладнює транспортування та зберігання жому, а також обмежує його ефективність у різних напрямках застосування. Високий рівень вологості призводить до додаткових витрат

на обробку та переробку, тому осушення бурякового жому є критично важливим для забезпечення його ефективного використання.

Загальною науковою проблемою є зменшення енерговитрат на процес видалення зайвої вологи, адже в світі до 10 % енергії витрачається на процеси осушення. Енергоефективний метод сушіння додатково впливатиме на собівартість вихідної вторинної сировини і робитиме її привабливішою з економічного погляду.

Осушення бурякового жому пропонується виконувати методом фільтраційного сушіння, що показав високу ефективність у порівнянні із широко поширеною у промисловості барабанною сушаркою [12, 13] на прикладі подібної вторинної органічної сировини рослинного походження [14]. Розрахунок промислового обладнання для фільтраційного сушіння повинен враховувати витрати на подолання гідравлічного опору стаціонарного шару матеріалу, що було невирішеною частиною наукової проблеми.

Метою роботи було дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар бурякового жому різної висоти та комп'ютерне моделювання даного процесу. Отримані результати дозволять прогнозувати гідравлічний опір шару матеріалу різної висоти та необхідний перепад тисків для забезпечення перебігу процесу осушення за різних можливих технологічних режимів.

Методика роботи. Для проведення експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеного матеріалу було використано буряковий жом, отриманий на виробничій лінії локального цукрового заводу у Львівській області, Україна (рис. 1).

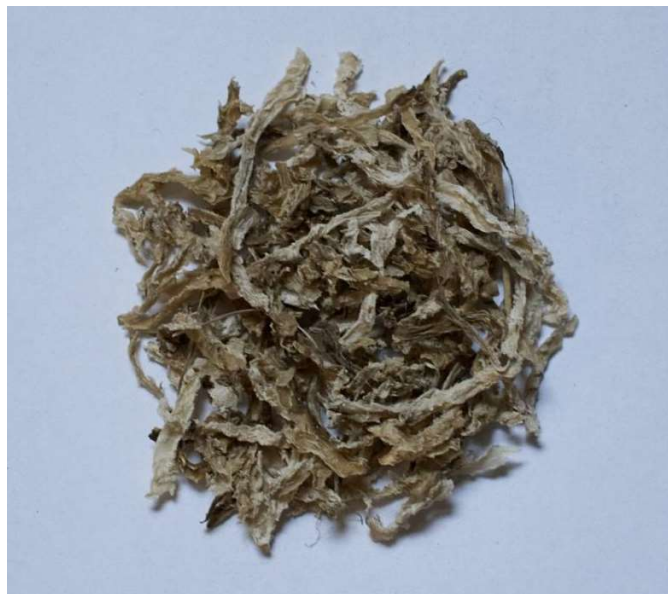


Рис. 1 – Буряковий жом отриманий в результаті осушення

Для видалення надлишкової вологи вихідної рослинної сировини, буряковий жом було попередньо осушено методом фільтраційного сушіння на експериментальній лабораторній установці, детально описаній у роботі авторів [15].

Дослідження гідродинаміки шару осушеного бурякового жому проводили з метою встановлення залежності впливу фіктивної швидкості v_0 теплового агенту на значення гідравлічного опору ΔP стаціонарного шару досліджуваного матеріалу. Для визначення опору стаціонарного шару матеріалу, було додатково визначено опір перфорованої перегородки циліндричного контейнеру для матеріалу лабораторної установки фільтраційного сушіння [16]. Гідравлічний опір шару осушеного бурякового жому розраховували як різницю між повним отриманим експериментально значенням та значенням, розрахованим за рівнянням полінома для кожної величини швидкості потоку повітря, що досліджувалась.

Для контролю кількості та висоти шару матеріалу у контейнері згідно методики [16] було визначено значення насипної густини бурякового жому, що становило $165,1 \text{ кг/м}^3$. Також, було експериментально визначено величину порізності (пористості) шару відповідно до [16], що для осушеної сировини становить $0,38 \text{ м}^3/\text{м}^3$. Середня вологість осушеного матеріалу становила $11,11 \text{ \% мас}$.

Виклад основного матеріалу. За рекомендацією [17], для комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь дисперсний шар об'єкту досліджень, було використано метод пористих середовищ у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Моделювання процесу відбувалося на основі системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса та рівняння нерозривності потоку із додатковим залученням рівняння Дарсі для визначення величини гідравлічного опору шару ΔP [17, 18].

Для проведення комп'ютерного моделювання, окрім параметрів дисперсної сировини, необхідно було врахувати параметри потоку теплового агенту. Як тепловий агент використовували повітря, температура якого на момент проведення серії експериментів становила 19 °С.

Дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому було проведено для висот шару матеріалу, наближених до рекомендованих промислових значень, що становить ≈ 100 мм [16]. Отримані експериментальні дані подано у вигляді графічної залежності впливу фіктивної швидкості v_0 потоку до зміни гідравлічного опору ΔP шару досліджуваного матеріалу (рис. 2).

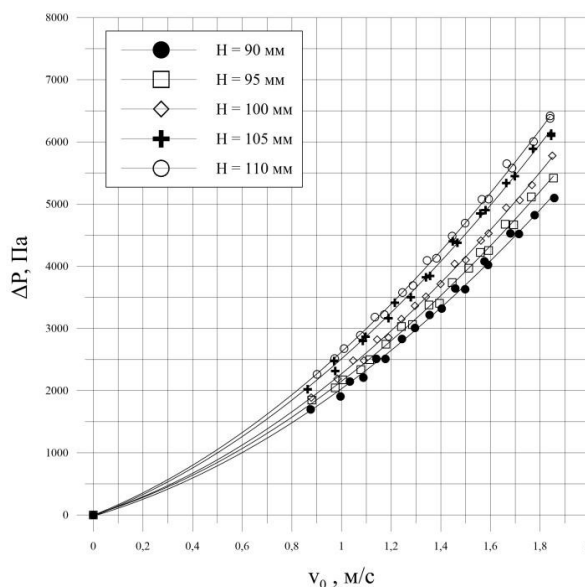


Рис. 2 – Зміна гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому залежно від фіктивної швидкості руху теплового агенту за різної висоти шару ($T = 19$ °С, $H = 90\div 110$ мм, $v_0 = 0,86\div 1,86$ м/с)

Аналіз одержаних експериментальних даних свідчить про зростання гідравлічного опору шару матеріалу із збільшенням висоти його висоти та із збільшенням швидкості руху теплового агенту (рис. 2).

Використовуючи отримані експериментальні дані гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар досліджуваного матеріалу, було побудовано графічну залежність (рис. 3), використовуючи лінійне рівняння, отримане на основі рівняння Дарсі-Вейсбаха [19]:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad (1)$$

де ΔP – гідравлічний опір шару матеріалу, Па; H – висота шару матеріалу, м; v_0 – фіктивна швидкість теплового агенту, м/с; A^* та B^* – коефіцієнти рівняння.

Порівнюючи отриману лінійну залежність (рис. 3) та рівняння (1), очевидно, що коефіцієнти A^* та B^* відповідають коефіцієнтам у рівнянні прямої побудованої на основі експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту [16].

Для комп'ютерного моделювання за методом пористих середовищ необхідно визначити коефіцієнти в'язкого $1/\alpha$ та інерційного C_2 опорів, що можуть бути розраховані на основі рівняння прямої (рис. 3) та фізичних параметрів теплового агенту, використовуючи залежності (2) та (3) [16,17]:

$$A^* = \frac{\mu}{\alpha} \quad (2)$$

$$B^* = C_2 \frac{1}{2} \rho \quad (3)$$

де μ – динамічний коефіцієнт в'язкості теплового агенту, Па·с; ρ – густина теплового агенту, кг/м³.

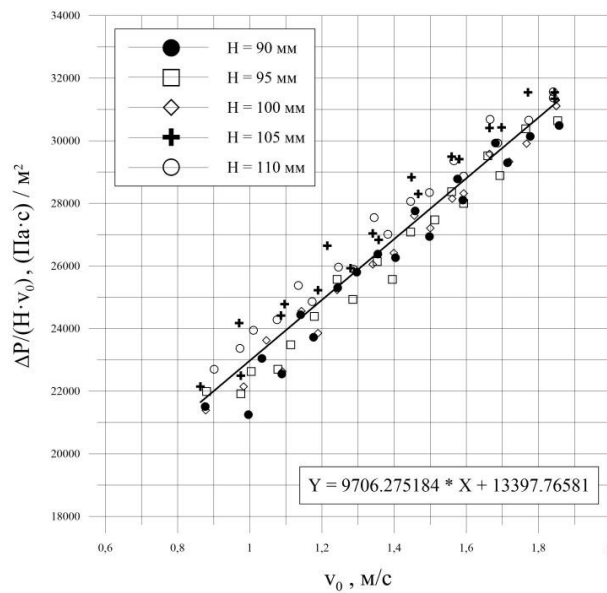


Рис. 3 – Графічна залежність $\Delta P / (H \cdot v_0) = f(v_0)$ для досліджених висот шару бурякового жому ($T = 19^\circ\text{C}$, $H = 90 \div 110$ мм, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

Комп'ютерне моделювання руху теплового потоку крізь шар дисперсного матеріалу було виконано у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* з використанням *k- ω SST* моделі турбулентності, згідно рекомендацій [20]. Характеристики пористої зони моделювання визначались значенням порізності шару осушеного бурякового жому ε і значеннями обчислених коефіцієнтів в'язкого $1/a$ та інерційного C_2 опорів, які становлять $7,44 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ та $1,61 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ відповідно.

У результаті проведеного моделювання, отримано значення гідравлічного опору стаціонарного шару досліджуваного матеріалу для кожної експериментальної фіктивної швидкості теплового агента. Для порівняння отриманих даних моделювання із експериментальними, побудовано графічну залежність зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 4).

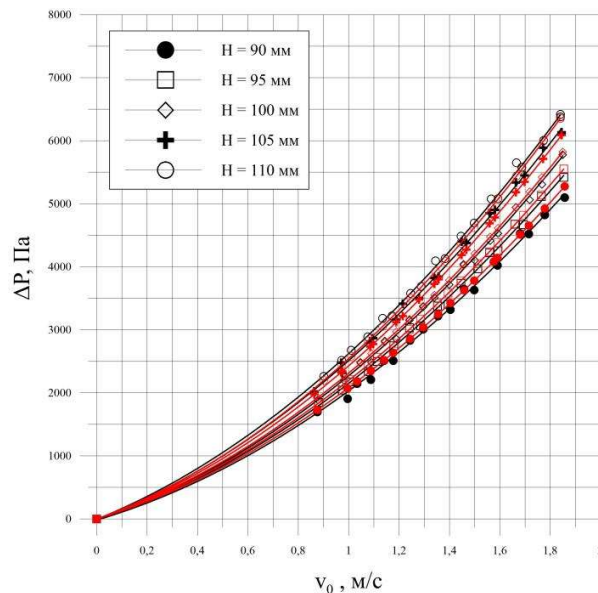


Рис. 4 – Графічне порівняння отриманих значень моделювання (— червоні лінії) гідравлічного опору руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому з експериментальними значеннями (— чорні лінії) ($T = 19^\circ\text{C}$, $H = 90 \div 110$ мм, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 4, спостерігаємо невелике відхилення отриманих результатів моделювання із експериментальним по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

Розраховані відхилення моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 1, у вигляді окремих значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх узагальнене значення за усіма точками експерименту.

Таблиця 1 – Відносні відхилення проведеного комп’ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар бурякового жому для досліджуваних висот $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Відносне середнє відхилення моделювання, %
90	2,64
95	2,18
100	1,72
105	2,52
110	1,87
Середнє значення:	2,19

Аналізуючи дані з табл. 1, для висоти шару $H = 90$ мм спостерігається найбільше усереднене значення відносного відхилення. Якщо ж брати до уваги усі точки проведеного моделювання, то середнє значення відхилення становить 2,19 %.

Для того, щоб забезпечити більш повне розуміння гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар бурякового жому та врахувати можливі зміни у промислових умовах, важливо розширити діапазон досліджуваних висот шару матеріалу. Хоча попередні дослідження охоплювали висоти від 90 до 110 мм, що відповідає середній промисловій висоті 100 мм, необхідно також вивчити шари з висотою від 80 до 120 мм з кроком 10 мм. Це дозволить охопити ширший спектр можливих відхилень висот стаціонарного шару, що можуть виникати в промислових умовах через варіації у технологічних режимах процесів сушіння. Проведення додаткових досліджень допоможе оптимізувати технологічний процес сушіння бурякового жому, підвищуючи його ефективність.

Таким чином, аналогічно було встановлено вплив швидкості потоку теплового агенту v_0 на гідравлічний опір стаціонарного шару осушеного бурякового жому для проміжку висот від 80 до 120 мм з кроком 10 мм. Отримані експериментальні дані у вигляді залежності $\Delta P = f(v_0)$ подано на рис. 5.

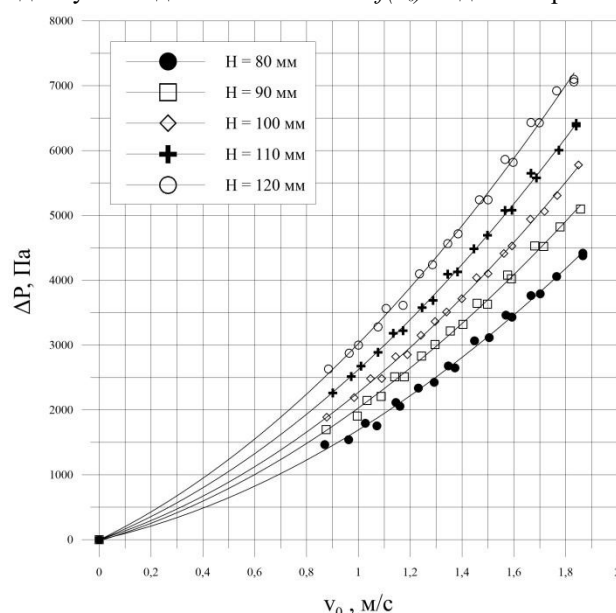


Рис. 5 – Зміна гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому залежно від фіктивної швидкості руху теплового агенту за різної висоти шару ($T = 19$ °C, $H = 80 \div 120$ мм, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

На основі експериментальних даних гідродинаміки руху теплоносія, аналогічно було побудовано графічну залежність $\Delta P/(H \cdot v_0) = f(v_0)$, а також усереднену лінію для усіх точок експерименту (рис. 6).

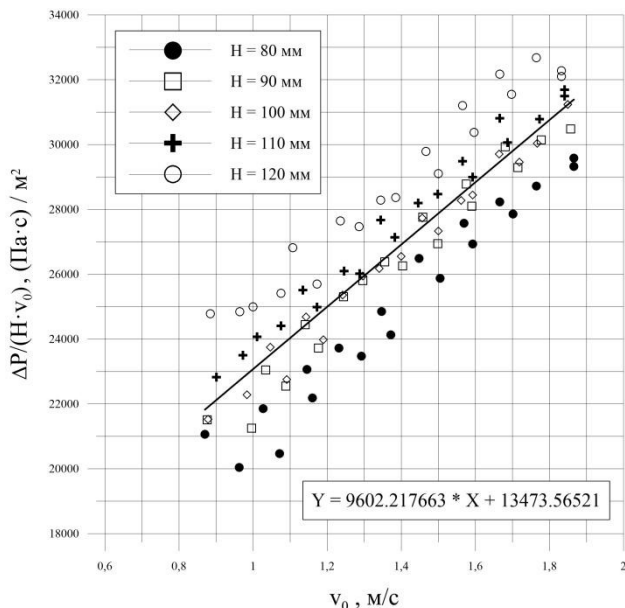


Рис. 6 – Графічна залежність $\Delta P/(H \cdot v_0) = f(v_0)$ для досліджених висот шару бурякового жому ($T = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $H = 80 \div 120 \text{ мм}$, $v_0 = 0,86 \div 1,86 \text{ м/с}$)

На основі залежностей (2) та (3) та рівняння усередненої прямої (рис. 6), було розраховано значення коефіцієнтів в'язкого $1/\alpha = 7,49 \cdot 10^8 \text{ м}^2$ та інерційного $C_2 = 1,59 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ опорів для досліджуваного проміжку висот $H = 80 \div 120 \text{ мм}$.

Результати виконаного комп'ютерного моделювання представлені на рис. 7 у порівнянні з отриманими експериментальними значеннями.

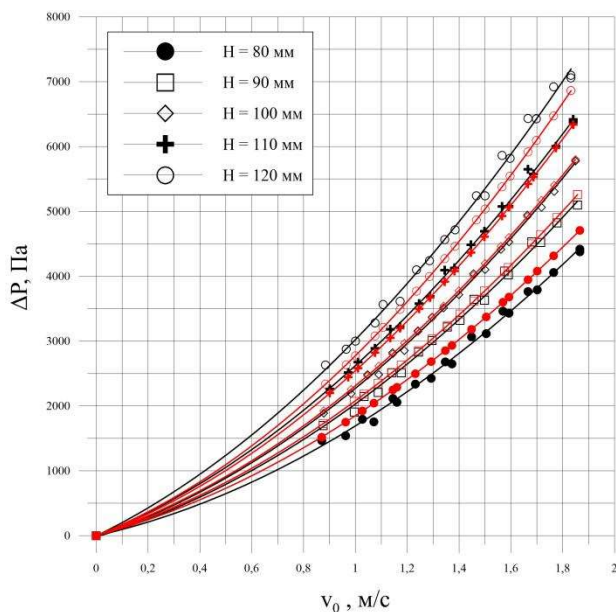


Рис. 7 – Графічне порівняння отриманих значень моделювання (— червоні лінії) гідравлічного опору руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому з експериментальними значеннями (— чорні лінії) ($T = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $H = 80 \div 120 \text{ мм}$, $v_0 = 0,86 \div 1,86 \text{ м/с}$)

Визначені величини відносних відхилень моделювання наведено у табл. 2. Усереднене значення відносного відхилення за усіма експериментальними точками досліджень у діапазоні висот шару бурякового жому $H = 80\div 120$ мм становить 4,09 %. Найбільше усереднене значення відхилення становить 7,86 % для висоти шару $H = 80$ мм.

Таблиця 2 – Відносні відхилення проведеного комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому для досліджуваних висот $H = 80\div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Відносне середнє відхилення моделювання, %
80	7,86
90	2,51
100	1,59
110	2,07
120	6,41
Середнє значення:	4,09

Аналізуючи отримані результати у табл. 2 та графічну залежність рис. 7, де було розширено діапазон висот шару осушеного бурякового жому до $80\div 120$ мм з кроком 10 мм, спостерігається збільшення середнього відхилення моделювання від 2,19 % до 4,09 %. Хоча це відхилення є дещо вищим, порівняно з попередніми дослідженнями, воно залишається в межах допустимих значень і не є критичним для точності прогнозованих результатів. Це зростання відхилення може бути пов'язане з більшою варіативністю гідродинамічних процесів у розширеному діапазоні висот, де більш високі шари матеріалу можуть мати складнішу структуру потоку.

Аналіз отриманих результатів показує, що відбувається збільшення відносного відхилення результатів комп'ютерного моделювання від експериментально одержаних значень при розширенні діапазону досліджуваних висот стаціонарного шару матеріалу. Незважаючи на те, що це незначно знижує точність відповідності результатів комп'ютерного моделювання результатам експерименту, одержані залежності можуть бути використані для визначення значення гідравлічного опору стаціонарного шару матеріалу за фільтраційного методу сушіння та практичних розрахунків сушильного обладнання.

Висновки. У даній роботі було проведено дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому. Параметри досліджуваного об'єкту були експериментально визначені, зокрема, насипна густина матеріалу становила $165,1 \text{ кг/м}^3$, а пористість дорівнювала $0,38 \text{ м}^3/\text{м}^3$.

Експериментальні дані були використані для моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь шар осушеного бурякового жому за допомогою програмного комплексу *ANSYS Fluent 2022 R2*. Виконано моделювання для діапазону висот стаціонарного шару $H = 90\div 110$ мм з інтервалом 5 мм. Отримані дані показали відносне середнє відхилення 2,19 % від експериментальних значень, що свідчить про високу точність розрахунків у цьому діапазоні.

Дослідження для розширеного діапазону висот шару від 80 до 120 мм з інтервалом 10 мм продемонструвало зростання відносного середнього відхилення до 4,09 % від експериментальних значень, проте результати все ще залишаються достатньо точними для практичного використання у розрахунку сушильного обладнання.

Виконані дослідження мають важливе значення для оптимізації процесів сушіння бурякового жому та проектування сушильного обладнання фільтраційним методом.

Перспективи подальших досліджень. Разом із результатами кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння, отримані експериментальні дані та дані комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь шар матеріалу дозволять виконати розрахунок оптимальних параметрів фільтраційного сушіння для бурякового жому та оцінку ефективності фільтраційного сушіння для сушіння бурякового жому у порівнянні з іншими способами зневоднення.

Подяка. Автори висловлюють подяку ТОВ "КАДФЕМ УА", офіційному дистриб'ютору Ansys Inc. в Україні, за допомогу в ліцензуванні програмного забезпечення.

Список використаної літератури

1. Muir, B.M., Anderson, A.R. Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*. 2022. Vol. 24, no. 4, P. 992–1009. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
2. Misra, V., Shrivastava, A. K. Understanding the sugar beet crop and its physiology. *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*. 2022. P. 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
3. Жнива-2023: В Україні намолочено 71,5 млн тон олійних та зернових культур. *Міністерство аграрної політики та продовольства України*. URL: <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kultur> (дата звернення: 21.08.2024).
4. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., VanderGheynst, J. S. Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*. 2013. Vol. 105, P. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
5. Семенова, О. І., Бублиєнко, Н. О., Вітюк, О. І. Сучасні напрямки використання та утилізації бурякового жому. *Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції*, 27.04. – 05.05.2013., Прага, 2013. С. 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>
6. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., Izabela, W. Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products. *Advances in Biotechnology for Food Industry*. 2018. P. 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
7. Mojovic, L., Pejcin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejcin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., Savic, D. Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*. 2009. Vol. 15, no. 4, P. 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
8. Gumienna, M., Szambelan, K., Jeleń, H., Czarnecki, Z. Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice. *Journal of the Institute of Brewing*. 2014. Vol. 120, no. 4, P. 543–549. <https://doi.org/10.1002/jib.181>
9. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S. Vaez, M. Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*. 2011. Vol. 17, no. 4, P. 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
10. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., Dorosti, S. Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2013. Vol. 35, no. 22, P. 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
11. Dygas, D., Kregiel, D., Berłowska, J. Sugar beet pulp as a biorefinery substrate for designing feed. *Molecules*. 2023. Vol. 28, no. 5, P. 2064. <https://doi.org/10.3390/molecules28052064>
12. Handbook of Industrial Drying / ред. A.S. Mujumdar. CRC Press, 2014. URL: <https://doi.org/10.1201/b17208> (дата звернення: 21.08.2024).
13. Thibault, J., Alvarez, P. I., Blasco, R., Vega, R. Modeling the mean residence time in a rotary dryer for various types of solids. *Drying Technology*. 2010. Vol. 28, no. 10, P. 1136–1141. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.483045>
14. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A. Valourization of using efficiency of filtration drying for Alcohol Distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024, Vol. 10, P. 100820. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100820>
15. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A., Zhrebetskyi, R. R. Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage. *Vopr. Khim. Khim. Tekhnol.* 2021. Vol. 4, P. 58–65. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65>
16. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., Atamanyuk, V. Simulation of the thermal agent movement hydrodynamics through the stationary layer of the alcohol distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2024. Vol. 9, P. 100566. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100566>
17. Ansys Fluent User's Guide (15th ed.). ANSYS, Inc. URL: www.ansys.com (дата звернення: 21.08.2024).
18. Wang, Y., Brannock, M., Cox, S., Leslie, G. CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach. *J. Membr. Sci.* 2010. Vol. 363, no. 1-2, P. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.008>
19. Kowalczyk, Z., Tatara, M. S. Improved model of isothermal and incompressible fluid flow in pipelines versus the Darcy–Weisbach equation and the issue of friction factor. *J. Fluid Mech.* 2020. P. 891. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.131>
20. Zaïdi, H., Fohanno, S., Taïar, R., Polidori, G. Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the CFD method. *J. Biomech.* 2010. Vol. 43, no. 3, P. 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.010>

Oleksandr Ivashchuk, Volodymyr Atamanyuk, Roman Chyzhovyh

RESEARCH ON HYDRODYNAMICS OF THE THERMAL AGENT FLOW FOR THE BEET PULP FILTRATION DRYING

The reuse and recycling of secondary raw materials is essential to ensure sustainable development and the rational use of natural resources. One of the most important types of secondary raw materials is plant-based food waste, which is generated in large quantities at food processing plants, including sugar beet pulp, which is a valuable resource for further use.

One of the main problems with using beet pulp is its high moisture content, which is ≈ 80 % wt. It is proposed to dry beet pulp by filtration drying, which is highly efficient. The calculation of industrial equipment for filtration drying should take into account the costs of overcoming the hydraulic resistance of a stationary layer of material.

The aim of the article was to study the hydrodynamics of the flow of a thermal agent through a stationary layer of beet pulp of different heights and to perform computer modelling of this process. The obtained results will allow predicting the hydraulic resistance of a material layer of different heights and the required pressure drop to ensure the course of the drying process under various possible technological modes.

For computer modelling of the flow of a thermal agent through a stationary layer of beet pulp, the porous media method was used in the ANSYS Fluent 2022 R2 software package. The process was simulated on the basis of the Navier-Stokes system of differential equations and the flow continuity equation with the additional use of the Darcy equation to determine the value of the hydraulic resistance of the layer ΔP .

Computer simulations of the hydrodynamics of the thermal agent flow through a stationary layer of beet pulp were performed for the range of stationary layer heights $H = 90\div 110$ mm with an interval of 5 mm. The obtained data showed a relative average deviation of 2.19 % from the experimental data, which indicates a high accuracy of calculations in this range.

The study for the extended range of layer heights $H = 80\div 120$ mm with an interval of 10 mm showed an increase in the relative average deviation to 4.09 % from the experimental data, but the results are still sufficiently accurate for practical use in the calculation of drying equipment.

The obtained dependencies may be used to determine the value of the hydraulic resistance of a stationary layer of material using the filtration drying method and for practical calculations of drying equipment. Together with the results of the kinetic regularities of filtration drying, the obtained experimental data and computer modelling data on the hydrodynamics of the flow of a heat transfer agent through a material layer will allow us to calculate the optimal parameters of filtration drying for beet pulp and to assess the efficiency of filtration drying for drying beet pulp in comparison with other methods of dehydration.

Keywords: *beet pulp, biomass, filtration drying, hydrodynamics, CFD modelling, secondary raw materials, resource saving*

References

1. Muir, B. M., and Anderson, A. R. (2022), "Development and Diversification of Sugar Beet in Europe", *Sugar Tech.* vol. 24, no. 4, pp. 992–1009. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
2. Misra, V., and Shrivastava, A. K. (2022). "Understanding the sugar beet crop and its physiology", *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing*, pp. 11–25. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
3. *Zhnyva-2023: V Ukraini namolocheno 71,5 mln tonn oliinykh ta zernovykh kultur* (2023), Ministerstvo ahrarynoi polityky ta prodovolstva Ukrainy. Available at: <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kultur> (Accessed: 21 August 2024).
4. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., and VanderGheynst, J. S. (2013), "Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol", *Applied Energy*, vol. 105, pp. 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
5. Semenova, O. I., Bubliko, N. O., and Vitiuk, O. I. (2013), "Suchasni napriamky vykorystannia ta utylizatsii buriakovoho zhomu", *Materialy IX Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii*, 27.04. – 05.05.2013, Praha, pp. 10–12. <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/180c2d96-4ec7-4bfd-ad13-19349fc8aaaa/content>

6. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., and Izabela, W. (2018), “Sugar beet pulp as a source of valuable biotechnological products”, *Advances in Biotechnology for Food Industry*, pp. 359–392. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811443-8.00013-x>
7. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., Vukasinovic, M., Nikolic, S., and Savic, D. (2009), “Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks”, *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, vol. 15, no. 4, pp. 211–226. <https://doi.org/10.2298/ciceq0904211m>
8. Gumienna, M., Szambelan, K., Jeleń, H., and Czarnecki, Z. (2014), “Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from Sugar Beet Pulp and juice”, *Journal of the Institute of Brewing*, vol. 120, no. 4, pp. 543–549. <https://doi.org/10.1002/jib.181>
9. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S. and Vaez, M. (2011), “Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass”, *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, vol. 17, no. 4, pp. 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
10. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., and Dorosti, S. (2013), “Physical and chemical properties of beet pulp/mezino bituminous coal briquettes”, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 35, no. 22, pp. 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
11. Dygas, D., Kręgiel, D., and Berłowska, J. (2023), “Sugar beet pulp as a biorefinery substrate for designing feed”, *Molecules*, vol. 28, no. 5, 2064. <https://doi.org/10.3390/molecules28052064>
12. *Handbook of Industrial Drying* (2014), Ed. A.S. Mujumdar, *CRC Press*. <https://doi.org/10.1201/b17208>.
13. Thibault, J., Alvarez, P. I., Blasco, R., and Vega, R. (2010), “Modeling the mean residence time in a rotary dryer for various types of solids”, *Drying Technology*, vol. 28, no. 10, pp. 1136–1141. <https://doi.org/10.1080/07373937.2010.483045>
14. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., and Chyzhovych, R. A. (2024), “Valourization of using efficiency of filtration drying for alcohol distillery stillage”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 10, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100820>
15. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Gnativ, Z. Ya., Chyzhovych, R. A., and Zhrebetskyi, R. R. (2021), “Research into kinetics of filtration drying of alcohol distillery stillage”, *Vopr. Khim. Khim. Tekhnol.*, vol. 4, pp. 58–65. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2021-137-4-58-65>
16. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., and Atamanyuk, V. (2024), “Simulation of the thermal agent movement hydrodynamics through the stationary layer of the alcohol distillery stillage”, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100566>
17. *Ansys Fluent User’s Guide* (15th ed.). *ANSYS, Inc.* Available at: www.ansys.com (Accessed: 21 August 2024).
18. Wang, Y., Brannock, M., Cox, S., and Leslie, G. (2010), “CFD simulations of membrane filtration zone in a submerged hollow fibre membrane bioreactor using a porous media approach”, *J. Membr. Sci.*, vol. 363, no. 1–2, pp. 57–66. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2010.07.008>
19. Kowalczyk, Z. and Tatara, M.S. (2020), “Improved model of isothermal and incompressible fluid flow in pipelines versus the Darcy–Weisbach equation and the issue of friction factor”, *Journal of Fluid Mechanics*, 891, p. A5. <https://doi.org/10.1017/jfm.2020.131>
20. Zaïdi, H., Fohanno, S., Taïar, R., and Polidori, G. (2010), “Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the CFD method”, *J. Biomech.*, vol. 43, no. 3, pp. 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.010>