

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

На правах рукопису

ІВАЩУК ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ

УДК 66.04

**НАУКОВІ ОСНОВИ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ПІД ЧАС
ВИРОБНИЦТВА АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА З
ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ**

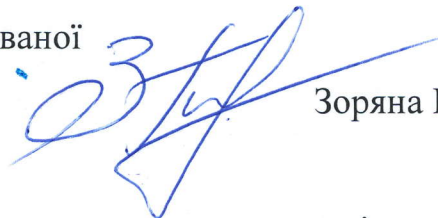
Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

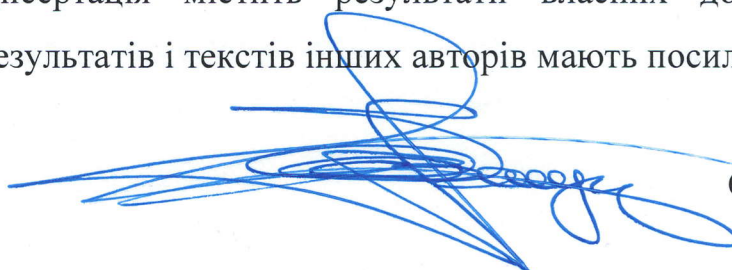
Ідентичність всіх екземплярів дисертації засвідчую

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради



Зоряна ГНАТІВ

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Олександр ІВАЩУК

Львів – 2025

АНОТАЦІЯ

Іващук О.С. Наукові основи тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2025.

Дисертація присвячена дослідженню гідродинаміки, кінетики та динаміки тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, створення на її основі зразків альтернативного твердого палива, дослідження основних енергетичних характеристик альтернативного твердого палива, а також розроблення апаратурного оформлення для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.

У першому розділі виконано критичний аналіз джерел літератури, що стосується основних аспектів щодо перспективності використання вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива; переваг, особливостей механізму та тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів. Наприкінці розділу визначено мету роботи та основні завдання, які необхідно було вирішити для досягнення поставленої мети.

У другому розділі зроблено вибір об’єктів досліджень вторинної сировини рослинного походження, що є доступною на території України, перспективною з огляду потенційного використання як альтернативне тверде паливо та містить надлишкову вологість; наведено її основні фізико-механічні характеристики. Як об’єкти досліджень було обрано сім матеріалів, різних за формою і структурною будовою частинок: кукурудзяну післяспиртову барду, ячмінну пивну дробину, відходи кавового виробництва, буряковий жом, яблучні вичавки, жолуді дуба звичайного (*Quercus robur L.*), плоди гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippo-*

castanum).

Наведено опис та принцип роботи експериментальної установки фільтраційного сушіння, наведено методики проведення експериментальних досліджень (гідродинаміки руху теплового агенту, кінетики та динаміки фільтраційного сушіння; визначення коефіцієнтів тепломасообміну, коефіцієнтів внутрішньої дифузії та теплотворних властивостей вторинної сировини рослинного походження; методики приготування брикетованих та гранульованих зразків твердого палива з осушеної вторинної сировини рослинного походження), комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар стаціонарного матеріалу; супутніх вимірювань (визначення вологості, насипної густини, порізності шару вторинної сировини рослинного походження), а також оцінку похибок вимірювання.

У третьому розділі представлено результати експериментальних досліджень гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Було досліджено зміну гідравлічного опору шару матеріалу залежно від швидкості руху теплового агенту для рекомендованих значень висоти шару матеріалу за сушіння у промислових умовах $H = 80\div 120$ мм із кроком 10 мм, та $H = 90\div 110$ мм із кроком 5 мм. З огляду на модифіковане рівняння Дарсі–Вейсбаха (рівняння Ергана) було визначено рівняння для визначення ΔP для шару досліджуваних матеріалів. За результатами одержаних експериментальних даних виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Отримані в результаті комп'ютерного моделювання графічні залежності, свідчать про відповідність розрахованих значень гідравлічного опору шару досліджених матеріалів до значень, одержаних експериментальним шляхом. Порівняння одержаних усереднених відхилень для різних висот також вказує, що результати знаходяться в допустимих межах ($< 10\%$), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору

шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження можна використовувати для ширшого діапазону висот шару матеріалів для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння. Одержані експериментальні дані гідродинаміки руху теплового агенту представлено для узагальнення у безрозмірній формі, визначено залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для досліджених висот вторинної сировини рослинного походження.

У четвертому розділі наведено результати експериментальних досліджень кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Виконано дослідження впливу основних параметрів процесу (висота вологого матеріалу H , температура теплового агенту T , швидкість руху теплового агенту v_0) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі та подальше узагальнення одержаних даних. Запропоновано розрахункові залежності для визначення зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі для періодів повного насичення теплового агенту вологою та часткового насичення теплового агенту вологою, визначено залежності тривалості процесу фільтраційного сушіння для усіх досліджуваних матеріалів. Визначено відносні відхилення відповідності експериментальних даних до теоретично розрахованих згідно запропонованих узагальнюючих залежностей. Виконано дослідження інтенсивності фільтраційного сушіння досліджуваної вторинної сировини рослинного походження, показано, що для досліджених матеріалів висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Визначено, що сушильний потенціал теплового агенту для фільтраційного сушіння можна збільшити за рахунок підвищення температури та швидкості руху теплового агенту.

У п'ятому розділі наведено результати експериментальних досліджень визначення основних тепломасообмінних коефіцієнтів для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження – коефіцієнтів теплообміну, масообміну та дифузії. Коефіцієнти тепломасообміну визначено для сухого і для вологого шару досліджуваних матеріалів. Визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару вторинної сировини

рослинного походження. Експериментальні дані узагальнено визначеними залежностями критеріїв Нуссельта та Шервуда для усіх досліджених матеріалів. Показано подібність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі з використанням числа Льюїса у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час процесу фільтраційного сушіння. На основі експериментальних даних визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження та узагальнено їх залежності від температури теплового агенту за допомогою розрахункових залежностей.

У шостому розділі визначено енергетичні характеристики вторинної сировини рослинного походження. Показано перспективність використання досліджених матеріалів як альтернативного твердого палива. Виготовлено брикетовані та гранульовані зразки твердого палива з вторинної сировини рослинного походження, визначено основні енергетичні характеристики створених твердопаливних зразків. Показано, що у сформованих брикетованих зразків спостерігається підвищення показників вищої теплотворної здатності у порівнянні із несформованою сировиною. Визначено, що виготовлені брикетовані зразки відповідають існуючим вимогам європейських стандартів до твердого палива.

У сьомому розділі визначено технологічно доцільні параметри процесу фільтраційного сушіння на основі проведених експериментальних досліджень. Запропоновано установку фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу сушіння вторинної сировини рослинного походження та алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу. Розраховано питомі енергетичні витрати для усіх досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу фільтраційного сушіння. Показано ефективність використання процесу фільтраційного сушіння порівняно із барабаними сушарками, що широко використовуються для сушіння біомаси.

Ключові слова: теплообмін, масообмін, гідродинаміка, кінетика, динаміка, вологовміст, температура, тепловий агент, фільтраційне сушіння, альтернативне тверде паливо, біомаса.

Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію

Розділи у монографіях:

1. **Іващук, О.**, Атаманюк, В., Чижович, Р., Манастирська, В., & Собечко, І. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія*, Київ : Яро́чєнко Я. В., 80–92. ISBN: 978-617-7826-23-0 Наведено результати дослідження приготування альтернативного твердого палива з відходів харчової промисловості – ячмінної пивної дробини та кукурудзяної післяспиртової барди.
2. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Manastyrska, V., Chyzhovych, R., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. *The Monograph of the 11th European Young Engineers Conference*, Warsaw, 26–29. ISBN 978-83-953822-1-5 Представлено результати експериментальних досліджень виробництва твердого палива з відходів пивоваріння та виробництва кави відходів.
3. Чижович, Р., **Іващук, О.**, & Атаманюк, В. (2023). CFD-моделювання потоку теплового агенту через шар ячмінної пивної дробини. *Chemical Technology and Engineering – 2023: Monograph*, Lviv: Rastr-7, с. 7–14. ISBN 978-617-8296-99-5 Наведено результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь шар ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння висотою $H = 80\div 120$ мм.
4. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Barabakh, S. (2024). Hydrodynamics of filtration drying of food industry secondary raw materials. *The Monograph of the 12th European Young Engineers Conference*, Warsaw, 22–25. ISBN

978-83-953822-2-2 Наведено результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь шар ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння висотою $H = 90\div 110$ мм.

Статті у наукових фахових виданнях, які включені до наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science):

5. Gnativ, Z. Ya., Ivashchuk, O. S., Hrynychuk, Yu. M., Reutskyi, V. V., Koval, I. Z., & Vashkurak, Yu. Z. (2020). Modeling of internal diffusion mass transfer during filtration drying of capillary-porous material. *Mathematical Modeling and Computing*, 7(1), 22–28. **(Scopus, Q4)** Наведено результати досліджень визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії вологи із капілярно-пористих матеріалів рослинного походження під час фільтраційного сушіння бурякового жому.

6. 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. **(Scopus, Q3)** Представлено результати експериментальних досліджень кінетики та динаміки фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди. Здобувачем здійснено критичний аналіз даних джерел інформації, розроблена установка для досліджень.

7. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, 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. **(Scopus, Q3)** Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із кукурудзяної післяспиртової барди та визначення його основних теплотворних характеристик.

8. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, 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. **(Scopus, Q4; Web of Science)** Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із ячмінної пивної дробини та визначення його основних теплотворних характеристик.

9. **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. **(Scopus, Q4; Web of Science)** Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із відходів виробництва кави та визначення його основних теплотворних характеристик.

10. **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrska, V. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using of barley bran in the production of alternative solid fuel from coffee production waste. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(2), 318–324. **(Scopus, Q4; Web of Science)** Представлено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із використанням відходів виробництва кави.

11. **Ivashchuk, O.S.**, Atamanyuk, V.M., Chyzhovych, R.A., & Barabakh, S.A. (2024). Kinetic regularities of filtration drying of corn alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 12–20. **(Scopus, Q3)** Описано результати узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.

12. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic regularities of the filtration drying of barley brewer's spent grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. **(Scopus, Q3; Web of Science)** Представлено результати узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.

13. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., & Sobechko, I. (2024). Research of solid fuel production from horse chestnut seeds. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(1), 131–137. **(Scopus, Q4; Web of Science)** Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із каштанів гіркокаштану звичайного та визначення його основних теплотворних характеристик.

14. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., & Chyzhovych, R. (2024). Investigation of regularities of the filtration drying kinetics of coffee production waste. *Food Science*

and Technology, 18(1), 65–72. **(Web of Science)** Представлено результати узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння відходів виробництва кави.

15. **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., & Chyzhovych, R. A. (2024). Efficiency investigation of coffee production waste drying by filtration method. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), F9–F16. **(Scopus; Web of Science)** Наведено результати розрахунків технологічно доцільних параметрів та питомих енергетичних витрат процесу фільтраційного сушіння відходів виробництва кави.

16. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., & Sobechko, I. (2024). Research of common oak acorns use for alternate solid fuel production. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(3), 599–604. **(Scopus, Q4; Web of Science)** Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із жолудів дубу звичайного та визначення його основних теплотворних характеристик.

17. **Ivashchuk, O.**, Chyzhovych, R., Atamanyuk, V., & Hnativ, Z. (2023). The Computer Modeling of the Thermal Agent Hydrodynamics Through the Alcohol Distillery Stillage Stationary Layer. *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Jaroslaw, Poland: p. 1–4. **(Scopus; Web of Science)** Наведено результати комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння висотою $H = 90\div 110$ мм.

18. **Ivashchuk, O.**, Chyzhovych, R., & 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*, 9, 100566. **(Scopus, Q1)** Представлено методику проведення та результати комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння висотою $H = 80\div 120$ мм.

19. **Ivashchuk, O.S.**, Atamanyuk, V.M., & Chyzhovych, R.A. (2024). Valourization of using efficiency of filtration drying for alcohol distillery stillage. *Case*

Studies in Chemical and Environmental Engineering, 10, 100820. (**Scopus, Q1**) Представлено алгоритм та результати розрахунку технологічно доцільних параметрів та питомих енергетичних витрат процесу фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.

20. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., & Sobechko, I. (2024). Evaluation of the Apple Pomace Use as a Raw Material for Alternative Solid Fuel. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(4), 1120529. (**Scopus, Q1; Web of Science**) Наведено результати комплексного дослідження приготування альтернативного твердого палива з яблучних вичавок із попереднім осушенням сировини за допомогою фільтраційного сушіння.

Статті у наукових фахових виданнях України:

21. **Іващук, О.С.**, Атаманюк, В.М., Чижович, Р.А., & Барабах, С.А. (2024). Визначення оптимальних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(1), 183–187. Наведено алгоритм та результати розрахунку технологічно доцільних параметрів ячмінної пивної дробини.

22. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Boldyryev, S. (2024). Investigation of the beet pulp filtration drying kinetics. *Environmental Problems*, 9(3), 179–186. Наведено результати узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння бурякового жому.

23. **Іващук, О. С.**, Атаманюк, В. М., & Чижович, Р. А. (2024). Дослідження гідродинаміки руху теплового агенту для фільтраційного сушіння бурякового жому. *Вісник НТУУ “КПІ імені Ігоря Сікорського”*. Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження, 3(23), 9–18. Наведено результати комп’ютерного моделювання руху теплового агенту крізь шар бурякового жому під час фільтраційного сушіння. Здобувачем виконано огляд літературних джерел, проведено дослідження, проаналізовано одержані результати.

24. **Ivashchuk, O.**, Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Vacho, S., Boldyryev, S. (2024). Investigation of the efficiency of a beet pulp filtration drying process.

Environmental Problems, 9(4), 268–274. Представлено результати розрахунків технологічно доцільних параметрів та питомих енергетичних витрат процесу фільтраційного сушіння бурякового жому.

25. Іващук, О.С., Атаманюк, В.М., & Чижович, Р.А. (2024). Оцінка ефективності використання фільтраційного сушіння для промислового осушення пивної дробини. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(2), 161–167. Наведено результати розрахунків питомих енергетичних витрат промислового процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.

26. Іващук, О., Атаманюк, В., Чижович, Р., Манастирська, В., & Собечко, І. (2024). Дослідження виготовлення альтернативного твердого палива з бурякового жому. *Scientific Works*, 88(1), 70–75. Наведено результати досліджень приготування альтернативного твердого палива із бурякового жому та визначення його основних теплотворних характеристик.

Патенти:

27. Іващук, О., Атаманюк, В., & Чижович, Р. (2024, Липень 3). Патент України №128410 С2, МПК С10L 5/44 (2006.01), В09В 3/32 (2022.01) “Тверде паливо” Іващук, О.С., Атаманюк, В.М., Чижович, Р.А. – Заявка № а 2021 04475 від 02.08.2021 р., Національний університет «Львівська Політехніка». Представлено спосіб приготування альтернативного твердого палива з ячмінної пивної дробини та його основні теплотворні характеристики.

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

28. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T., Zherebetskyi, R., & Kiiaieva, S. (2021). Research of the calorific value of dried alcohol distillery stillage. *3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings*, 200–201. Наведено результати досліджень теплотворної здатності осушеної кукурудзяної післяспиртової барди.

29. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Кузьмінчук, Т. А., Кіяєва, С. С., & Жеребецький, Р. Р. (2021). Дослідження теплотворної здатності осушеної післяспиртової барди. *Матеріали XII Міжнародної онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики»*, 56–57. Визначено

теплотворні характеристики післяспиртової барди з метою використання її як сировини для виробництва твердого палива.

30. Кіяєва, С. С., **Іващук, О. С.**, Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., & Кузьмінчук, Т. А. (2022). Дослідження кінетики фільтраційного сушіння пивної дробини. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VII Міжнародний молодіжний конгрес*, Львів, Україна, 159. *Визначено, що швидкість видалення вологи за фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини не залежить від висоти шару матеріалу.*

31. Chyzhovych, R. A., **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Kiiaieva, S. S., Zherebetskyi, R., & Kovalchuk, A. (2022). Research of the solid fuel briquettes obtaining from alcohol distillery stillage. *The Monograph of the 10th European Young Engineers Conference*, 83. *Представлено результати досліджень брикетованого твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди.*

32. Kiiaieva, S. S., **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T. A., & Kovalchuk, A. (2022). Research into kinetic regularities the brewers grains filtration drying. *The Monograph of the 10th European Young Engineers Conference*, Warsaw, Poland, 83. *Наведено результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.*

33. **Іващук, О.С.**, Атаманюк, В.М., Чижович, Р.А., Кіяєва, С.С., Дулеба, В.П., & Ковальчук, А.Р. (2022). Фільтраційне сушіння пивної дробини. *XI Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції*, Львів: Видавництво Львівської політехніки, 161. *Наведено результати досліджень фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.*

34. **Іващук, О. С.** (2022). Альтернативне тверде паливо з відходів харчової промисловості. *Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції*, Дніпро, 123–124. *Представлено результати досліджень*

брикетованого твердого палива з ячмінної пивної дробини та кукурудзяної післяспиртової барди.

35. **Іващук, О. С.,** Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., & Собечко, І. Б. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VII Міжнародний конгрес, 73. Представлено результати досліджень брикетованого твердого палива з ячмінної пивної дробини та кукурудзяної післяспиртової барди.*

36. **Ivashchuk, O. S.,** Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Hnativ, Z. Ya., & Kiiiaieva, S. S. (2022). Filtration drying of food industry waste. *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph / edited by V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda, V. Khomenko, 85–86. Наведено результати досліджень кінетики та динаміки фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини та кукурудзяної післяспиртової барди.*

37. **Ivashchuk, O. S.,** Chyzhovych, R. A., & 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. Наведено результати комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь шар ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння.*

38. Chyzhovych, R. A., **Ivashchuk, O. S.,** Atamanyuk, V. M., Hnativ, Z. Ya., Kiiiaieva, S. S., & Manastyrskaya, V. A. (2023). Filtration drying of secondary raw materials of organic origin. *The Monograph of the 11th European Young Engineers Conference, 66. Наведено результати досліджень кінетики та динаміки фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини та відходів виробництва кави.*

39. **Ivashchuk, O. S.,** Atamanyuk, V. M., Manastyrskaya, V., Chyzhovych, R. A., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. *The Monograph of the 11th European Young*

Engineers Conference, 67. Наведено результати досліджень брикетованого твердого палива з ячмінної пивної дробини та відходів виробництва кави.

40. **Іващук, О.**, Атаманюк, В., Чижович, Р., & Барабах, С. (2024). Оцінка ефективності використання фільтраційного сушіння для осушення біомаси. Сталий розвиток – стан та перспективи. *IV міжнародний науковий симпозіум в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»)*, Україна, Львів – Славське, 98–100. Наведено результати розрахунку питомих енергетичних витрат під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.

41. Chyzhovych, R. A., **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Varabakh, S., & Manastyrska, V. (2024). Hydrodynamics of barley brewer's spent grain filtration drying. *The Monograph of the 12th European Young Engineers Conference*, 105. Наведено результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь шар відходів виробництва кави під час фільтраційного сушіння.

42. Чижович, Р., **Іващук, О.**, Атаманюк, В., & Барабах, С. (2024). Розрахунок оптимальних параметрів фільтраційного сушіння післяспиртової барди. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. IX Міжнародний молодіжний конгрес*, Львів, 236. Наведено результати розрахунку технологічно доцільних параметрів процесу фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.

43. **Іващук, О.**, Атаманюк, В., & Чижович, Р. (2024). Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння бурякового жому. *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024): інженерія, матеріали, технології, транспорт: збірник наукових доповідей міжнародної конференції*, Луцьк, 120–121. Наведено результати дослідження гідродинаміки та комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь шар бурякового жому під час фільтраційного сушіння.

44. **Іващук, О. С.**, Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Барабах, С., Кіяєва, С. С., & Гнатів, З. Я. (2024). Кінетичні закономірності фільтраційного сушіння відходів виробництва кави. *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в*

нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції., Львів, 136–137. Наведено результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння відходів виробництва кави.

45. **Ivashchuk, O. S.**, Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrska, V., & Sobechko, I. (2024). Beet pulp as a raw material for the alternative solid fuel. *Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», Одеса, 34–35. Представлено результати досліджень брикетованого твердого палива з бурякового жому.*

ABSTRACT

Ivashchuk O.S. Scientific bases of heat and mass transfer processes in the alternative solid fuels production from secondary raw materials of plant origin. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.17.08 Processes and equipment of chemical technology – Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2025.

The dissertation is devoted to the study of hydrodynamics, kinetics and dynamics of heat and mass transfer processes during filtration drying of secondary raw materials of plant origin, the creation of samples of alternative solid fuels on its basis, the study of the main energetic characteristics of alternative solid fuels, as well as the development of hardware design for filtration drying of secondary raw materials of plant origin.

The first chapter contains a critical analysis of the literature sources concerning the main aspects of the prospects for the use of secondary raw materials of plant origin as an alternative solid fuel; advantages, features of the mechanism and heat and mass transfer processes during filtration drying of wet dispersed materials. At the end of the chapter, the aim of the work and the main tasks that had to be solved to achieve the aim are defined.

The second chapter describes the selection of research objects of secondary raw materials of plant origin, which are available in Ukraine, promising in terms of

potential use as an alternative solid fuel and containing excessive moisture; its main physical and mechanical characteristics are presented. Seven materials with different particle shapes and structures were chosen as research objects: corn alcohol distillery stillage, barley brewer's spent grains, coffee production waste, beet pulp, apple pomace, acorns of common oak (*Quercus robur L.*), and fruits of common horse chestnut (*Aesculus hippocastanum*).

The third chapter presents the results of experimental studies of the hydrodynamics of the flow of a thermal agent through a stationary layer of secondary raw materials of plant origin during the filtration drying process. The change in the hydraulic resistance of the material layer depending on the speed of the thermal agent movement was investigated for the recommended values of the height of the material layer during drying under industrial conditions $H = 80 \div 120$ mm with a step of 10 mm, and $H = 90 \div 110$ mm with a step of 5 mm. Taking into account the modified Darcy-Weisbach equation (Ergan's equation), the equation for determining ΔP for the layer of the studied materials was determined. Based on the results of the experimental data obtained, we performed a computer simulation of the hydrodynamics of the flow of a thermal agent through a stationary layer of dried secondary raw materials of plant origin in *ANSYS Fluent 2022 R2* software package. The graphical dependencies obtained as a result of computer simulation indicate that the calculated values of the hydraulic resistance of the layer of the studied materials correspond to the values obtained experimentally. Comparison of the obtained average deviations for different heights also indicates that the results are within acceptable limits ($< 10\%$), which makes it possible to assert that the obtained equations for predicting the hydraulic resistance of the layer of the studied secondary raw materials of plant origin can be used for a wider range of material layer heights to calculate the parameters of the filtration drying process. The obtained experimental data on the hydrodynamics of the movement of the thermal agent are presented for summarization in a dimensionless form, and the dependencies of the Euler criterion on the Reynolds criterion for the studied heights of secondary raw materials of plant origin are determined.

The fourth chapter presents the results of experimental studies of the kinetic regularities of filtration drying of secondary raw materials of plant origin. The influence of the main process parameters (height of the wet material H , temperature of the thermal agent T , velocity of the thermal agent v_0) on the change in the moisture content of the studied material over time was studied and the data obtained were further generalized. The calculation dependencies for determining the change in moisture content of the material under study over time for the periods of complete saturation of the thermal agent with moisture and partial saturation of the thermal agent with moisture are proposed, and the dependencies of the duration of the filtration drying process for all the materials under study are determined. The relative deviations of the experimental data from the theoretically calculated ones according to the proposed generalized dependencies were determined. The intensity of filtration drying of the studied secondary raw materials of plant origin was investigated, and it was shown that for the studied materials the height of the layer of wet material does not affect the intensity of moisture removal by the thermal agent. It is determined that the drying potential of the thermal agent for filtration drying can be increased by increasing the temperature and speed of the thermal agent.

The fifth chapter presents the results of experimental studies to determine the main heat and mass transfer coefficients for filtration drying of secondary raw materials of plant origin – heat transfer, mass transfer, and diffusion coefficients. The heat and mass transfer coefficients were determined for the dry and wet layers of the materials studied. The averaged heat transfer coefficients for the dry and wet layers of secondary raw materials of plant origin were determined. The experimental data are summarized by the determined dependencies of the Nusselt and Sherwood criteria for all the studied materials. The similarity of heat and mass transfer coefficients using the Lewis number in the period of complete saturation of the thermal agent with moisture during the filtration drying process is shown. Based on experimental data, the internal diffusion coefficients for the studied secondary raw materials of plant origin were determined and their dependence on the temperature of the thermal agent was summarized using calculated dependencies.

The sixth chapter determines the energy characteristics of secondary raw materials of plant origin. The prospects of using the studied materials as an alternative solid fuel are shown. Briquetted and granular samples of solid fuels from secondary raw materials of plant origin were produced, and the main energy characteristics of the created solid fuel samples were determined. It is shown that the formed briquetted samples have an increase in the higher calorific value compared to the unformed raw materials. It is determined that the manufactured briquettes meet the existing requirements of European standards for solid fuels.

The seventh chapter determines the technologically feasible parameters of the filtration drying process on the basis of experimental studies. A filtration drying unit for the industrial implementation of the process of drying secondary raw materials of plant origin and an algorithm for calculating the specific energy indicators of the process of filtration drying of secondary raw materials of plant origin for the industrial implementation of the process are proposed. The specific energy consumption for all the studied materials of secondary raw materials of plant origin for the industrial implementation of the filtration drying process was calculated. The efficiency of using the filtration drying process in comparison with rotary drum dryers, which are widely used for drying biomass, is shown.

Keywords: heat transfer, mass transfer, hydrodynamics, kinetics, dynamics, moisture content, temperature, thermal agent, filtration drying, alternative solid fuels, biomass.

ЗМІСТ

Анотація.....	2
Зміст.....	19
Вступ.....	22
1. Критичний аналіз джерел літератури щодо підготовки та використання вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива та пов'язаних тепломасообмінних процесів	30
1.1. Поточний стан справ в області використання твердого палива.....	30
1.2. Перспективна рослинна сировина, що підлягає використанню як тверде паливо.....	33
1.3. Аналіз тепломасообмінних та гідромеханічних процесів під час підготовки вторинної сировини рослинного походження для виготовлення альтернативного твердого палива.....	46
Висновки до розділу 1.....	55
2. Характеристика об'єктів досліджень. Методики проведених експериментальних досліджень. Опис апаратури та обладнання	58
2.1. Основні характеристики вторинної сировини рослинного походження	59
2.2. Опис та принцип роботи експериментальної установки фільтраційного сушіння	63
2.3. Методики проведення експериментальних досліджень та супутніх визначень	65
2.4. Оцінка похибок вимірювання	91
Висновки до розділу 2.....	93
3. Гідродинаміка під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження	94
3.1. Дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь шар вторинної сировини рослинного походження	94

3.2.Комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь шар вторинної сировини рослинного походження	104
3.3.Узагальнення результатів експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження	138
Висновки до розділу 3.....	151
4. Кінетичні закономірності фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.....	153
4.1.Дослідження кінетики фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження	153
4.2.Математичне узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження	165
4.3.Дослідження динаміки фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження	217
Висновки до розділу 4.....	242
5. Визначення основних тепломасообмінних коефіцієнтів для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження	244
5.1.Визначення коефіцієнтів тепломасообміну для процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.....	244
5.2.Визначення коефіцієнтів дифузії для процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.....	257
Висновки до розділу 5	266
6. Дослідження енергетичних характеристик альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження	267

6.1. Використання несформованої вторинної сировини рослинного походження як твердого палива	267
6.2. Дослідження енергетичних характеристик брикетованої вторинної сировини рослинного походження	275
6.3. Дослідження енергетичних характеристик гранульованої вторинної сировини рослинного походження.....	286
Висновки до розділу 6	296
7. Економічні аспекти використання альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження	297
7.1. Визначення технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі експериментальних даних.....	298
7.2. Апаратурне оформлення виробництва альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження	313
7.3. Розрахунок питомих енергетичних витрат за промислового використання фільтраційного сушіння для вторинної сировини рослинного походження	317
Висновки до розділу 7.....	338
Висновки.....	340
Список використаних джерел.....	344
Додатки.....	375

ВСТУП

Актуальність теми. За умов перманентного зростання енергоспоживання людським суспільством зростає також потреба в енергоносіях. За таких умов збільшується використання різних енергетичних ресурсів, в тому числі і традиційного твердого палива, частка та об'єми споживання якого також зростають. Збільшення використання традиційного твердого палива – насамперед викопного вугілля та деревини – призводить до неunikненого погіршення екологічної ситуації у світі та є однією із причин зміни клімату на планеті. Таким чином, є нагальна потреба у розвитку сировинних джерел, що можуть бути використані як альтернативне тверде паливо. Такими джерелами в Україні є насамперед швидкоростучі рослини та відходи сільського господарства. Проте, використання швидкоростучої рослинної сировини вимагає додаткової спеціальної культивуації на сільськогосподарських угіддях та часових затрат. Відходи сільського господарства, наприклад подрібнені стебла соняшника, зазвичай мають меншу теплотворну здатність та високі значення зольності, пов'язані із недостатньою чистотою вихідної сировини.

З іншого боку, на території України є вторинна сировина рослинного походження, що має перспективи для використання як альтернативне тверде паливо. По-перше, це промислові органічні відходи рослинного походження, які утворюються у значних кількостях на підприємствах України, наприклад післяспиртова барда виробництв етилового спирту, пивна дробина пивоварень, відходи виробництва кави, фруктовий та овочевий жом. Ця вторинна сировина рослинного походження має надлишкову вологість $> 65\%$ мас., у зв'язку з чим тривале її зберігання та використання ускладнене. Псууючись, дані відходи промисловості шкодять довкіллю, ґрунтам, ґрунтовим водам. По-друге, в Україні є природна рослинна сировина, що є загальнодоступною у лісових та паркових зонах і має теоретичний потенціал для використання як альтернативне тверде паливо – це плоди дубу та гіркокаштану, що широко поширені на

території нашої держави. Ця вторинна сировина рослинного походження також містить надлишкову природну вологість.

Для попереднього осушення вищезгаданої сировини рослинного походження перспективним є застосування методу фільтраційного сушіння, що є високоефективним з огляду на принцип проведення процесу. Проте відомостей про тепломасообмінні закономірності під час сушіння вторинної сировини рослинного походження недостатньо і дане питання вимагає проведення експериментальних досліджень, що відносяться до фундаментальних проблем гідромеханіки, теорії тепло- та масопередачі, оскільки на їх основі вирішуються наукові та технічні задачі, що виникають при розрахунках процесів та проектуванні обладнання хімічної технології. У зв'язку з цим, тема дисертації є актуальною, має наукове і практичне значення, оскільки спрямована на вирішення важливої науково-прикладної проблеми, сутність якої полягає в створенні теоретичних основ тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана згідно з планом науково-дослідних робіт кафедри хімічної інженерії Національного університету «Львівська політехніка», які проводяться у відповідності з основними напрямками наукової діяльності Національного університету «Львівська політехніка»: «Гідродинаміка і тепломасообмін в системі «тверде тіло – газ», «тверде тіло – рідина» (номер державної реєстрації 0117U004122), «Чисельне моделювання гідромеханічних, хімічних, тепло- і масообмінних процесів» (номер державної реєстрації 0117U004123). Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетної теми «Створення взірців високоефективного альтернативного твердого палива з відходів харчової промисловості рослинного походження» (БФ-2-2023, номер державної реєстрації 0123U104178). Автор дисертаційної роботи був виконавцем цієї держбюджетної теми. Дисертаційна робота була виконана за підтримки проєкту Horizon Europe «Підтримка європейських досліджень і розробок через співпрацю із зацікавленими сторонами та інституційну реформу» («SupportING

European R&I Through stakeholder collaboration And institutional reform», INITIATE, HORIZON-WIDERA-2023-ACCESS-03, номер проєкту 101136775). Автор дисертаційної роботи є виконавцем цього проєкту.

Мета і завдання досліджень. Метою роботи є розроблення теоретичних основ гідродинаміки та кінетики тепломасообмінних процесів фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та створення на її основі зразків альтернативного твердого палива, дослідження основних характеристик альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження, а також розроблення апаратурного оформлення для сушіння вторинної сировини рослинного походження.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- обґрунтувати вибір вторинної сировини рослинного походження, що є перспективною з огляду використання для виготовлення альтернативного твердого палива;
- встановити закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- виконати комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- узагальнити закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння;
- встановити та узагальнити закономірності кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;
- встановити та узагальнити закономірності динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;
- узагальнити результати експериментальних досліджень зовнішнього тепломасообміну процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження;

- обґрунтувати перспективність використання альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження;
- виготовити дослідні зразки альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження та визначити основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження;
- обґрунтувати технологічно доцільні параметри сушильного обладнання для проведення процесу фільтраційного сушіння;
- запропонувати апаратне оформлення процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.

Об’єкт досліджень – процес фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Предмет дослідження – гідродинаміка руху теплового агенту, кінетика фільтраційного сушіння, динаміка фільтраційного сушіння, фізичні та математичні моделі тепломасообміну, основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива, розрахунок параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи фізичного, математичного і комп’ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту, кінетики та динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Згідно стандартизованих методик виконували визначення параметрів досліджуваних матеріалів: вологості, насипної густини, порізності шару. Для дослідження поверхні вторинної сировини рослинного походження використовували методи вимірювання мікроскопічним методом. Зразки альтернативного твердого палива виготовляли за допомогою методів брикетування та гранулювання. Теплотворні характеристики досліджуваних матеріалів визначали методом калориметрії. Для розв’язку диференціальних рівнянь використовували числові та аналітичні методи. Обробку експериментальних даних виконували за допомогою систем

комп'ютерної алгебри та кінцево-елементного аналізу із використанням прикладних програмних пакетів та спеціалізованого програмного забезпечення: *Microsoft Office 365, Autodesk AutoCAD, Grapher, PTC MathCAD, ANSYS Fluent* та ін.

Наукова новизна одержаних результатів:

Вперше:

- експериментально досліджено гідродинаміку, кінетику і динаміку фільтраційного сушіння семи різних за формою і структурною будовою частинок вторинної сировини рослинного походження та вплив на швидкість видалення вологи за різної висоти шару висушуваного матеріалу, швидкості руху теплового агенту, його початкової температури;
- отримано критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів зовнішнього теплообміну у стаціонарному шарі для досліджуваних матеріалів;
- отримано критеріальні рівняння для визначення коефіцієнтів масообміну у стаціонарному шарі для досліджуваних матеріалів;
- встановлено аналогію між зовнішнім теплообміном та масообміном з використанням числа Льюїса для досліджуваних матеріалів;
- отримано теоретичні залежності, які дають змогу для досліджуваних матеріалів визначати коефіцієнти внутрішньої дифузії під час фільтраційного сушіння;
- отримано математичні залежності, які описують зміну вологовмісту вторинної сировини рослинного походження в часі та тривалість процесу фільтраційного сушіння за різних параметрів процесу: висоти шару вологого матеріалу, температури теплового агенту, швидкості руху теплового агенту;
- досліджено основні енергетичні характеристики зразків альтернативного твердого палива із осушеної фільтраційним методом вторинної сировини рослинного походження.

Набули подальшого розвитку теоретичні основи:

- гідродинаміки стаціонарного шару вторинної рослинної сировини під час фільтраційного сушіння, зокрема критеріальні залежності, доповнені геометричним симплексом, які характеризують внутрішню задачу гідродинаміки та визначені невідомі коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана для досліджуваних матеріалів;
- кінетики фільтраційного сушіння, зокрема розрахункові залежності, які дають змогу прогнозувати швидкість видалення вологи та час досягнення кінцевої вологості досліджуваних матеріалів.

Практичне значення одержаних результатів:

- отримані за результатами експериментальних досліджень критеріальні рівняння гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння та модифіковане рівняння Ергана дають змогу прогнозувати гідравлічний опір шару та енергетичні витрати на створення перепаду тиску для кожного дослідженого матеріалу;
- отримано результати комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення *ANSYS Fluent*;
- отримані за результатами експериментальних досліджень кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження математичні залежності дають змогу прогнозувати зміну вологовмісту у часі для кожного дослідженого матеріалу та тривалість процесу фільтраційного сушіння;
- отримані за результатами експериментальних досліджень дані про основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження дають змогу рекомендувати його практичне використання;

- розроблені алгоритми розрахунку питомих енергетичних витрат процесу фільтраційного сушіння дають змогу визначати технологічно доцільні параметри процесу та економічну ефективність осушення вторинної сировини рослинного походження фільтраційним методом;
- на основі узагальнення теоретичних досліджень та експериментальних даних запропоновано апаратурне оформлення технологічного процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового використання;
- практична реалізація одержаних результатів полягає у передачі результатів досліджень ДП «Вузлівський спиртовий завод» (с. Вузлове, Львівська обл.), ТзОВ «Пивоварня «КУМПЕЛЬ» (м. Львів), СП «Галка ЛТД» (м. Львів), ТОВ «Вітагро Біо-Трейд» (Марилівський спиртзавод) (с. Нагірянка, Тернопільська обл.), ТОВ «Крафтове пиво» (броварня «ЦИПА») (с. Кваси, Закарпатська область), ТОВ «Інтер-Синтез» (м. Борислав) для впровадження у виробництво, що підтверджено відповідними актами.

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі стану проблеми, в аналізі наукової літератури за темою дисертації, в обґрунтуванні і розробці основної ідеї та теми дисертації, у розробці наукових положень і методик експериментальних досліджень, у виконанні експериментальних досліджень, у фізичному, математичному та комп'ютерному моделюванні, обробці, аналізі результатів експериментальних даних, у формулюванні основних теоретичних положень та висновків. Внесок автора у вирішення завдань, що виносяться на захист є основним.

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертації та її результати були оприлюднені та обговорені на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, зокрема: Міжнародній конференції «Chemical Technology and Engineering» (м. Львів, 21-24 червня 2021 р., 26-29 червня 2023 р.), XII Міжнародній онлайн-конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (м. Київ, 26-27 жовтня 2021 р.), Міжнародному

молодіжному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 10-11 лютого 2022 р., 28-29 березня 2024 р.), Європейській конференції молодих інженерів (м. Варшава, Польща, 4-6 квітня 2022 р., 17-19 квітня 2023 р., 15-17 квітня 2024 р.), Міжнародній науково-технічній конференції «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості» (м. Львів, 16-20 травня 2022 р., 20-24 травня 2024 р.), Міжнародній науково-практичній конференції «Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях» (м. Дніпро, 23-24 червня 2022 р.), VII Міжнародному конгресі «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування» (м. Львів, 12-14 жовтня 2022 р.), 4-тій Міжнародній конференції «Advanced polymer materials and technologies» (м. Львів, 11-12 жовтня 2022 р.), IV Міжнародному науковому симпозиумі «Сталий розвиток – стан та перспективи» (м. Львів – с. Славсько, 13-16 лютого 2024 р.), 2-ій Міжнародній конференції «Матеріали та технології в інженерії» (м. Луцьк, 14-16 травня 2024 р.), XX Міжнародній науковій конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (м. Одеса, 9-13 вересня 2024 р.).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 45 наукових працях, з яких 22 статті (16 статей у виданнях, що входять до наукометричних баз даних, з них 3 – Q1, та 6 статей у наукових фахових виданнях України), 1 патент України на винахід, 4 розділи у колективних монографіях та 18 тез доповідей на наукових конференціях.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел, який включає 240 найменувань і додатків. Робота викладена на 357 сторінках основного тексту, містить 258 рисунків, 108 таблиць та додатки на 49 сторінках. Загальний об'єм роботи 423 сторінки.

РОЗДІЛ 1

КРИТИЧНИЙ АНАЛІЗ ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ ЩОДО ПІДГОТОВКИ ТА ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ТА ПОВ'ЯЗАНИХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ

1.1. Поточний стан справ в області використання твердого палива

Життєдіяльність людського суспільства потребує значної кількості енергії. Цивілізація енергозалежна – і кількість споживаної енергії зростає по мірі збільшення чисельності населення планети.

У своєму розвитку, люди пройшли шлях від освоєння вогню до атомної енергетики, проте частка традиційних паливних ресурсів досі залишається непомірно високою. Згідно даних [1], розподіл споживання енергії у світі сьогодні є наступним:

- Нафта – 32%;
- Традиційне та викопне паливо – 27 %;
- Природний газ – 23 %;
- Гідроенергетика – 7 %;
- Відновлювальна та альтернативна сировина – 7 %;
- Атомна енергетика – 4 %.

Висока частка викопного палива підтверджується авторами роботи [2]. Результати іншого аналізу [3], що відображає динаміку використання енергоносіїв, свідчать про те, що проблема є набагато глибшою, оскільки світовий попит на енергію збільшився в чотири рази всього за 50 років, і на даний час викопні види палива все ще забезпечують приблизно 83% світового попиту на первинну енергію. Результати досліджень невтішно стверджують про те, що викопне паливо залишається незамінним енергетичним ресурсом, незважаючи на його невідновлювану природу [4].

Екологічна ситуація у цілому світі, на жаль, постійно погіршується [5]. Збільшення потреб зростаючої популяції людства виливається у ряд проблем, що потребують перманентного вирішення: дефіцит природних ресурсів, зростання кількості вторинної сировини та відходів виробництва [6], збільшення забруднюючих викидів у довкілля [7] тощо.

Окремою проблемою є кліматична, і використання значних об'ємів викопного палива приймає у ній активну участь: є значним джерелом викидів парникових газів, які є однією з основних причин зміни клімату [8]. Вплив використання викопного палива настільки значний, що навіть існують дослідження щодо його впливу на стихійні лиха [9].

Проблема – глобальна, і Паризька кліматична угода 2015 року зобов'язує країни обмежити зростання середньої глобальної температури до рівня нижче 2 °C порівняно з доіндустріальним періодом і прагнути до 1,5 °C [10].

У країнах Європейського Союзу прийнято набір політичних ініціатив, висунутих Європейською Комісією з загальною метою зробити Європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року – так званий «зелений перехід» (англ. «green transition») [11]. Офіційне визначення даного напрямку – Європейський зелений курс (англ. The European Green Deal) [12], і він включає в себе план дій з круговою економікою, систему торгівлі викидами, зміни в політиці щодо викопного палива, лісову стратегію [13]. «Зелений перехід» також спирається на програму грантових досліджень Horizon Europe [14], і угода підтримуватиме наукові дослідження та інновації в транспортних технологіях, включаючи акумулятори, чистий водень, виробництво низьковуглецевої сталі, кругові сектори на основі біологічної енергії тощо [15].

Сучасний світ стоїть перед необхідністю пошуку та запровадження нових джерел енергії [16], які б враховували екологічні потреби та зменшували наслідки людської життєдіяльності на стан довкілля. Значна залежність суспільства від традиційних джерел енергії та негативний вплив на довкілля, пов'язаний із використанням вугілля, деревини та інших природних паливних ресурсів, спонукають сучасну науку та технології активно розвивати

альтернативні джерела палива – як у вигляді альтернативних джерел енергії [17], так і на заміну викопному паливу [18]. Аналіз [19] свідчить про значні трансформації у сфері заміни використання традиційного викопного палива. Все більше уваги приділяється переробці рослинної сировини для енергетичних потреб [17, 20].

Альтернативним та перспективним методом застосування вторинної сировини з природними волокнами є виробництво твердого палива, яке використовується у різному сформованому вигляді, проте, найбільш поширеними є брикети [21] та гранули [22] різної форми та розмірів. Сформоване тверде паливо має ряд важливих переваг, однією з найважливіших є те, що дрібні частинки не виносяться з тепловим потоком і не стають причиною відкладення забрудненого шару вуглецевого походження на стінках теплового обладнання.

Паливні брикети та гранули є екологічним джерелом енергії, використовуваної в комунальній енергетиці для опалення житлових будівель та технічних приміщень. Енергія, необхідна для виробництва гранул, становить приблизно 20% від усіх енергозатрат виробництва [23, 24]. Тверде паливо у вигляді гранул поширене за рахунок швидкості згоряння [25].

Процес перетворення рослинної сировини у твердопаливні брикети характеризується початковим ущільненням матеріалу за рахунок зменшення вільного об'єму наявного у сировині. В результаті підвищення тиску процесу пресування виникають не тільки пружні, але й пластичні деформації. Це приводить до збільшення сил міжмолекулярної взаємодії між частинками, і як наслідок покращується адгезія матеріалу та підвищується міцність. Для вдалого формування твердопаливних брикет процес пресування проводять за тиску $100\div 200 \text{ МН/м}^2$ [26].

Брикетування рослинної сировини може здійснюватися з використанням в'язучого матеріалу або ж без нього. У випадку використання в'язучого матеріалу щільність отриманих зразків буде вищою, що потребує більшої кількості енергії для утворення брикету. Як в'язучий компонент при

брикетуванні використовують різні матеріали природнього та штучного походження: крохмаль [27], папір [28], смола [29], відходи промисловості [30] та ін. Використання в'язучих компонентів має вплив на склад утворених при згорянні палива газів.

У разі брикетування без додаткового використання в'язучого матеріалу, зв'язування рослинної сировини відбувається за рахунок лігніну, наявного в самому матеріалі. За температур, близьких до $150\div 200$ °С, та високих тисків, лігнін переходить у рідкий стан та розподіляється по всьому об'єму сировини [21]. Після певного часу, брикет виходить з пресувальної машини, та в результаті різкого зменшення температури при контакті з повітрям, відбувається твердіння лігніну, який і формує механічні властивості утвореного продукту [25].

На якість утворених брикетів також впливає вологість вихідної сировини. В загальному випадку це значення повинне бути в межах $7\div 14\%$ [20]. При більшій вологості, внутрішній тиск води, що виникає під час пресування сировини, не дозволить сформувати якісні брикети і призведе до їх розшарування.

Для виробництва твердопаливних брикетів у промисловості найчастіше використовуються поршневі, шнекові та гідравлічні преси. За допомогою гідравлічних пресів зазвичай утворюють брикети у вигляді паралелепіпедів, форма яких користується великим попитом. Пресування на даних апаратах здійснюється циклічно. Вихідна сировина завантажується у матрицю, після чого відбувається формування брикету за допомогою пуансону. Після заданого часу пресування, брикет виходить з форми за допомогою виштовхувачів, та цикл повторюється знову [31].

1.2 Перспективна рослинна сировина, що підлягає використанню як тверде паливо

Традиційне тверде паливо – вугілля та деревина – є повільновідновлювальними або невідновлювальними природніми ресурсами, надмірне використання яких шкодить довкіллю. На жаль, у країнах, що

розвиваються часто немає альтернативи їх використанню [32]. За оцінкою [33], близько 2,6 мільярда людей використовують традиційне тверде паливо для опалення та приготування їжі, що чинить тиск на лісові масиви планети.

Як альтернатива традиційному твердому паливу, поширене використання у енергетичних цілях відновлювальної біомаси, що володіє достатніми теплотворними характеристиками [34, 35]. В Україні це насамперед швидкоростуча рослина міскантус [36] та енергетична верба [37]. Дана рослинна сировина використовується завдяки своєму швидкому росту і високій теплотворній здатності. Хоча відомо, що Україна посідає одне з останніх місць у Європі у сфері виробництва теплової енергії з біопалива ($\leq 1\%$), в той час як у багатьох європейських країн цей показник вище 50% [38].

Щодо світової практики, то орієнтація йде на локальну сировину, або таку, що пристосовується до локальних умов вирощування, наприклад, сорго [39] або цукрова тростина [40]. Також поширеним є використання природньої вторинної сировини рослинного походження, наприклад, листя кокосу [41], рисового лушпиння [42], пальмових кісточок [43], водоростей [44] та ін.

Для країн Європейського Союзу існують рекомендації щодо сировини, зважаючи на кліматичні зони – наприклад, для континентальної зони рекомендовано вербу, тополь, міскантус, кукурудзу, соняшник, ріпак, сорго, льон тощо, а для півдня середземномор'я – арундо тростинний, артишок іспанський, евкаліпт, сорго, льон [45].

З іншого боку в Україні, окрім швидкоростучих трав, для паливних цілей використовують подрібнені стебла сільськогосподарських культур, наприклад, стебел соломи, кукурудзи або соняшника [46–48]. Відходи сільськогосподарських культур характеризується нижчою теплотворною здатністю та високим рівнем золи, що є недоліком при спалюванні [49].

Використання швидкоростучих трав та відходів сільськогосподарських культур вимагає їх попереднього культивування та переробки [45]. З іншого боку, невикористовувані природні ресурси часто можуть бути задіяні без

додаткових капіталовкладень або іншої діяльності, зважаючи на локальні географічні особливості.

У даному випадку мова йде про вторинну сировину рослинного походження, що у значних кількостях утворюється на промислових підприємствах [50]. Однією із проблем, що пов'язані із цим, є накопичення величезних об'ємів вторинної сировини, що часто не може зберігатись протягом тривалого часу, зважаючи на надлишкову вологість, і, псууючись, стає чинником забруднення навколишнього середовища [51, 52].

Також цікавою до використання як альтернативного твердого палива є сировина рослинного походження, що зростає у великих кількостях на території України та є вільнодоступною у лісових та паркових зонах.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Одним з побічних продуктів спиртових промислових виробництв є післяспиртова барда [53]. Вона утворюється в процесі бродіння рослинної сировини. За своєю природою – це неоднорідна рідина з подрібненими частинками зернової фракції, середовище якої має кислу реакцію, тобто рН становить близько 3,8÷4,6 [54]. Забарвлення післяспиртової барди може змінюватися від світло-коричневого до жовтого кольору. Зазвичай, у виробництві етилового спирту як вихідну сировину використовують більшість зернових культур, таких як кукурудза, ячмінь, жито, пшениця.

Залежно від технології виробництва на конкретному підприємстві, при утворенні 1 літру етанолу може паралельно утворюватися близько 10÷15 літрів післяспиртової барди [55, 56]. Натомість вміст сухих речовин в такому продукті становить всього лише приблизно 10%, що призводить до швидкого псування. Термін придатності такої барди лімітується декількома днями. Значна надлишкова вологість цього продукту ускладнює наступне її використання та обмежує зону застосування. Транспортування та тривале зберігання післяспиртової барди є надзвичайно не економічним рішенням внаслідок особливостей даного побічного продукту спиртової промисловості.

Світове виробництво спирту постійно зростає, оскільки використовується у різноманітних галузях промисловості, серед яких хімічна, харчова, фармацевтична та інші. Обсяги утворення післяспиртової барди в усьому світі сягають великих масштабів, адже, для прикладу, лише в Україні працює понад 80 спиртзаводів, в процесі роботи яких може протягом року утворюватися приблизно $3,6 \div 3,8$ млн m^3 зернової та 4 млн m^3 мелясної барди [57]. Враховуючи перелічені властивості післяспиртової барди, можна однозначно стверджувати, що вона є відходом промислових виробництв, який зазвичай піддають утилізації.

Післяспиртова барда надзвичайно цінна своїм хімічним складом. Основними компонентами, які входять в склад барди є (%): цукри $0,2 \div 0,45$; гліцерин $0,4 \div 0,6$; целюлоза $0,4 \div 0,6$; крохмаль $0,1 \div 0,2$; геміцелюлоза $1,4 \div 2,3$. Також у післяспиртовій барді присутні білки, амінокислоти (триптофан, лізин, метіонін, цистин, треонін), вітаміни (нікотинова і фолієва кислоти, біотин), макро- і мікроелементів, вуглеводи [54].

Зважаючи на цінний хімічний склад післяспиртової барди її піддають частковому процесу зневоднення на спеціальних сепараторах. В такому випадку отримують сировину, вміст води в якій сягає позначки $50 \div 60$ %. Далі, таку післяспиртову барду, використовують для годівлі тварин в сільському господарстві, так як за вмістом протеїну, амінокислот та інших поживних речовин, які відіграють важливу роль в процесі обміну речовин та процесах росту тварин вона випереджає більшість відомих кормових продуктів. Проте такий спосіб зневоднення не приводить до збільшення терміну зберігання. Тому, таке використання даного продукту, економічно вигідне лише у зонах, розташованих близько до промислово об'єкта виробництва.

Ефективним методом збільшення терміну експлуатації післяспиртової барди та сфери застосування є її сушіння. Проте, даний спосіб призведе до збільшення собівартості продукту. Разом з тим виникне питання у доцільності та економічності використання сушіння післяспиртової барди.

Післяспиртова барда може бути повторно використана як харчовий продукт для тварин [6], як удобрення сільськогосподарських земель [58], а також отримання біогазу [59].

Також відомо декілька можливих напрямків застосування висушеної післяспиртової барди, одним з яких є використання даного продукту як пластифікатора бетонних сумішей. Однак цей спосіб не одержав розвитку з огляду на низький вміст сухих та проблематику транспортування, що робило невідповідним застосування барди [54].

Зважаючи на великі об'єми утворення післяспиртової барди, виникає необхідність у повторному використанні даної сировини рослинного походження, що разом з тим покращить екологічну ситуацію шляхом зменшення негативного ефекту на стан довкілля.

Ячмінна дробина пивоварень

Пивна дробина – це побічний продукт, що утворюється під час фільтрування пивного сусла від твердих частинок зерна на пивному виробництві. [60]. Пивна дробина є твердим залишком, що складається із лушпиння, частинок перикарпію та насінневої оболонки зерна солоду [61]. За своєю природою пивна дробина складається з лушпиння зерна ячмінного солоду в поєднанні з частинами перикарпію та шарами насінневої оболонки ячменю. Склад цих відходів може змінюватися, залежно від типу використовуваного ячменю, способу його вирощування та інших факторів.

Пивна дробина є основним побічним продуктом пивної промисловості і її об'єм становить орієнтовно 85% від усіх відходів [62]. Споживання пива у світі зростає, і обсяги утвореної пивної дробини також – на даний час щорічно утворюється понад 30 млн. тон [63]. Обсяги утворення пивної дробини сягають великих масштабів, бо пиво вважається п'ятим за кількістю споживаних напоїв в усьому світі. Станом на 2018 рік, світове виробництво пива сягало майже 182 мільйонів тон, в той час як в Європі вироблялося орієнтовно 52 мільйонів тон. В

той же час обсяги утворення пивної дробини у Європі становлять близько 3,4 мільйонів тон щорічно [64].

У процесі промислового виробництва утворюється приблизно 15÷20 кг дробини на кожні 100 літрів пива, що становить майже 31% початкової маси солоду [65]. Даному побічному продукту характерна висока вологість [66], що призводить до швидкого псування продукту. Термін придатності при цьому становить орієнтовно 2÷3 дні [52], що ускладнює можливість наступного використання та обмежує зону застосування дробини. З огляду на це, тривале зберігання та транспортування пивної дробини є надзвичайно не економічне.

Незважаючи на те що пивна дробина є побічним продуктом, вона цінується своїм багатим хімічним складом. Даний продукт містить наступні компоненти: білок (31%), пентозани (19%), лігнін (16%), крохмаль і β -глюкани (12%), целюлоза (9%), ліпіди (9%) та зола (4%) [61].

Низька вартість, доступність та цінний хімічний склад дозволяє використовувати пивну дробину як кормову добавку до раціону сільськогосподарських тварин. Її можна згодовувати худобі безпосередньо у вологій стадії або після обробки та сушіння [60, 63].

Принципи раціонального природокористування вимагають повторного використання побічних продуктів. Відомо, що пивну дробину, зважаючи на високий вміст в ній білка і клітковини, додають в їжу для людей [67]. Дробину висушують, подрібнюють та просіюють в результаті чого утворюється порошок. Отриманий продукт містить високий вміст клітковини та білка, а також знижує калорійність харчових продуктів. Можливим є заміна борошна обробленою дробиною з додаванням у хліб [68] та печиво [69] та інші хлібобулочні вироби [60].

Відомо також про дослідження використання пивної дробини для удобрення сільськогосподарських земель. Високий вміст білка в даному продукті забезпечує необхідну кількість азоту в ґрунті, що є ідеальним для багатьох сільськогосподарських культур, таких як буряк, шпинат, капуста та

цибуля. Спостерігається також позитивний вплив на швидкість проростання рослин при поєднанні дробини з компостом [66].

Серед можливих сфер застосування пивної дробини також можна виокремити отримання біогазу. У результаті анаеробного бродіння отримують суміш газів, які складаються з метану 55÷65%, вуглекислого газу 30÷45%, невеликої кількості сірководню та фракції водяної пари [60, 62].

Усі наведені сфери застосування потребують частково або повного осушення пивної дробини, що дозволяє збільшити терміни необхідного зберігання, транспортування та її застосування як вторинної сировини.

Відходи кавового виробництва

З кожним роком спостерігається стабільне зростання попиту на каву у всьому світі – і Україна не є винятком. Серед країн Європи саме в Україні спостерігається один з найбільших темпів росту споживання натуральної зернової кави. Відповідно до аналітичних даних, у 2019 році було відкрито на 16% більше нових кав'ярень, ніж у 2018 році [70]. Також, незважаючи на пандемію COVID-19, у 2020 році спостерігається позитивна динаміка загальної кількості кав'ярень у порівнянні з 2018 роком.

Разом із збільшенням попиту на каву, пропорційно зростають обсяги кавового виробництва і, відповідно, – частка утворюваних промислових відходів, а саме кавового шламу [71, 72]. Станом на 2019 рік споживання кави у Європі становило ~ 34 % від світового, що рівне 3356 тисяч тон [70]. В середньому на 1 тону готового кавового продукту припадає орієнтовно 2 тони кавових відходів [73]. Кавова промисловість генерує величезні обсяги рослинних відходів [74], які не лише займають багато місця на сміттєзвалищах, але й спричиняють негативний вплив на довкілля внаслідок виділення парникових газів під час розкладання [71].

Незважаючи на те, що кавовий шлам є побічним продуктом у виробництві кави, даний продукт має цінний хімічний склад. Орієнтовно 50,5 % кавового шламу складають полісахариди представлені у вигляді целюлози (12,4 %) та

геміцелюлози (39,1 %). Кавовий шлам також містить білок (17,44 %), жири (2,29 %), азот (2,79 %), золу (1,3 %). Також варто зазначити, що у цьому продукті наявний лігнін у досить великій кількості – 23,9 % [75]. Вміст лігніну у кавовому шламі є вищим за значення у інших лігноцелюлозних матеріалах, таких як післяспиртова барда, пивна дробина (16,0 %) [76] та жом цукрової тростини (18,93 %) [77].

Зважаючи на те, що кавовий шлам є природним джерелом антиоксидантної нерозчинної клітковини, містить незамінні амінокислоти та є стійким до термічної обробки, його можна використовувати у пекарнях для виготовлення хлібобулочних виробів та печива. Досліджені харчові продукти володіли високою харчовою цінністю та з потенціалом зниження хронічних захворювань серед яких ожиріння та діабет [71].

Великі обсяги утворення кавового шламу дозволяють використовувати його для отримання біопалива. Шляхом екстракції з даного матеріалу добувають олію, яку згодом перетворюють на біодизель [78, 79]. Безолійний залишок піддають процесу ферментації з метою утворення біоетанолу [80].

Хоч це і перспективно для практичного використання, кавовий шлам зазвичай не піддають переробці, а просто утилізують. Відходи виробництва кави, як правило, володіють надлишковою вологістю, що є причиною їх швидкого псування. Серед найпоширеніших методів утилізації є зосередження відходів на сміттєзвалищах, або ж спалення [81]. Ці методи є неефективними, завдають значної шкоди навколишньому середовищу і погіршують загальну екологічну ситуацію – ефект у місцях зосередження відходів поступово накопичується у всьому світі.

Беручи до уваги високий вміст лігніну у кавовому шламі, можна стверджувати про можливість та перспективність використання цієї вторинної сировини для виготовлення альтернативного твердого палива. На сьогодні вже відомі випадки застосування кавового шламу для виготовлення твердого палива. Так у роботі [73], автори проводять дослідження виготовлення пелет з суміші кавового шламу та соснової тирси, змінюючи співвідношення компонентів у

вихідній суміші для паралельних дослідів. У роботі [81] автори, з метою переробки кавового шламу, використовують його суміш разом із попередньо подрібненими паличками для їжі та поліпропіленовими ложками. В обох випадках результати досліджень показали доцільність використання кавового шламу для виготовлення біопаливних пелет.

Буряковий жом

Цукровий буряк є другим за значимістю джерелом цукру у світі після цукрової тростини і вирощується приблизно в 57 країнах-виробниках цукру. У 2009 році приблизно 20% світового виробництва цукру (153,4 млн тон) було отримано з цукрового буряка [82].

Буряковий жом – це кормовий відхід цукробурякового виробництва, що утворюється після видалення соку з бурякової стружки, становить основну частину відходів цукрового виробництва. З однієї тони буряків на суху масу можна отримати приблизно 130 кг цукру та 50 кг сушеного жому [82]. Зважаючи на значні щорічні обсяги переробки цукрових буряків в Україні, обсяг бурякового жому є величезним – навіть під час російської збройної агресії, обсяги врожаю цукрового буряка були на рівні ≈ 10 млн. тон у 2023 році [83].

Буряковий жом, як і більшість відходів рослинного походження харчової промисловості, володіє надлишковою вологістю ($< 65\%$ мас.), що призводить до його швидкого псування. 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. На сьогодні висушують приблизно 9% від загального обсягу жому, і не всі цукрові заводи обладнані сушильними установками та пресами глибокого віджиму, тому більша його частина направляється у жомосховища [84]. Тривале зберігання неосушеного жому не тільки призводить до втрати поживних речовин, але й погіршує екологічну ситуацію навколо заводу [85].

Один із основних традиційних напрямків застосування свіжого бурякового жому – його використання як корм у тваринництві [86]. На одну тунну перероблених буряків можна отримати приблизно 50 кг сухого жому, що містить 48÷50% пектинових речовин, 22÷25% целюлози, 21÷23% геміцелюлози, 1,8÷2,5% азотистих речовин, 0,8÷1,3% золи, 0,15÷0,20% цукру, а також органічні кислоти, вітаміни та мікроелементи [87]. Пектинові речовини з бурякового жому можуть бути використані у виробництві харчових волокон, які додаються до хліба, печива, спагеті та м'ясних продуктів [88].

Після ензиматичної або хімічної обробки пектин з жому може бути перетворений на пектин-олігосахариди, які мають пребіотичні властивості [89]. Ще одним важливим вуглеводом у пектині буряка є арабінан, який також може використовуватись як пребіотик [90].

Буряковий жом є перспективною сировиною для виробництва біоетанолу, який є альтернативним джерелом відновлюваної енергії. Використання бурякового жому для біоетанолу не вимагає складної підготовки, оскільки цукровий буряк, може бути безпосередньо перетворений в етанол [91]. Це робить процес менш енергозатратним порівняно з іншими видами сировини, такими як крохмалісті або лігноцелюлозні матеріали [92].

Також існують дослідження щодо використання бурякового жому як зв'язуючого компонента у вугільних брикетах [93, 94]. Додавання жому підвищує міцність на стиск та зменшує вміст летких речовин. Отримані брикети мають трохи меншу теплотворну здатність, ніж брикети без додавання рослинної сировини, але вона залишається в допустимих межах.

Загалом, буряковий жом як відхід цукрової промисловості вважається цінним ресурсом з погляду концепції циркулярної економіки [95].

З урахуванням свідчень про успішне застосування бурякового жому як в'язуючого компонента у альтернативному твердому паливі [93, 94], проведення досліджень з використання бурякового жому для виробництва альтернативного твердого палива є перспективним.

Яблучні вичавки

Яблучний жом або яблучні вичавки, які утворюються на консервуючих та переробних підприємствах не є винятком і мають широку сферу вторинного застосування. Є відомості про використання яблучних вичавок як харчової добавки до ковбас [96] та нагетсів [97], додатково насичених клітковиною. Також яблучний жом використовують для як створення спеціалізованого яблучного борошна [98], а також як добавка до борошна [99], зокрема безглютенового [100]. Окремо необхідно відмітити напрям цільового одержання пектину [101], який є цінним стабілізатором, згущувачем та емульгатором у харчовій промисловості. До того ж, пектин має біомедичні властивості, наприклад, виведення токсинів і зниження рівня холестерину в крові [101].

Яблучні вичавки можуть бути використані для виробництва біодизелю [102] та біоетанолу [103]. Також різними шляхами розвивається біоконверсія яблучних вичавок у біогаз, що надає можливість виробляти відновлювану енергію у вигляді метану – досліджується вплив вуглецевих електропровідних матеріалів та добавок мікроелементів на покращення виробництва біогазу [104], анаеробне зброджування із залишками м'ясної промисловості [105] або спільно із перегноєм та іншими рослинними відходами [106].

Яблучний жом є привабливим для виробництва біочару [107], що може навіть бути використаний для створення Na-йонних акумуляторів [108]. Можливим напрямком є застосування яблучних вичавок для синтезу біополімерів [109] та плівок на біологічній основі [110].

Зважаючи на високий вміст лігніну у яблучних вичавках, що становить орієнтовно 15÷20% [111] було доцільним виконати оцінку можливості їх використання як сировини для альтернативного твердого палива.

Жолуді

Дуб звичайний (*Quercus robur L.*) відіграє ключову роль у формуванні лісового покриву листяних лісів України. Дубові насадження займають 46% (приблизно 284 000 гектарів) загальної площі лісів у північно-східному регіоні

[112]. За даними [113, 114], у 2020 році загальна кількість жолудів становила 9900-19000 штук на гектар з загальною масою 26,8-54,1 кілограмів на гектар, а у 2021 році — 8600-17200 штук на гектар з загальною масою 22,7-48,4 кілограмів на гектар.

При цьому, плоди даного дерева, жолуді, мають значний потенціал для застосування у різних сферах господарської діяльності, зважаючи на те, що їх можна розглянути як низьковартісну відновлювану рослинну сировину. Класично їх використовують як корм для тварин, зокрема, свиней [115]. Також відомо, що жолуді мають значну харчову цінність для людини, оскільки вони багаті на незамінні жирні кислоти, такі як лінолева та ліноленова, а також містять токоферол [116], що сприяє покращенню фізіологічних процесів в організмі [117]. Однак, вміст корисних речовин у жолудях може значно відрізнятись залежно від виду дуба та географічного розташування дерев.

Інша сфера можливого використання – енергетична. Жолуді мають великий потенціал для виробництва біопалива, що відкриває широкі перспективи для сталого розвитку та є кроком до енергетичної незалежності. Олія, яка виділяється з цих плодів, може бути використана для виробництва біодизелю [118, 119], що допомагає зменшити залежність від традиційних паливних ресурсів та мінімізувати викиди шкідливих речовин в атмосферу. Крім того, крохмаль з жолудів може бути використаний для виробництва біоетанолу [120] та біобутанолу [121, 122], що також сприяє розвитку екологічних альтернативних джерел енергії.

Оскільки жолуді містять значну кількість лігніну, що становить орієнтовно 30% мас. [123], існує потенціал використання їх як сировини для виробництва альтернативного твердого палива без використання додаткових в'язучих. Дослідження [123] показали, що жолуді коркового дуба (*Quercus suber*) є ефективною сировиною для цієї мети. Проте у даному дослідженні не наведено даних про вищу теплотворну здатність та зольність альтернативного твердого палива із жолудів дубу звичайного та жолудів загалом.

Каштани

Каштани широко розповсюджені по усій земній кулі [124], плоди цих дерев мають практичне використання. На 2020 рік одним з найбільших виробників каштанів у світі є Китай, де вирощують 1,965 млн. тон, в той час як світове виробництво становить орієнтовно 2,353 млн. тон [125]. Серед країн із значними об'ємами вирощування каштанів є також Болівія (84,01 тис. тон), Туреччина (63,58 тис. тон), Республіка Корея (53,384 тис. тон) та Італія (53,28 тис. тон) [125].

Структурна будова плоду каштана є складною та функціонально важливою для забезпечення життєздатності насіння. Плід складається з декількох шарів, кожен з яких виконує свою функцію. Зовнішня оболонка має захисну роль, допомагаючи зберегти внутрішні шари від пошкоджень та впливу навколишнього середовища. Внутрішня каштанова шкірка, або ендокарп, є твердою та жорсткою структурою, що оточує внутрішнє ядро. Цей шар захищає плід від механічних пошкоджень та допомагає утримувати ядро. Внутрішнє ядро може бути поділене на декілька сегментів. Кожен сегмент містить поживні речовини, які роблять каштани цінними з практичної точки зору [126].

Плоди каштанів мають багатий склад мікро- та макроелементів, включаючи целюлозу, вуглеводи, білки, жири, вітаміни та мінерали [127, 128]. Певні види каштанів використовують як харчовий продукт у багатьох країнах світу [129] – як безпосередньо у їжу, так і для виготовлення борошна [130] та борошняних виробів – наприклад, безглютенового печива та хліба [131].

У фармацевтиці каштани знаходять своє місце завдяки антиоксидантам та вітамінам, які підтримують імунітет та загальний стан організму. Їх використовують для полегшення запальних процесів, застосовують для лікування хронічної венозної недостатності, каштани позитивно впливають на венозний тонус, реологічні властивості та згортання крові [126]. Екстракти каштану також використовують у продуктах догляду за шкірою [132].

Паралельно відмітимо, що далеко не всі види каштанових плодів використовують з корисною метою. Одним з таких видів є гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*), що є родичем традиційних каштанів, та

належить до родини сапіндових (*Sapindaceae*). Дана рослина набула застосування в основному лише у фармакології, з огляду на хімічний склад, а саме вмісту до 28 % (від ваги сухого плода) суміші токсичних сполук – сапонінів [132]. Хоча відмітимо, що сапоніни також широко використовуються в харчовій промисловості для піноутворення [133, 134].

Зважаючи на позитивний досвід використання вторинної сировини рослинного походження як джерела для альтернативного твердого палива, викликає інтерес дослідження плодів гіркокаштану звичайного з аналогічною метою. Зважаючи на структуру та вміст плодів гіркокаштану звичайного, вони мають потенціал використання для енергетичних потреб; бути придатними для брикетування та пелетування; згоряти ефективно та без значної кількості шкідливих викидів. До переваг використання цієї рослинної сировини також можна віднести її дешевизну, доступність, низьку здатність адсорбувати міські викиди. Крім того, плоди гіркокаштану звичайного є природним відновлюваним ресурсом, який може бути вирощений на різноманітних ґрунтах як окремо, так і на сумісних посадках з іншими деревними культурами.

1.3 Аналіз тепломасообмінних та гідромеханічних процесів під час підготовки вторинної сировини рослинного походження для виготовлення альтернативного твердого палива

Сушіння є складним теплофізичним та масообмінним процесом видалення вологи, який широко застосовують на заключних стадіях багатьох технологічних процесів, і від організації якого в значній мірі залежать якість та собівартість готової продукції [6]. Незважаючи на численні дослідження альтернативних методів сушіння, наприклад, з використанням сонячної енергії [135], технології «теплового насосу» [136] або їх поєднання [137], традиційні методи сушіння залишаються широко розповсюдженими. Відомо, що орієнтовно 10÷12 % всієї енергії в світі витрачається на процеси термічного зневоднення [138, 139] і у більшості випадків на процеси сушіння використовують у 2,5÷3 рази більше енергії, ніж це потрібно для видалення вологи з осушуваних матеріалів. Таким

чином, якщо оптимізувати стадію осушення, можна досягнути значного економічного ефекту у собівартості та раціоналізувати використання енергоресурсів. Питання енергозбереження на стадії сушіння рослинної сировини є важливим та перманентно досліджуваним [140], описуються математичні моделі тепломасообміну [141], для виробництва твердопаливних брикет зокрема [142].

Для подрібнених вологих матеріалів у промисловості зазвичай застосовують три способи сушіння (термічного зневоднення): фізико-хімічне, механічне, та найбільш поширене – теплове [138]. Серед теплових способів найпопулярнішим є конвективне сушіння [143], за якого тепловий агент безпосередньо контактує з осушуваним матеріалом.

Відомо, що для сушіння біомаси широко використовують сушарки барабанного типу [144, 145]. Проте дані сушарки мають ряд недоліків, до яких відносять велику тривалість сушіння, габарити установки, необхідність додаткового обладнання для очищення відпрацьованого теплового агента, значні втрати теплоти у довкілля. Зважаючи на це, постає потреба у ефективнішому методі сушіння та його апаратурному оформленні.

Відомим та високоефективним методом пониження вологості дисперсних матеріалів є фільтраційне сушіння [146, 147]. Принцип фільтраційного сушіння полягає у тому, що тепловий агент під дією перепаду тисків рухається крізь пористу структуру листового газопроникного матеріалу [147]. Процес тепломасообміну відбувається на внутрішньо-капілярній поверхні, яка перевищує геометричну поверхню висушуваного матеріалу. В процесі фільтраційного сушіння має місце механічне витіснення і винесення вологи залежно від її природи зв'язку з матеріалом, високий ступінь використання теплової енергії. За такої реалізації процесу відбувається значна інтенсифікація сушіння у порівнянні з конвективним процесом зневоднення, а також суттєве зменшення питомих енергозатрат [146]. Львівська політехніка протягом багатьох років є одним з провідних наукових центрів, який займається дослідженнями в галузі тепломасообміну та, зокрема, фільтраційного сушіння.

Науковці Львівської політехніки зробили значний внесок у розвиток теоретичних основ та практичних застосувань цього процесу [147–154].

На відміну від конвективного сушіння, де тепловий агент контактує з поверхнею матеріалу, при фільтраційному сушінні, коли тепловий агент проходить крізь пористий матеріал, виникає зона інтенсивного масообміну, де волога випаровується і переноситься потоком газу. Висота зони масообміну визначається вологістю осушуваного матеріалу та параметрами теплового агенту [155].

Детально механізм фільтраційного сушіння описаний у роботах [146, 147]. Тепловий агент профільтровується через шар матеріалу внаслідок різниці тисків над і під перфорованою перегородкою, на якій розміщено шар вологого матеріалу (рис. 1.1). Автором встановлено, що під час руху зони масообміну у напрямку до перфорованої перегородки основні етапи фільтраційного сушіння поділяються на (рис. 4.1) [147]:

- механічне витіснення;
- формування фронту масоперенесення;
- одночасне існування першого і другого періодів сушіння;
- одночасне існування сухого матеріалу, першого і другого періодів сушіння, та вологого матеріалу;
- досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки;
- існування лише другого періоду сушіння.

Перший та другий періоди сушіння у випадку фільтраційного сушіння є, відповідно, періодами повного та часткового насичення теплового агенту вологою.

Відмітимо, що ефективність процесу сушіння матеріалу значною мірою залежить від площі поверхні теплообміну. Фільтраційне сушіння, завдяки інтенсивному контакту теплового агенту з кожною частинкою матеріалу, є одним з найбільш ефективних методів [151]. Інтенсивність теплообміну на поверхні частинки визначається гідродинамічними умовами обтікання [152], а

саме – коефіцієнтом тепловіддачі. Хоча фільтраційне сушіння дозволяє досягти високих значень швидкості та коефіцієнта тепловіддачі, їхнє збільшення обмежується економічними міркуваннями, на відміну від інших методів сушіння [153].

Фільтраційне сушіння відрізняється від інших методів сушіння можливістю використання теплового агента з відносно низькою температурою (до 100 °С), який при цьому максимально насичується водяною парою [156]. Це призводить до значного зниження теплових втрат з відхідними газами.

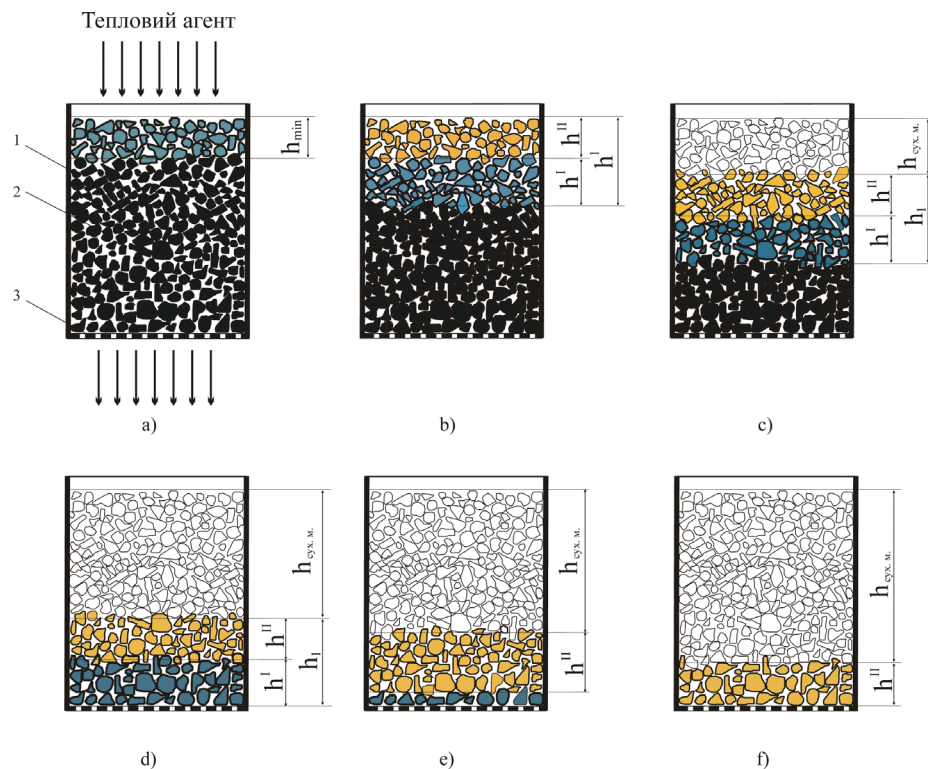


Рис. 1.1. Механізм фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [146]:

1 – контейнер; 2 – дисперсний матеріал; 3 – перфорована перегородка;

а) – механічне витіснення; б) – формування фронту масоперенесення висотою h_{min} ; в) – одночасне існування першого (h^I) і другого (h^{II}) періодів сушіння; г) – одночасне існування сухого матеріалу ($h_{сух.м.}$), першого і другого періодів і вологого матеріалу; д) – досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки; е) – існування лише другого періоду сушіння

Ще однією перевагою є те, що температура на виході з шару матеріалу під час сушіння близька до температури мокрого термометра, що дозволяє уникнути

перегріву матеріалу. Крім того, фільтраційне сушіння можна проводити при швидкостях потоку теплового агента, нижчих за швидкість псевдозрідження, що зменшує гідравлічні опори процесу порівняно з сушінням у киплячому шарі або пневмосушарках [157]. Фільтраційний метод сушіння дає змогу зменшити габарити і металомісткість установок, знизити питомі затрати теплоти і електроенергії, покращити якісні показники матеріалів [158, 159].

Розглянемо детальніше тепломасообмінні аспекти фільтраційного сушіння. В загальному, фільтраційне сушіння ґрунтується на процесі тепломасообміну між вологим матеріалом та тепловим агентом, зазвичай повітрям, хоча це може бути й інший газ або перегріта пара. Суть процесу полягає у видаленні вологи з матеріалу шляхом цього обміну. У випадку фільтраційного сушіння, тепловий агент проходить крізь пористий шар матеріалу, забезпечуючи ефективний контакт та інтенсивний тепло- та масообмін [146].

Одним з ключових процесів є випаровування вологи з поверхні матеріалу у тепловий агент. Рушійною силою цього процесу є різниця парціальних тисків водяної пари на поверхні матеріалу та в тепловому агенті. Чим більша ця різниця, тим інтенсивніше відбувається випаровування. Важливими факторами, що впливають на парціальний тиск пари, є температура матеріалу та вологість теплового агента [160].

Після випаровування вологи з поверхні виникає градієнт концентрації вологи всередині матеріалу. Цей градієнт є рушійною силою для перенесення вологи з внутрішніх шарів до поверхні. Перенесення вологи може відбуватися за допомогою різних механізмів, таких як дифузія [161], тобто переміщення молекул води під дією градієнта концентрації; капілярний потік, коли вода переміщується по капілярах та порах матеріалу під дією капілярних сил; та термокапілярний ефект, що описує переміщення води під дією градієнта температури.

Тепловий агент передає тепло вологому матеріалу шляхом конвекції, що є основним механізмом у фільтраційному сушінні. Це тепло витрачається на

нагрівання матеріалу, тобто підвищення температури твердої фази матеріалу, та на випаровування вологи, тобто розрив зв'язків між молекулами води та матеріалом, що пов'язано з прихованою теплотою пароутворення. В результаті тепломасообміну тепловий агент охолоджується, віддаючи тепло матеріалу, та насичується вологою, забираючи її з матеріалу.

Фільтраційне сушіння характеризується інтенсивним контактом завдяки проходженню теплового агенту крізь пористий шар матеріалу, що забезпечує велику площу контакту та інтенсивний тепло- та масообмін. Завдяки фільтрації, сушіння відбувається відносно рівномірно по всьому об'єму матеріалу, що є особливо ефективним для матеріалів з пористою структурою.

На процес сушіння впливають такі фактори, як температура та вологість теплового агенту, що визначають рушійну силу випаровування; швидкість потоку теплового агенту, що впливає на інтенсивність тепло- та масообміну; властивості матеріалу, такі як пористість, вологість, теплопровідність та розмір частинок; товщина шару матеріалу, що впливає на гідравлічний опір матеріалу до потоку теплового агенту, а також тривалість сушіння. Розуміння цих процесів є важливим для оптимізації процесу фільтраційного сушіння та досягнення бажаної консистенції продукту з мінімальними енергетичними витратами.

Для ефективного сушіння дисперсних матеріалів необхідно забезпечити видалення як поверхневої вологи, розташованої на поверхні частинок та в міжчастинкових просторах, так і капілярної вологи, що заповнює пори та капіляри всередині вологого матеріалу.

Швидкість видалення вологи з твердих частинок обмежується зовнішньою дифузією, тоді як видалення вологи з пористої структури матеріалу визначається дифузією внутрішньою [162, 163]. Зміна цих процесів у часі обумовлює поділ процесу для сушіння на два основні періоди – для фільтраційного сушіння це період повного насичення теплового агенту вологою та період часткового насичення теплового агенту вологою. За своїм змістом період повного насичення теплового агенту вологою триває до досягнення фронтом тепломасообміну перфорованої перегородки, на якій розміщено вологий матеріал [164].

Інтенсивність процесу сушіння, з огляду на зовнішню дифузію, визначається різницею концентрацій водяної пари між поверхнею матеріалу і тепловим агентом, а також його температурою [146]. Визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії здійснюється шляхом розв'язання диференціального рівняння конвективної дифузії, яке описує нестационарний процес переносу речовини в середовищі з урахуванням як конвективного, так і дифузійного потоків:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} + v \cdot \left(\frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{\partial c}{\partial z} \right) = D \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \right) + q \quad (1.1)$$

де c – концентрація речовини, кг/м³;

τ – час, с;

v – дійсна швидкість газового середовища, м/с;

D – коефіцієнт дифузії, м²/с;

q – джерело вологи, кг Н₂О/м³·с.

Визначення ефективних коефіцієнтів внутрішньої дифузії вологи є важливим для вивчення закономірностей процесів сушіння матеріалів. Ці коефіцієнти дозволяють оцінити швидкість переміщення вологи з внутрішніх шарів матеріалу до його поверхні за різних температурних умов, що є необхідним для оптимізації енергоспоживання при сушінні.

Швидкість процесу фільтраційного сушіння знаходиться в прямій залежності від гідродинамічних умов процесу. Характер та режим руху теплового агенту в пористому середовищі визначає товщину ламінарного пограничного шару навколо частинок, що, в свою чергу, впливає на коефіцієнти тепловіддачі та масовіддачі, що визначають швидкість тепломасообміну [165].

Загальні втрати тиску у шарі сухого дисперсного матеріалу зазвичай описують рівнянням Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda_{ш} \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (1.2)$$

де $\lambda_{ш}$ – коефіцієнт опору шару;

H – висота шару, м;

d_e – еквівалентний діаметр, м;

ρ – густина газового середовища, кг/м³.

Втрати тиску в шарі вологого матеріалу визначають за його геометричними характеристиками (висотою шару, розміром і формою частинок, пористістю) та властивостями теплового агента (щільністю, в'язкістю). Ці фактори впливають на гідродинамічний опір шару і, як наслідок, на інтенсивність тепло- і масообміну [47].

Теоретичний опис руху рідин або газів у пористих матеріалах дають рівняння Нав'є-Стокса [166]. Однак, вони є надзвичайно складними для аналітичного розв'язання [167], особливо за наявності складних просторових геометрій пористих структур та взаємодії флюїду з твердою фазою. В інженерній практиці для спрощення розрахунків часто використовують моделі, засновані на рівняннях руху ідеальної рідини. Ці моделі доповнюються емпіричними співвідношеннями та ефективними параметрами, які враховують вплив пористості середовища, в'язкості рідини або газу та інших факторів. Незважаючи на спрощення, такі моделі дозволяють отримати задовільні результати для багатьох практичних задач. Для того, щоб ці моделі краще відповідали реальним умовам, до них додають додаткові члени та коефіцієнти [168].

З іншої сторони, існують сучасні програмні комплекси комп'ютерного моделювання газогідродинаміки, що автоматизують процес обрахунку за допомогою методу кінцевих елементів на основі існуючих залежностей, а також дають можливість візуалізації процесу [169]. До таких програм відносяться *ANSYS Fluent* [170], *SolidWorks Flow Simulation* [171], *Comsol Multiphysics* [172] та інші. Програмні комплекси інженерного аналізу успішно використовують для досліджень та оптимізації гідродинамічних аспектів [173–177].

Використання програмних комплексів комп'ютерного моделювання може допомогти описати гідродинамічні процеси під час фільтраційного сушіння і, тим самим, універсалізувати їх практичне використання для розрахунку сушильного обладнання.

Щодо процесу передачі теплоти в дисперсному шарі, то присутня сукупність складних фізичних явищ. Основними механізмами теплопередачі в таких системах є теплопровідність твердих частинок та молекулярна теплопровідність газу, що заповнює пори між ними. Хоча теплопередача випромінюванням також присутня, за низьких температур, характерних для багатьох технологічних процесів, її внесок є незначним.

Під час сушіння вологих дисперсних матеріалів в стаціонарних умовах, коли крізь шар фільтрується тепловий агент, домінуючим механізмом теплопередачі є конвекція. Рух теплового агенту сприяє інтенсивній передачі теплоти від теплового агенту до поверхні частинок матеріалу.

Математично процес теплообміну в стаціонарних умовах описують законом Ньютона-Ріхмана. Це рівняння встановлює лінійну залежність між тепловим потоком і різницею температур між тепловим агентом та поверхнею матеріалу:

$$Q = \alpha \cdot (t - T) \cdot F, \quad (1.3)$$

де Q – кількість переданої теплоти, Вт;

α – коефіцієнт тепловіддачі, Вт / м²·К;

t, T – температура теплового агенту і вологого матеріалу відповідно, °С;

F – поверхня теплообміну, м².

Згідно з дослідженнями, коефіцієнт тепловіддачі в процесі сушіння зернистих матеріалів є змінною величиною, яка значною мірою залежить від гідродинамічних умов потоку теплового агенту навколо частинок матеріалу. Неоднорідність швидкості потоку теплового агенту в шарі дисперсного матеріалу, зумовлена його пористою структурою, приводить до значних локальних змін коефіцієнта тепловіддачі. Для спрощення розрахунків та інженерних оцінок, на практиці часто використовують усереднені значення коефіцієнта тепловіддачі, які враховують інтегральний ефект теплообміну в об'ємі матеріалу.

Для математичного моделювання процесу теплопередачі від газового потоку до дисперсного матеріалу використовують систему диференціальних рівнянь, що описує рух в'язкої рідини, збереження маси та енергії. Оскільки аналітичне розв'язання цієї системи рівнянь є складним завданням, для дослідження теплообміну часто використовують експериментальні методи та теорію подібності. Загальний вигляд критеріального рівняння, що описує вимушений конвективний теплообмін на вологій поверхні, має вигляд:

$$Nu = 2 + A \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^m, \quad (1.4)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}$ – критерій Прандтля;

$Gu = \frac{t - t_{m.m.}}{t}$ – критерій Гухмана;

$t, t_{m.m.}$ – температура теплового агента і мокрого термометра, °С;

A, n, m – коефіцієнти, які залежать від режиму руху теплового агента і які визначають експериментальним шляхом.

Якщо під час теплообміну відбувається також процес масообміну, рекомендовано використовувати рівняння:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^{0,33} \cdot Gu^m \quad (1.5)$$

Незважаючи на значну кількість критеріальних рівнянь, запропонованих у літературі для узагальнюючого опису процесу сушіння [178], пряме застосування цих рівнянь до різних матеріалів та умов сушіння часто призводить до значних розбіжностей між теоретичними розрахунками та експериментальними даними. Тому для отримання достовірних результатів, як правило, проводять експериментальні дослідження, які дозволяють визначити значення цих коефіцієнтів для конкретних умов.

Висновки до першого розділу

1. Аналіз джерел літератури засвідчив важливу проблему пошуку та дослідження використання нових джерел для виготовлення альтернативного палива, а саме: вторинної сировини рослинного походження. Відомостей про

використання її як сировини для виготовлення твердого палива недостатньо для виготовлення та практичного використання.

2. Вторинна сировина рослинного походження володіє високою початковою надлишковою вологістю та вимагає стадії попереднього осушення для збільшення терміну придатності. Фільтраційне сушіння є відомим інтенсивним методом сушіння дисперсних матеріалів і може бути використане для осушення вторинної сировини рослинного походження. Проте, наявних теоретичних та експериментальних досліджень є недостатньо для оцінки ефективності використання методу фільтраційного сушіння для вторинної сировини рослинного походження.

3. Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння є важливим з огляду на енергетичні та економічні характеристики процесу. Використання сучасного програмного забезпечення дає змогу виконати моделювання газогідродинаміки руху теплового агенту.

4. Теоретичних і експериментальних досліджень зовнішнього і внутрішнього тепломасообміну під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження в технічній літературі недостатньо.

5. Відомостей щодо виготовлення альтернативного твердого палива на основі вторинної сировини рослинного походження та ефективності його використання у технічній літературі недостатньо.

6. Аналіз літературних джерел дозволив визначити основні напрямки досліджень тепломасообмінних процесів під час виробництва альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. До цих напрямків належать теоретичні та експериментальні дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння та її комп'ютерного моделювання; зовнішнього та внутрішнього тепломасообміну під час фільтраційного сушіння; кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння та їх узагальнення; закономірностей динаміки фільтраційного сушіння; виготовлення та дослідження характеристик альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження; розрахунок ефективності використання фільтраційного сушіння для сушіння

вторинної сировини рослинного походження. Ці напрямки лежать в основі мети дисертаційної роботи та визначають коло завдань, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети. Мета і завдання досліджень означені в загальній характеристиці роботи.

РОЗДІЛ 2

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИХ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ. ОПИС АПАРАТУРИ ТА ОБЛАДНАННЯ

У першому розділі на основі критичного аналізу джерел літератури було обґрунтовано доцільність проведення досліджень щодо використання вторинної сировини рослинного походження для виготовлення альтернативного твердого палива, а також важливість дослідження тепломасообмінних та гідродинамічних закономірностей, пов'язаних із попередньою підготовкою вихідної біомаси під час фільтраційного сушіння.

Умовно всі проведені експериментальні дослідження можна розділити на дві частини – дослідження, які пов'язані із визначенням закономірностей тепломасообміну та гідродинаміки під час попередньої підготовки вторинної сировини рослинного походження та дослідження теплотворних характеристик виготовленого альтернативного твердого палива із попередньо підготованої вторинної сировини рослинного походження.

Під час попередньої підготовки вторинної сировини рослинного походження за допомогою її осушення фільтраційним методом здійснювали дослідження кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння, дослідження гідравлічного опору стаціонарного шару матеріалу та динаміки процесу сушіння. Осушення рослинної сировини мало на меті з однієї сторони збільшити термін її використання, а з іншої – зневоднити матеріал до кондиції, за якої можливе створення твердопаливного зразка. За наявності надлишкової внутрішньої вологи у рослинній сировині, під час створення твердопаливного зразка за підвищеної температури відбуватиметься утворення надлишкового тиску від появи водяної пари, що негативно впливатиме на міцнісні характеристики, цілісність і форму твердого палива.

Інший напрямок досліджень був спрямований на створення зразків альтернативного твердого палива із осушеної сировини різного типу –

брикетованого та гранульованого – та дослідження їх основних енергетичних характеристик.

2.1. Основні характеристики вторинної сировини рослинного походження

Як об'єкти досліджень було обрано вторинну сировину рослинного походження – органічні відходи рослинного походження локальних підприємств харчової промисловості, що розташовані на території Західної України, а також природну рослинну сировину, яка широко поширена у регіоні та є придатною до використання для виготовлення альтернативного твердого палива.

Кукурудзяна післяспиртова барда. Для проведення експериментальних досліджень було використано кукурудзяну післяспиртову барду, одержану на виробничій лінії ДП «Вузьлівський спиртовий завод» (с. Вузьлове, Львівська область).

Кукурудзяна післяспиртова барда має наступні характеристики:

- початкова вологість $\omega = 72,78$ % мас.;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{в}} = 407,5$ кг/м³;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 3,65$ % мас.) $\rho_{\text{нас}}^{\text{ос}} = 232$ кг/м³;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,26$ м³/м³;
- питома поверхня $a = 5860$ м²/м³.

Таблиця 2.1

Фракційний склад частинок кукурудзяної післяспиртової барди, визначений за допомогою ситового аналізу

Розмір сита, мм	$d_{\text{частинки}}$, мм	% мас.
0,31÷0,63	0,47	8
0,63÷1,25	0,94	88
1,25÷2,5	1,86	4
$d_{\text{середнє}}$, мм	0,94	100

Ячмінна пивна дробина. Для проведення експериментальних досліджень було використано ячмінну пивну дробину, отриману на виробничій лінії ТзОВ «Пивоварня «Кумпель» (м. Львів, Україна).

Характеристики ячмінної пивної дробини були наступними:

- початкова вологість $\omega = 77,88$ % мас.;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^B = 451,74$ кг/м³;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 12,69$ % мас.) $\rho_{\text{нас}}^{\text{OC}} = 175,2$ кг/м³;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,42$ м³/м³;
- питома поверхня $a = 4085$ м²/м³.

Розміри частинок визначали за допомогою вимірювань електронним штангенциркулем SHANE 5110, проаналізовано понад 200 частинок ячмінної пивної дробини і встановлено усереднені розміри:

- діаметр частинки $d_{\text{частинки}} = 2,55$ мм;
- довжина частинки $l_{\text{частинки}} = 10,42$ мм.

Відходи кавового виробництва. Для проведення експериментальних досліджень було використано відходи виробництва кави виробничої лінії СП «Галка ЛТД» (м. Львів, Україна), що є сумішшю відходів кави, ячменю та цикорію.

Таблиця 2.2

Фракційний склад частинок відходів виробництва кави, визначений за допомогою ситового аналізу

Розмір сита, мм	$d_{\text{частинки}}$, мм	% мас.
0,31÷0,63	0,47	34
0,63÷1,25	0,94	29
1,25÷2,5	1,88	19
2,5÷5	3,75	11
5÷6	5,5	6
6÷10	8	1
$d_{\text{середнє}}$, мм	1,61	100

Характеристики відходів кавового виробництва були наступними:

- початкова вологість $\omega = 72,72$ % мас.;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{В}} = 379,99$ кг/м³;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 4,17$ % мас.)
 $\rho_{\text{нас}}^{\text{ОС}} = 165,48$ кг/м³;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,35$ м³/м³;
- питома поверхня $a = 3250$ м²/м³.

Буряковий жом. Для проведення експериментальних досліджень було використано буряковий жом з цукрових буряків, отриманий на виробничій лінії ТзОВ «Радехівський цукор» (с. Павлів, Львівська область, Україна).

Характеристики бурякового жому були наступними:

- початкова вологість $\omega = 88,12$ % мас.;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{В}} = 432,36$ кг/м³;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 11,11$ % мас.)
 $\rho_{\text{нас}}^{\text{ОС}} = 165,1$ кг/м³;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,62$ м³/м³;
- питома поверхня $a = 925$ м²/м³.

Розміри частинок визначали за допомогою вимірювань електронним штангенциркулем SHANE 5110, для частинок бурякового жому проаналізовано 200 частинок та встановлені наступні усереднені розміри:

- діаметр частинки $d_{\text{частинки}} = 6,41$ мм;
- довжина частинки $l_{\text{частинки}} = 38,5$ мм.

Яблучні вичавки. Для досліджень було використано яблучні вичавки, одержані на виробничій лінії групи компаній «ТВF Group» (м. Городок, Львівська область, Україна). Характеристики яблучних вичавок були наступними:

- початкова вологість $\omega = 83,06$ % мас.;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{В}} = 446,47$ кг/м³;

- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 9,99$ % мас.)
 $\rho_{\text{нас}}^{\text{ос}} = 202,37$ кг/м³;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,7$ м³/м³;
- питома поверхня $a = 1620$ м²/м³.

Розміри частинок визначали за допомогою вимірювань електронним штангенциркулем ШАНЕ 5110, проаналізовано 200 частинок яблучних вичавок та встановлено їх усереднені розміри:

- товщина частинки $h_{\text{частинки}} = 1,85$ мм;
- довжина частинки $l_{\text{частинки}} = 25,5$ мм;
- ширина частинки $s_{\text{частинки}} = 17,78$ мм.

Жолуді. Для проведення експериментальних досліджень було використано вторинну сировину рослинного походження, широко поширену у регіоні – жолуді дуба звичайного (*Quercus robur L.*), зібрані на території паркової зони у м. Львів, Україна. Жолуді були попередньо подрібнені на молотково-гравітаційній дробарці LIDER-4.

Таблиця 2.3

Фракційний склад частинок жолудів, визначений за допомогою ситового аналізу

Розмір сита, мм	$d_{\text{частинки}}$, мм	% мас.
0,31÷0,63	0,47	25
0,63÷1,25	0,94	32
1,25÷2,5	1,86	19
2,5÷5	3,75	8
5÷6	5,5	12
6÷10	8	4
$d_{\text{середнє}}$, мм	2,05	100

Характеристики жолудів дуба звичайного (*Quercus robur L.*) були наступними:

- початкова вологість $\omega = 43,37$ % мас.;

- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{В}} = 466,06 \text{ кг/м}^3$;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 3,08 \text{ \% мас.}$) $\rho_{\text{нас}}^{\text{ОС}} = 457,69 \text{ кг/м}^3$;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,38 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- питома поверхня $a = 2010 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Каштани. Іншою поширеною вторинною сировиною рослинного походження є плоди дерева гіркокаштан звичайний (*Aesculus hippocastanum*), які було зібрано на території паркової зони у м. Львів, Україна. Каштани були попередньо подрібнені на молотково-гравітаційній дробарці LIDER-4.

Характеристики плодів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) були наступними:

- початкова вологість $\omega = 56,81 \text{ \% мас.}$;
- насипна густина вологого матеріалу $\rho_{\text{нас}}^{\text{В}} = 276,68 \text{ кг/м}^3$;
- насипна густина осушеного матеріалу (за вологості $\omega = 11,38 \text{ \% мас.}$) $\rho_{\text{нас}}^{\text{ОС}} = 215,71 \text{ кг/м}^3$;
- порізність осушеного шару матеріалу $\varepsilon = 0,54 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- питома поверхня $a = 2100 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Розміри частинок визначали за допомогою вимірювань електронним штангенциркулем SHANE 5110, проаналізовано 200 частинок каштанів та встановлено їх усереднені розміри:

- товщина частинки $h_{\text{частинки}} = 2,07 \text{ мм}$;
- довжина частинки $l_{\text{частинки}} = 5,03 \text{ мм}$;
- ширина частинки $s_{\text{частинки}} = 3,75 \text{ мм}$.

2.2. Опис та принцип роботи експериментальної установки

фільтраційного сушіння

Для проведення експериментальних досліджень щодо визначення закономірностей процесу фільтраційного сушіння була використана експериментальна установка (рис. 2.1), яка забезпечує можливість проводити комплексні дослідження сушіння вологого дисперсного матеріалу, змінюючи

основні параметри процесу сушіння: висоту шару матеріалу H , температуру теплового агенту T та швидкість теплового агенту v_0 [6].

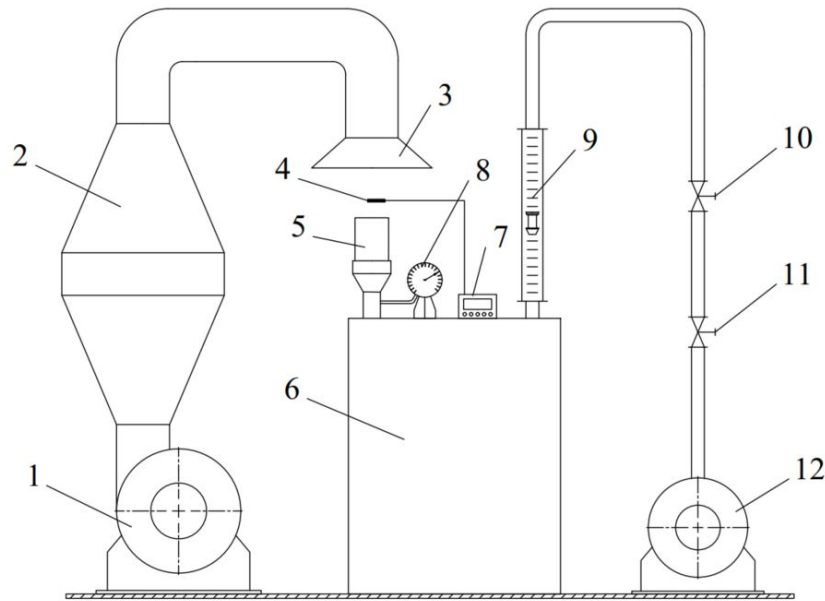


Рис. 2.1. Експериментальна установка для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження: 1 – вентилятор; 2 – електрокалорифер; 3 – дифузор; 4 – термопара; 5 – циліндричний контейнер; 6 – ресивер; 7 – контрольно-вимірювальний прилад SENTOS D1S; 8 – вакууметр; 9 – ротаметр; 10 – регулюючий вентиль; 11 – запірний вентиль; 12 – водокільцева вакуум-помпа

Експериментальна установка (рис. 2.1) складається із вентилятора 1 , який нагнітає повітря у електрокалорифер 2 , де воно нагрівається до заданої температури. Проходячи через дифузор 3 , повітря потрапляє у циліндричний контейнер 5 з шаром досліджуваного матеріалу. Над контейнером розташовується термопара 4 для визначення температури повітря на виході з дифузора. Термопара з'єднана з контрольно-вимірювальним приладом SENTOS D1S, за допомогою якого встановлюється і підтримується стала температура теплового агенту. Для вимірювання значень втрат тиску в шарі матеріалу встановлено вакууметр 8 . Контейнер 5 з'єднаний з ресивером, в якому створюється розрідження за рахунок водокільцевої вакуум-помпи 12 . Перед вакуум-помпою розташований ротаметр 9 для вимірювання витрати повітря.

Також встановлений регулюючий вентиль 10 (для регулювання витрати теплового агенту) і запірний вентиль 11.

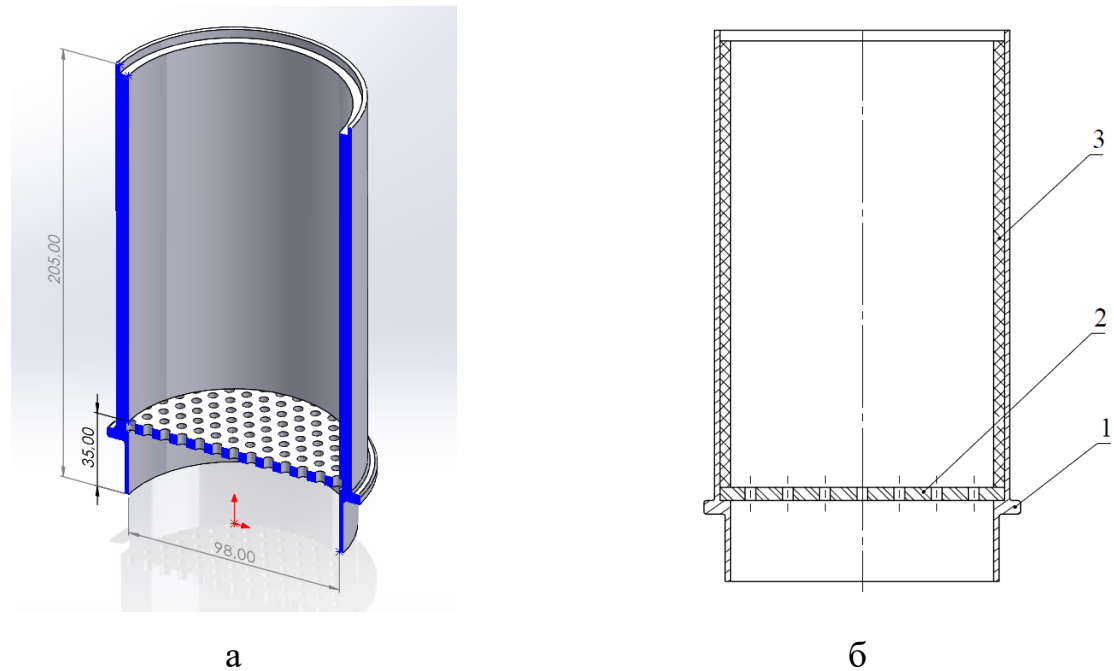


Рис. 2.2. Поперечний переріз 3D моделі циліндричного контейнера експериментальної установки фільтраційного сушіння (а) та схематичне зображення циліндричного контейнера (б): 1 – корпус контейнера, 2 – перфорована перегородка, 3 – теплоізоляційна вставка

У циліндричний контейнер 5 експериментальної установки для фільтраційного сушіння (рис. 2.1), зображений на рис. 2.2, завантажували вологу вторинну сировину рослинного походження на необхідну для поточного експерименту висоту. Контроль висоти шару вологої вторинної сировини рослинного походження у циліндричному контейнері 5 (рис. 2.1, рис. 2.2) здійснювали за допомогою значення насипної густини матеріалу.

2.3. Методики проведення експериментальних досліджень та супутніх визначень

2.3.1. Методика дослідження кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Дослідження кінетики процесу фільтраційного сушіння вологих матеріалів є першочерговим етапом для визначення параметрів протікання процесу, його

часу та оптимальних режимів здійснення процесу. В загальному кінетика процесу сушіння характеризує зміну вмісту вологи у матеріалі від часу – фактично тривалість висушування. Характер кінетичних кривих визначається структурними особливостями досліджуваного матеріалу, особливостями тепломасообміну всередині тіла та між його поверхнею і тепловим агентом. На кінетику процесу сушіння впливають властивості осушуваних матеріалів (вологівміст, форма зв'язку вологи із структурою матеріалу тощо), параметри теплового агента (вологівміст, температура, швидкість), стан перебування матеріалу в зоні сушіння (стаціонарний, киплячий, зважений). Значна кількість параметрів впливу ускладнюють теоретичний розрахунок процесу і вимагають проведення експериментальних досліджень із подальшим узагальненням їх результатів.

Основне завдання дослідження кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння рослинної сировини полягало у проведенні експериментальних досліджень, метою яких є встановлення впливу основних параметрів процесу (висота вологого матеріалу H , температура теплового агента T , швидкість руху теплового агента v_0) на процес фільтраційного сушіння рослинної сировини та подальшого узагальнення одержаних даних.

Дослідження кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження виконували на експериментальній установці для фільтраційного сушіння (рис. 2.1). Було проведено три серії дослідів, для кожної серії змінювали певний параметр процесу – висоту шару вологого матеріалу H , температуру теплового агента T , швидкість теплового агента v_0 .

Вологість вихідної вторинної сировини рослинного походження визначали за допомогою високоточного аналізатора вологи RADWAG MA 50/1.R із точністю вимірювання вологості 0,0001 %.

Висоту шару вологої вторинної сировини рослинного походження в контейнері 5 експериментальної установки для фільтраційного сушіння (рис. 2.1) визначали за даними насипної густини.

2.3.2. Методика визначення вологості вторинної сировини рослинного походження

Визначення вологості вторинної сировини рослинного походження здійснювали згідно рекомендацій ДСТУ [179]. Для дослідження було використано високоточний аналізатор вологи RADWAG MA 50/1.R із точністю вимірювання вологості 0,0001 %.

Зразок досліджуваної вторинної сировини рослинного походження масою орієнтовно $1 \div 1,5$ г поміщали на спеціальну платформу аналізатора вологи, де відбувався нагрів матеріалу за температури 115 °C до повного вилучення вологи з матеріалу. Час сушіння вторинної сировини рослинного походження становив 75 хвилин, протягом наступних трьох хвилин понад цей час маса досліджуваного зразка залишалася постійною, що свідчило про завершення видалення вологи. Процес визначення вологості вторинної сировини рослинного походження виконували 3 рази, після чого як результат брали середньоарифметичне значення одержаних значень початкової вологості.

2.3.3. Методика визначення насипної густини вторинної сировини рослинного походження

Експериментальне визначення насипної густини вторинної сировини рослинного походження проводили згідно рекомендацій ДСТУ [180]. Дисперсний матеріал з висоти насипали у мірну циліндричну ємність до утворення конуса над верхньою частиною ємності, частину дисперсного матеріалу над верхнім краєм мірної циліндричної ємності зрізали лінійкою. Масу вторинної сировини рослинного походження у мірній ємності визначали за допомогою електронних ваг марки AXIS AD3000 із точністю 0,01 г. Розрахунок проводили за формулою:

$$\rho_{\text{нас}} = \frac{G}{S \cdot H}, \quad (2.1)$$

де G – маса шару матеріалу в мірній ємності, кг;

S – площа поперечного перерізу мірної ємності, м^2 ;

H – висота шару досліджуваного матеріалу, м.

2.3.4. Методика узагальнення результатів кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Для дослідження кінетики фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було проведено три серії дослідів, під час кожної серії змінювали один із параметрів процесу, в той час як інші параметри залишали незмінними – висоту шару вологого матеріалу H , температуру теплового агенту T , швидкість теплового агенту v_0 .

Відомо, що процес фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів поділяється на два періоди [147] – період повного насичення теплового агенту вологою, та період часткового насичення теплового агенту вологою.

Для узагальнення кінетики фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою використовували систему диференціальних рівнянь матеріального балансу вологи матеріалу та кінетики сушіння, яка є справедливою в межах $0 < \varphi < 1$ [181]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial H} = a \cdot (1 - \varphi) \\ -\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = n \cdot (1 - \varphi) \end{cases} \quad (2.2)$$

де φ – відносна вологість повітря, у долях;

w^c – біжуче значення вологовмісту досліджуваного матеріалу, кг H_2O / кг сухого матеріалу;

a , n – кінетичні коефіцієнти, які залежать від структури матеріалу, 1/м, 1/с відповідно;

τ – час сушіння, с.

Для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr} та критичного часу τ_{cr} за різних температур теплового агенту та різних швидкостей фільтрування теплового агенту використовували методику, наведену в роботі [181]. Дана методика базується на побудові кінетичних кривих у координатах:

$$\lg (w^c - w_e) = f(\tau),$$

де w_e^c – рівноважне значення вологовмісту досліджуваного матеріалу, кг H₂O / кг сухого матеріалу.

Внаслідок математичних перетворень системи (2.2), кінетика фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження у періоді повного насичення теплового агенту вологою до досягнення критичного вологовмісту w_{cr} вологим матеріалом описується наступним рівнянням:

$$\frac{w^c}{w_0^c} = 1 - \eta \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (2.3)$$

де w_0^c – початкове значення вологовмісту матеріалу, кг H₂O / кг сухого матеріалу; η – кінетичний коефіцієнт.

Якщо рівняння (2.2) представити у вигляді:

$$\frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{\tau} = \eta \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (2.4)$$

і позначити

$$\frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{\tau} = y,$$

то, у результаті, рівняння (2.4) можна виразити у вигляді:

$$y = \eta \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (2.5)$$

Прологарифмувавши рівняння (2.5) отримуємо:

$$\ln(y) = \ln(\eta) - a \cdot H \quad (2.6)$$

Кінетичні коефіцієнти a та η визначають за допомогою графоаналітичного методу у системі координат:

$$\ln \left((1 - w^c/w_0^c)/\tau \right) = f(H),$$

де a – тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис;

$\ln(\eta)$ – відрізок, що відтинається на осі ординат.

Враховуючи те, що у періоді повного насичення теплового агенту вологою зміна вологовмісту дисперсного матеріалу обмежується зовнішніми умовами

сушіння, а саме швидкістю руху та температурою теплового агента, то коефіцієнт η можна представити у загальному вигляді рівнянням:

$$\eta = A \cdot T^m \cdot v_0^n, \quad (2.7)$$

де коефіцієнти A , m та n , як встановлено авторами [148, 149], є константами для певного матеріалу і їх визначають на основі узагальнення результатів експериментальних досліджень за різних параметрів процесу сушіння.

Як наслідок, для періоду повного насичення теплового агента вологою рівняння, що описує закономірності процесу сушіння (2.3) набуває вигляду:

$$w^c = w_0^c \cdot (1 - A \cdot T^m \cdot v_0^n \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}), \quad (2.8)$$

У періоді часткового насичення теплового агента вологою, буде справедливим наступне рівняння:

$$-\frac{dw^c}{d\tau} = K \cdot (w^c - w_e^c), \quad (2.9)$$

де K – коефіцієнт сушіння, $1/\text{с}$, що у свою чергу виражається залежністю:

$$K = \chi \cdot N \quad (2.10)$$

де χ – відносний коефіцієнт сушіння, $\text{кг сухого матеріалу} / \text{кг H}_2\text{O}$;

N – швидкість сушіння у періоді повного насичення теплового агента вологою, $\text{кг H}_2\text{O} / (\text{кг сухого матеріалу} \cdot \text{с})$.

Інтегруючи рівняння (2.9), одержуємо:

$$\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c} = e^{-K \cdot (\tau - \tau_{cr})}, \quad (2.11)$$

Прологарифмувавши попередній вираз (2.11), приходимо до залежності:

$$\ln \left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c} \right) = -K \cdot (\tau - \tau_{cr}) \quad (2.12)$$

Отже, для знаходження коефіцієнту сушіння K необхідно побудувати графічну залежність у системі координат $\ln((w^c - w_e^c)/(w_{cr}^c - w_e^c)) = f(\tau - \tau_{cr})$. Коефіцієнт K визначають за допомогою графоаналітичного методу як тангенс кута нахилу прямої до осі абсцис.

Швидкість сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою N можна визначити за рівнянням:

$$N = \frac{w_0^c - w_{cr}^c}{\tau_{cr}} \quad (2.13)$$

Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ необхідно побудувати графічну залежність у системі координат $K = f(N)$.

Рівняння, що описує кінетичні закономірності у періоді часткового насичення теплового агенту вологою (2.11) у кінцевому вигляді запишеться як:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-\chi \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c, \quad (2.14)$$

Виражаємо рівняння для опису часу досягнення критичного вологовмісту досліджуванним матеріалом у періоді повного насичення теплового агенту вологою із рівняння (2.8), за умови, що $w_0^c > w^c \geq w_{cr}^c$, $0 < \tau \leq \tau_{cr}$:

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{A \cdot T^m \cdot v_0^n \cdot e^{-a \cdot H}}, \quad (2.15)$$

а для опису часу досягнення рівноважного вологовмісту досліджуванним матеріалом у періоді часткового насичення теплового агенту вологою:

$$\tau_{II} = \frac{\chi \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{\chi \cdot N} \quad (2.16)$$

Загальний час фільтраційного сушіння вологого матеріалу, що необхідний для сушіння від початкового вологовмісту до кінцевого становитиме суму значень рівнянь (2.15) та (2.16).

Рекомендовано під час розрахунку часу фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою для значень вологовмісту $w_e^c < w^c < 0,5$ кг Н₂О / кг сухого матеріалу враховувати додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної води за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K\tau_{II} = 0,7 \div 0,9$ для врахування затрат теплоти на випаровування зв'язаної води та нагрівання вологого матеріалу, які зростають із зменшенням тангенсу нахилу кінетичної кривої сушіння [182, 183]:

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \cdot K_{\tau_{II}} \quad (2.17)$$

2.3.5. Методика проведення досліджень гідродинаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Дослідження гідродинаміки осушеної вторинної сировини рослинного походження виконували з метою визначення гідравлічного опору шару дисперсного матеріалу на експериментальній установці фільтраційного сушіння (рис. 2.1), принцип роботи якої описано у розділі 2.2. Отримані результати дозволяють прогнозувати енергетичні затрати на створення перепаду тисків під час здійснення процесу сушіння дисперсного матеріалу.

Для експериментальних досліджень використовували попередньо осушену до постійної маси вторинну сировину рослинного походження, оскільки під час фільтраційного сушіння, зона масообміну рухається у напрямку руху теплового агенту і в стаціонарному шарі, який висушується, одночасно присутній сухий і вологий матеріал.

Крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження у циліндричному контейнері 5 експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис. 2.1) профільтровували тепловий агент за кімнатної температури та з визначеною початковою витратою на ротаметрі 9. Поступово закриваючи і відкриваючи регулюючий вентиль 10, змінювали витрату теплового агенту, та паралельно фіксували значення перепаду тисків за допомогою вакууметра 8. Дослідження проводили для обраних висот стаціонарного шару осушеної вторинної сировини рослинного походження за сталої температури та витрати теплового агенту.

Для показників температури теплового агенту на момент проведення експерименту визначали за літературними джерелами густину повітря та коефіцієнт динамічної в'язкості, дані значення використовували для комп'ютерного моделювання процесу.

Контроль висоти шару осушеного матеріалу у циліндричному контейнері 5 (рис. 2.1, 2.2) здійснювали за допомогою значення насипної густини матеріалу, методику визначення якої наведено у розділі 2.3.3.

2.3.6. Методика визначення порізності вторинної сировини рослинного походження

Визначення порізності шару осушеної вторинної сировини рослинного походження виконували згідно рекомендацій [184] за методом двох рідин. Попередньо зважену наважку досліджуваного матеріалу поміщали у мірний циліндр, який після цього заповнювали бензолом та залишали на 48 год. для повного видалення повітря із пор матеріалу. По завершенню цього часу, зливали бензол з мірного циліндра та видаляли його залишки за допомогою фільтрувального паперу з поверхні досліджуваного матеріалу. Після цього досліджуваний матеріал поміщали у мірний циліндр та заповнювали дистильованою водою до тих пір, поки вода не була вище за рівень шару матеріалу на 100 мл. Щоб запобігти спливанню частинок, було використано металеву решітку як стоппер. За допомогою бензолу за різниці об'ємів бензолу і об'єму дисперсного матеріалу у циліндрі визначають сумарну долю пустот, а за допомогою води і частинок дисперсного матеріалу насичених бензолом визначають внутрішню порізність шару дисперсного матеріалу, тобто без пор у частинках дисперсного матеріалу. У результаті проведеного експерименту, було визначено порізність шару осушеного досліджуваного матеріалу, як різницю між загальною кількістю дистильованої води, кількістю води над шаром та об'ємом решітки. Порізність шару досліджуваного матеріалу розраховували за формулою:

$$\varepsilon = \frac{V_p}{V} \quad (2.18)$$

де ε – порізність шару досліджуваного матеріалу, м³/м³;

V_p – об'єм дистильованої води у шарі досліджуваного матеріалу, м³;

V – загальний об'єм досліджуваного матеріалу, м³.

2.3.7. Методика проведення комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження

Процес комп'ютерного моделювання передбачає послідовне виконання низки етапів, що забезпечують отримання розв'язку задачі. Спочатку визначають розрахункову область, яка представляє собою віртуальну модель реального об'єкта. Далі здійснюють дискретизацію цієї області, тобто розбиття її на дрібні елементи, які називаються кінцевими елементами. Після цього задають параметри моделювання, включаючи визначення об'єму пористого шару матеріалу. На завершальному етапі програмою виконується чисельне розв'язання системи диференціальних та/або алгебраїчних рівнянь, які описують поведінку модельованої системи. Для успішного завершення ітераційного процесу розрахунку необхідно забезпечити повну збіжність отриманих результатів.

Комп'ютерне моделювання руху потоку теплового агенту крізь шар осушеної вторинної сировини рослинного походження виконували з метою визначення відмінності одержаних результатів моделювання гідравлічного опору шару дисперсного матеріалу від експериментально одержаних.

Комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження проводили у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Геометричну область розрахунку створювали у препроцесорі *ANSYS Design Modeler*, відповідно до фактичних розмірів внутрішнього об'єму циліндра контейнера 5 (рис. 2.2) експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис. 2.1). Геометричні розміри створеної моделі та розташування зон у циліндричному контейнері подано на рис. 2.3.

Наступним кроком підготовки моделі для виконання комп'ютерного моделювання, є її дискретизація сітковою моделлю з тетраедральних елементів у препроцесорі *ANSYS Mesh* (рис. 2.4). Кількість елементів сіткової моделі

становила орієнтовно 490 000 елементів, кількість вузлів становила 91 000. Збільшення кількості елементів сітки області моделювання до 1 млн не приводило до суттєвої зміни в точності одержаних результатів комп'ютерного моделювання.

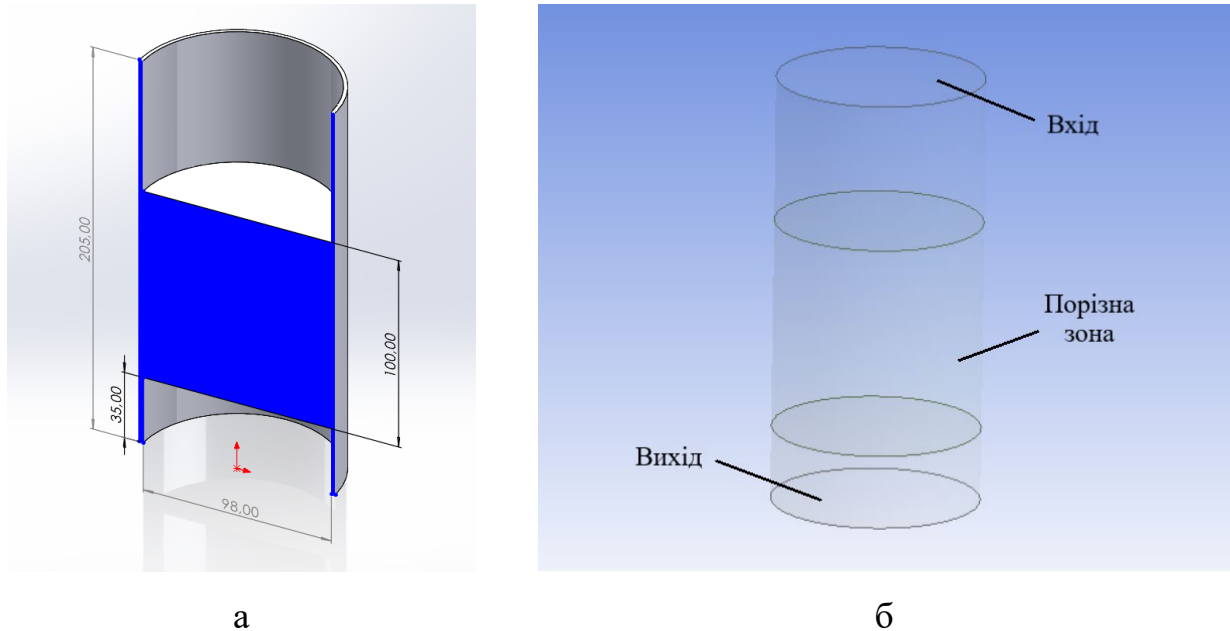


Рис. 2.3. Геометрична область для розрахунку комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження: а – геометричні розміри моделі циліндричного контейнера; б – поділ області комп'ютерного моделювання

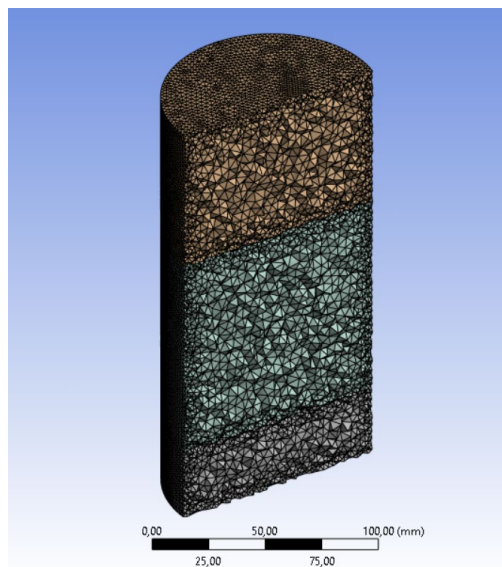


Рис. 2.4. Сіткова модель розрахункової області моделювання

Комп'ютерне моделювання руху потоку теплового агенту виконували із використанням визначених параметрів шару досліджуваного матеріалу та з використанням $k-\omega SST$ моделі турбулентності з огляду на характер руху потоку теплового агенту поміж обмежувальними стінками циліндричного контейнера згідно рекомендацій [185].

Визначення гідравлічного опору пористого шару осушеної вторинної сировини рослинного походження здійснювали за допомогою комп'ютерного моделювання для кожного значення фіктивної швидкості потоку теплового агенту та досліджуваних висот, отриманих експериментальним шляхом.

Зважаючи на особливість досліджуваного матеріалу, процес комп'ютерного моделювання проводили згідно рекомендацій [186], використовуючи метод пористих середовищ. Процес моделювання даного процесу базується на розв'язанні системи диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса, а також рівняння нерозривності потоку [168], які описують рух реальних рідин, ітераційним способом.

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho v_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_i v_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \right] + f_i, \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho v_j) = 0, \quad (2.20)$$

де τ – час, с;

ρ – густина рідини (теплового агенту), кг/м³;

v – швидкість руху рідини (теплового агенту), м/с;

p – тиск, Па;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості рідини, Па·с;

f_i – вплив масових сил.

Аналіз руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу, виконували за умови, що потік теплового агенту рухається крізь пористий матеріал із рівномірно розподіленим опором, який враховують у правій частині рівняння Нав'є-Стокса як додатковий член рівняння [187]:

$$S_i = - \left(\sum_{j=1}^3 D_{ij} \mu v_j + \sum_{j=1}^3 C_{ij} \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right), \quad (2.21)$$

де D_{ij} і C_{ij} – матриці, які визначають на стадії постановки задачі моделювання і мають розмірність 3×3 .

Якщо розглядати ізотропне (однорідне) пористе середовище, то на діагоналі матриці D_{ij} будуть елементи, рівні l/α , а на діагоналі матриці C_{ij} будуть елементи, рівні C_2 , де α – проникність середовища; C_2 – коефіцієнт внутрішнього опору. Усі інші елементи матриці дорівнюватимуть нулю. З такими значеннями матриці, значення S_i набуде вигляду:

$$S_i = - \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right). \quad (2.22)$$

За ламінарного руху потоку теплового агенту, головний вплив матиме перший член у рівнянні (2.22). Якщо не брати до уваги конвективне прискорення та дифузію, можна спростити рівняння руху крізь пористе середовище до закону Дарсі:

$$\Delta P = - \frac{\mu}{\alpha} \cdot v_i. \quad (2.23)$$

На противагу вищенаведеному, у випадку високої швидкості потоку, друга частина виразу S_i (2.22) стає домінуючою. Коефіцієнт C_2 визначають як коефіцієнт гідравлічних втрат на одиницю довжини у напрямку руху потоку, що дозволяє розглядати перепад тиску як функцію динамічного напору:

$$\Delta P = - \sum_{j=1}^3 C_{2ij} \left(\frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \quad (2.24)$$

Таким чином, для проведення комп'ютерного моделювання процесу руху теплового агенту крізь пористе середовище є необхідним попередньо експериментально визначити значення двох констант, що характеризують гідродинаміку стаціонарного шару дисперсного матеріалу, а саме коефіцієнтів в'язкого опору l/α та інерційного опору C_2 .

Спрощена версія рівняння імпульсу, що пов'язує перепад тиску з початковим членом, може бути виражена як [187]:

$$\nabla P = S_i, \quad (2.25)$$

або

$$\Delta P = -S_i \cdot H. \quad (2.26)$$

Зважаючи на рівняння (2.22), можна виразити залежність (2.26) як:

$$\Delta P = \left(\frac{\mu}{\alpha} v_i + C_2 \frac{1}{2} \rho |v| v_j \right) \cdot H. \quad (2.27)$$

Значення, що необхідні для комп'ютерного моделювання констант коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha$ та інерційного опору C_2 одержують на основі експериментальних даних.

Для визначення втрат тиску при проходженні потоку теплового агенту крізь пористий шар досліджуваного матеріалу використовують рівняння Дарсі–Вейсбаха:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}, \quad (2.28)$$

де ΔP – гідравлічний опір шару матеріалу, Па;

λ – коефіцієнт опору шару;

H – висота шару матеріалу, м;

d_e – еквівалентний діаметр, м;

ρ – густина потоку теплового агенту, кг/м³;

v – дійсна швидкість руху теплового агенту, м/с.

Із рівняння (2.28) зрозуміло, що на втрати тиску матимуть вплив параметри теплового агенту, що рухається крізь пористий шар, та параметри пористого шару матеріалу. Додатково на перепад тиску впливає коефіцієнт опору шару λ , який враховує вплив місцевих опорів та опору тертя, які виникають у результаті проходження потоку теплового агенту крізь вільний об'єм шару пористого матеріалу. Для визначення коефіцієнту опору шару використовують залежності, отримані на основі проведених експериментальних досліджень для кожного окремого випадку. Значення коефіцієнта опору шару λ виражають як функцію від числа Рейнольдса у вигляді:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (2.29)$$

де A і B – коефіцієнти рівняння, які визначають експериментально.

Рівняння Дарсі–Вейсбаха (2.28) може бути розширене виразами коефіцієнту опору шару λ (2.29), а також критерію Рейнольдса Re , еквівалентного діаметру d_e та дійсної швидкості v :

$$Re = \frac{v \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}, \quad (2.30)$$

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (2.31)$$

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon}, \quad (2.32)$$

де v_0 – фіктивна швидкість теплового агенту, м/с;

a – питома поверхня частинок досліджуваного матеріалу, м²/м³;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості теплового агенту, Па·с.

Як результат отримуємо модифіковане рівняння Дарсі–Вейсбаха, яке відоме як рівняння Ергана:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \cdot v_0. \quad (2.33)$$

Для спрощення рівняння (2.33), введемо наступні позначення:

$$A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3}, \quad (2.34)$$

$$B^* = B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3} \quad (2.35)$$

Значення величин A^* (2.34) та B^* (2.35) будуть залежати від структури досліджуваного матеріалу та параметрів теплового агенту, що дозволяє їх визначення експериментальним шляхом.

Як результат математичних перетворень, отримуємо рівняння, яке враховує величини A^* та B^* , і є лінійною залежністю:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad (2.36)$$

Розрахунок значень коефіцієнтів в'язкого опору l/α та інерційного опору C_2 можливий на основі експериментальних даних залежності гідравлічного опору шару досліджуваного матеріалу ΔP від фіктивної швидкості потоку теплового агенту v_0 , з наступною апроксимацією даних у вигляді функції:

$$\Delta P = B^* \cdot H \cdot v_0^2 + A^* \cdot H \cdot v_0 \quad (2.37)$$

Порівнюючи рівняння (2.37) та (2.27), отримуємо залежності для подальшого визначення коефіцієнтів в'язкого опору l/α та інерційного опору C_2 :

$$B^* \cdot H = C_2 \frac{1}{2} \rho H,$$

$$A^* \cdot H = \frac{\mu}{\alpha} H$$

тобто

$$B^* = C_2 \frac{1}{2} \rho \quad (2.38)$$

$$A^* = \frac{\mu}{\alpha} \quad (2.39)$$

2.3.8. Методики визначення теплотворних властивостей вторинної сировини рослинного походження

Для визначення вмісту залишкової вологи у висушеному матеріалі вторинної сировини рослинного походження, проводили дослідження згідно з методикою, наведеною у ДСТУ [188].

Також проводили визначення зольності досліджуваної вторинної сировини рослинного походження за вимогами ДСТУ [189].

Керуючись методикою ДСТУ [190], проводили визначення теплотворної здатності осушеної вторинної сировини рослинного походження та сформованих взірців альтернативного твердого палива з використанням прецизійного калориметра спалювання В-08-МА з ізотермічною оболонкою ($\pm 0,003$ К) та статичною калориметричною бомбою.

Енергетичний еквівалент калориметричної системи ($W = 10348 \pm 10$ Дж/В) визначали з точністю $\pm 0,09$ % спалюючи еталонну бензойну кислоту марки К-1,

вміст основного компонента якої становив $99,995 \pm 0,01$ % мол. Теплота згорання бензойної кислоти ($\Delta_c U$) з урахуванням фактора Джессупа у залежності від маси наважки взятої для спалювання становила від 26431,7 до 26434,4 Дж/г.

Спалювання вірців вторинної сировини рослинного походження виконували у спресованому вигляді або в териленових ампулах, якщо технічним завданням було визначити теплотворну здатність необробленої сировини. Вартує також зауважити, що терилен слугує допоміжним матеріалом при спалюванні несформованих вірців сировини, оскільки займання зразка відбувається одночасно по всій поверхні, що спонукає до підвищення температури в зоні горіння та збільшення повноти згорання вірця.

Сформований вірець або териленову ампулу з обв'язували бавовняною ниткою і розташовували у платиновій чашці. Запалювання зразка під час досліду ініціювали розрядом конденсаторів через платинову дротину, яка підпалювала бавовняну нитку. Початковий тиск кисню, який попередньо очищували від горючих домішок, вуглекислого газу та води, становив 30 кПа, а початкова температура головного періоду у всіх експериментах 25 °С. Розрахунок теплотворної здатності проводили за рівнянням:

$$Q = \frac{W \cdot \Delta T - q_n - q_{\text{тер.амп.}} - q_{\text{HNO}_3} + q_c}{m}, \quad (2.40)$$

де W – енергетичний еквівалент калориметричної системи ($W=10348 \pm 10$ Дж/В);

m – маса речовини, яка згоріла за час досліду, г;

q_n , $q_{\text{тер.амп.}}$, q_{HNO_3} , q_c – кількість енергії, яка виділялась при згорянні бавовняної нитки (16704,2 Дж/г), териленової ампули (22944,2 Дж/г), утворенні розчину нітратної кислоти (59 Дж/г) та утвореної сажі (32800 Дж/г), відповідно;

ΔT – істинне зростання температури у калориметричному досліді, °С.

2.3.9. Методика приготування брикетованих вірців альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження

Осушену вторинну сировину рослинного походження піддавали пресуванню у гідравлічному пресі марки П474А (рис. 2.5) за тиску 100 кгс/см² та

температури у прес-формі 150 °С протягом 60 с, 120 с та 180 с з метою одержання дослідних зразків твердопаливних брикетів.

2.3.10. Методика приготування гранульованих взірців альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження

Осушену вторинну сировину рослинного походження піддавали гранулюванню у грануляторі марки Pelletnik-150 (рис. 2.6) з метою одержання дослідних зразків твердопаливних гранул.

Вологість вихідної сировини становила $\omega = 14 \%$ мас. згідно рекомендацій виробника.

Розмір отворів матриці гранулятора становив 0,006 м.



Рис. 2.5. Гідравлічний прес П474А



Рис. 2.6. Гранулятор Pelletnik-150

2.3.11. Методика визначення коефіцієнтів тепломасообміну вторинної сировини рослинного походження

Дослідження зовнішнього теплообміну між частинками вторинної сировини рослинного походження та тепловим агентом. Для того щоб температура верхнього шару досліджуваного матеріалу та нижнього шару була орієнтовно однакова, дослідження виконували у короткому шарі. Для забезпечення рівномірного фільтрування теплового агента крізь поперечний

переріз циліндричного контейнера експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис.2.1, 2.2) висота стаціонарного шару становила 0,005 м за даними насипної густини. Під час дослідження зовнішнього теплообміну частинки вторинної сировини рослинного походження, висушені до постійної маси, завантажували у циліндричний контейнер експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис.2.1, 2.2). На відстані 20 мм зверху над шаром досліджуваного матеріалу та 20 мм під перфорованою перегородкою циліндричного контейнера встановлювали ХК-термопари для вимірювання температури, які були під'єднані до восьми-канального вимірювального перетворювача РТ8-0102-8 з виводом показників на персональний комп'ютер. На виході із шару вторинної сировини рослинного походження температуру теплового агенту вимірювали у шести точках: у центрі контейнера і на відстані 5, 10, 20, 30, 40 мм від стінки контейнера, а температуру теплового агенту визначали як середнє арифметичне із шести значень. Зверху над матеріалом підтримували постійну температуру за допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S і ХК-термопари, яка була розміщена посередині контейнера на висоті 20 мм над матеріалом. Вимірювання температури здійснювали автоматично кожні 1,8 с, а результати виводили на персональний комп'ютер та записували у файл даних за допомогою програми *Термомір 8К v.1.10*.

Дослідження зовнішнього теплообміну між частинками вологого матеріалу і тепловим агентом. Вологу вторинну сировину рослинного походження завантажували в циліндричний контейнер експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис.2.1, 2.2) та зважували за допомогою електронних ваг AXIS-AD3000. Для забезпечення рівномірного фільтрування теплового агенту крізь поперечний переріз циліндричного контейнера експериментальної установки фільтраційного сушіння (рис.2.1, 2.2) висота стаціонарного шару становила 0,005 м за даними насипної густини. Здійснювали сушіння досліджуваного матеріалу протягом 15 с та фіксували зміну маси матеріалу за допомогою електронних ваг AXIS-AD3000. Температура над шаром

вторинної сировини рослинного походження підтримувалась стабільною $90 \pm 0,5$ °С. Експеримент виконували 3 рази для кожної заданої витрати теплового агенту.

2.3.12. Методика визначення питомої поверхні вторинної сировини рослинного походження

Для визначення питомої поверхні частинок вторинної сировини рослинного походження використовували мікроскопічний метод та вимірювання за допомогою штангенциркуля SHANE 5110 партії частинок не менше 200 шт. Частинки вимірювали у трьох взаємно перпендикулярних напрямках.

За допомогою мікроскопічного методу визначали поверхню частинок кукурудзяної післяспиртової барди, жолудів, відходів виробництва кави; за допомогою штангенциркуля – ячмінної пивної дробини, бурякового жому, яблучних вичавок, каштанів.

Вимірювання виконували за допомогою цифрового мікроскопу MICROmed XS-3330 LED з камерою 5 Мп. За допомогою відеокамери, під'єднаної до мікроскопа через вбудований порт, зображення виводилось на екран комп'ютера. Результати мікроскопічних досліджень обробляли за методиками наведеними в [191].

2.3.13. Методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії

Зважаючи на те, що для частинок різної форми застосовуються різні теорії визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії, було проведено класифікацію досліджуваних матеріалів вторинної сировини рослинного походження (табл. 2.4).

Таблиця 2.4

Класифікація частинок вторинної сировини рослинного походження за формою

Досліджуваний матеріал	Форма частинок
Кукурудзяна післяспиртова барда	кулясті

Досліджуваний матеріал	Форма частинок
Ячмінна пивна дробина	циліндричні
Відходи виробництва кави	кулясті
Буряковий жом	циліндричні
Яблучні вичавки	призматичні
Жолуді	кулясті
Каштани	призматичні

Розглянемо методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для частинок різної форми (рис. 2.7).

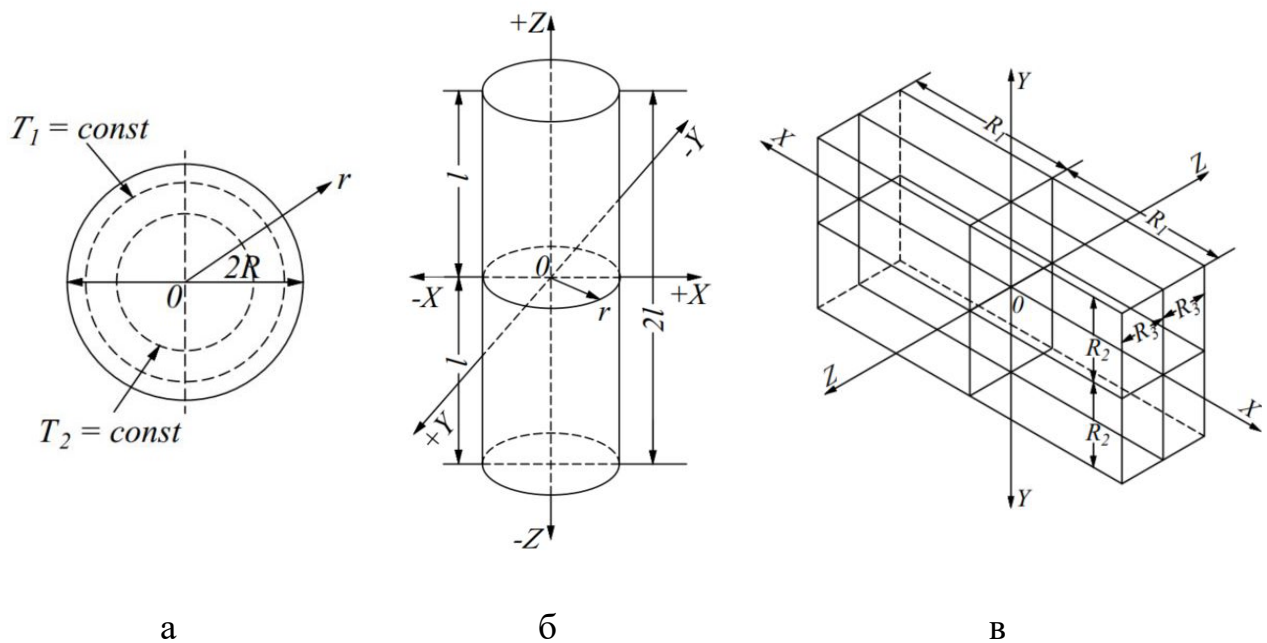


Рис. 2.7. Схематичне позначення частинок різної форми: а – куляста частинка; б – циліндрична частинка; в – призматична частинка

Кулясті частинки. Для аналізу процесу внутрішньодифузійного масоперенесення, що відбувається всередині частинок кулястої форми досліджених матеріалів, коефіцієнт внутрішньої дифузії визначають на основі математичного розв'язку диференціального рівняння (1.1), з відповідно заданими початковими та граничними умовами [192].

Для частинок кулястої форми (рис. 2.7, а) рівняння має вигляд:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (2.41)$$

або враховуючи, що $c = w^c \cdot \rho_{с.м.}$:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right), \quad (2.42)$$

де D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с.

Для визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії необхідно отримати математичний розв'язок диференційного рівняння внутрішньої дифузії – другого закону Фіка. Враховуючи те, що тепловий агент вільно обдуває частинку, можемо допустити у першому наближенні, що дифузійні числа Bi є великими, а саму задачу можна звести до граничних умов першого роду.

Рівняння (2.42) необхідно доповнити крайовими умовами:

$$\begin{cases} w^c(r, \tau = 0) = w_0^c, w^c(r = R, \tau) = w_e^c, \\ \left(\frac{\partial w^c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (2.43)$$

де r, R – біжучий радіус і радіус частинки, м;

w^c, w_e^c, w_0^c – біжучий, рівноважний та початковий вологовміст одинарної частинки, кг Н₂О /кг сух. мат.

Якщо допустити, що всі частинки кулястої форми, рівномірно обдуваються потоком теплового агенту, волога у них рівномірно розподілена у порах і вологовміст теплового агенту рівний вологовмісту на поверхні частинки, то розв'язок системи (2.42) – (2.43) буде представлений у вигляді:

$$\frac{\bar{w}^c - w_e}{w_0^c - w_e} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D_w^* \cdot \tau}{R^2}}, \quad (2.44)$$

де $F_0 = D_w^* \cdot \tau / R^2$ – число Фур'є;

μ_n – корені характеристичного рівняння;

$$B_n = 6 / \mu_n^2.$$

За великих чисел критерію F_0 та великих значень τ членами суми $n > 1$ можна знехтувати, а розв'язок (2.44) з першим членом після логарифмування буде мати вигляд:

$$- \ln \left(\frac{w^c - w_e^c}{w_0^c - w_e^c} \right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \pi^2 \cdot \frac{D_w^* \cdot \tau}{R^2}, \quad (2.45)$$

Коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w можна визначити із графічної залежності $\ln[(\bar{\omega}^c - \omega_p)/(\omega_{\Pi}^c - \omega_p)]$ від τ через тангенс кута нахилу прямих до осі абсцис:

$$D_w = \frac{tg\alpha \cdot R^2}{\mu^2}. \quad (2.46)$$

Циліндричні частинки. Враховуючи допущення для кулястих частинок, визначення коефіцієнта внутрішньої дифузії для циліндричних частинок (рис. 2.7, б) зводять до граничних умов першого роду для циліндра скінченних розмірів, коли вологовміст є функцією трьох змінних (часу τ , радіусу r і координати z), і рівняння дифузії представили у вигляді [153]:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} + \frac{\partial^2 w^c}{\partial z^2} \right) \quad (2.47)$$

де D_w – коефіцієнт внутрішньої дифузії, м²/с;

r, R – радіуси, біжучий і частинки відповідно, м;

ℓ – довжина частинки, м.

Для задачі ставляться відповідні крайові умови:

$$\begin{cases} w^c(r, z, 0) = w_n^c \\ w^c(r, \pm \ell, \tau) = w_p^c, w^c(R, z, \tau) = w_p^c \end{cases} \quad (2.48)$$

Знайти експериментально розподіл вологовмісту по радіусу та довжині частинки неможливо, тому визначається середнє по об'єму V значення вологовмісту згідно залежності:

$$\bar{w}^c = \frac{1}{V} \cdot \int_V w^c \cdot dV \quad (2.49)$$

Тоді розв'язок рівняння (2.47) матиме вигляд:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_n \cdot A_m \cdot J_0 \cdot \left(\mu_n \cdot \frac{r}{R} \right) \cos \mu_m \cdot \frac{z}{\ell} \cdot e^{-(\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2) \cdot Fo}, \quad (2.50)$$

де $A_n = \frac{2}{\mu_n \cdot J_1(\mu_n)}$, $\mu_n = (2 \cdot n - 1) \cdot \frac{\pi}{2}$ – корені функції Беселя першого роду нульового порядку;

$$A_m = (-1)^{m+1} \cdot \frac{2}{\mu_m}; \mu_m = (2 \cdot m - 1) \cdot \frac{\pi}{2};$$

$$K_l = \frac{R}{\ell}.$$

Рівняння (2.50) набуває вигляду:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} B_n \cdot B_m \cdot \exp[-(\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2) \cdot Fo], \quad (2.51)$$

де $B_n = 4/\mu_n^2$;

$B_m = 2/\mu_m^2$.

Введемо позначення $\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \Delta w^c$ та $\frac{\ln(\Delta w^c / (B_n \cdot B_m))}{\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2} = A$.

Для спрощення, використовуємо лише перші корені характеристичного рівняння (2.51). Логарифмуємо залежність (2.51) виражаємо її у вигляді графічної залежності $A = f(\tau)$. Дані можна апроксимувати прямою лінією і за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w з рівняння:

$$D_w = \operatorname{tg} \alpha \cdot R^2 \quad (2.52)$$

Призматичні частинки. Для частинок призматичної форми (рис. 2.7, в) диференціальне рівняння дифузії має вигляд [193]:

$$\frac{\partial w^c(x,y,z,\tau)}{\partial \tau} = D_w \left[\frac{\partial^2 w^c(x,y,z,\tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w^c(x,y,z,\tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w^c(x,y,z,\tau)}{\partial z^2} \right] \quad (2.53)$$

Враховуємо вищенаведені допущення для кулястих та циліндричних частинок, для розв'язку рівняння (2.53) приймаємо граничні умови першого роду. Згідно рівняння (2.53), вологовміст є функцією чотирьох змінних, а саме, координат x , y , z та часу τ .

Для визначення характерного розміру частинок призматичної форми розмістимо початок координат в центр частинки (рис. 2.7, в) і позначимо її довжину, висоту та ширину, відповідно, через $2R_1$, $2R_2$, $2R_3$.

Згідно вище наведених припущень задача є симетричною відносно осей координат. Накладемо на розв'язок рівняння (2.53) обмеження:

$$(\tau > 0; \Leftrightarrow -R_1 < x < +R_1; -R_2 < y < +R_2; -R_3 < z < +R_3) \quad (2.54)$$

У початковий момент часу τ_0 середній вологовміст w^c є однаковим по всьому об'єму частинки і дорівнює початковому середньому вологовмісту частинки w_0^c . Таким чином:

$$w^c(x, y, z, 0) = w_0^c = \text{const} \quad (2.55)$$

Внаслідок омивання частинки тепловим агентом, на її поверхні встановлюється середній вологовміст, який відповідає вологовмісту теплового агенту, внаслідок цього, між поверхнею частинки та її ядром виникає рушійна сила. Оскільки середній вологовміст на поверхні частинки є рівний вологовмісту теплового агенту, то граничні умови матимуть наступний вигляд:

$$\begin{aligned} w^c(\pm R_1, y, z, \tau) &= w_{m.a}^c \\ w^c(x, \pm R_2, z, \tau) &= w_{m.a}^c \\ w^c(x, y, \pm R_3, \tau) &= w_{m.a}^c \end{aligned} \quad (2.56)$$

де $w_{m.a}^c$ – вологовміст теплового агенту, кг H_2O /кг сух. мат.

Розв'язок рівняння (2.53) з врахуванням обмежень (2.54), а також початкових (2.55) та граничних умов першого роду (2.56) можливо представити у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{w^c(x, y, z, \tau) - w_{m.a}^c}{w_0^c - w_{m.a}^c} &= \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} A_n A_m A_k \cos \mu_n \frac{x}{R_1} \times \\ &\times \cos \mu_m \frac{y}{R_2} \cos \mu_k \frac{z}{R_3} \exp[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) Fo], \end{aligned} \quad (2.57)$$

де A_n, A_m, A_k – коефіцієнти, які визначаються із залежності:

$$A_n = (-1)^{n+1} \frac{2}{\mu_n}, A_m = (-1)^{m+1} \frac{2}{\mu_m}, A_k = (-1)^{k+1} \frac{2}{\mu_k};$$

μ_n, μ_m, μ_k – корені характеристичного рівняння, які визначаються як:

$$\mu_n = (2n - 1) \frac{\pi}{2}, \mu_m = (2m - 1) \frac{\pi}{2}, \mu_k = (2k - 1) \frac{\pi}{2},$$

де R – узагальнений розмір частинки, м, який вводять з врахуванням того, що розміри частинки R_1, R_2, R_3 (рис. 2.16, в), є співрозмірними.

Узагальнений розмір частинки можна визначити із залежності:

$$\frac{1}{R^2} = \frac{1}{R_1^2} + \frac{1}{R_2^2} + \frac{1}{R_3^2} \quad (2.58)$$

де

$$K_i = \frac{R}{R_i} \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.59)$$

На основі прийнятих спрощень, рівняння (2.57) можна представити у вигляді:

$$\frac{w^c(x, y, z, \tau) - w_{m.a}^c}{w_0^c - w_{m.a}^c} = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{k=1}^{\infty} B_n B_m B_k \exp[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) Fo], \quad (2.60)$$

де $B_n = \frac{2}{\mu_n^2}, B_m = \frac{2}{\mu_m^2}, B_k = \frac{2}{\mu_k^2}$.

За встановленого режиму сушіння та великих значень числа Фур'є можна обмежитись першим коренем характеристичного рівняння μ_n .

Введемо позначення:

$$\frac{w^c(x, y, z, \tau) - w_{m.a}^c}{w_0^c - w_{m.a}^c} = \Delta w^c, \quad (2.61)$$

З врахуванням (2.60), залежність (2.61) можна представити у вигляді:

$$\Delta w^c = B_n B_m B_k \exp[-(\mu_n^2 K_1^2 + \mu_m^2 K_2^2 + \mu_k^2 K_3^2) Fo] \quad (2.62)$$

або

$$\frac{\Delta w^c}{B_n B_m B_k} = \exp[-\mu^2 (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2) Fo] \quad (2.63)$$

Прологарифмувавши рівняння (2.63) одержуємо:

$$\ln\left(\frac{\Delta w^c}{B_n B_m B_k}\right) = -\mu^2 (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2) Fo$$

або

$$-\frac{\ln(\Delta w^c) - \ln(B_n B_m B_k)}{\mu^2 (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)} = Fo \quad (2.64)$$

Позначимо:

$$A^* = - \frac{\ln(\Delta W^c) - \ln(B_n B_m B_k)}{\mu^2 (K_1^2 + K_2^2 + K_3^2)} \quad (2.65)$$

Тоді рівняння (2.64) буде мати вигляд:

$$A^* = Fo = \frac{D_w \cdot \tau}{R^2} \quad (2.66)$$

Подаємо експериментальні дані у вигляді графічної залежності $A^* = f(\tau)$, дані можна апроксимувати прямою і за тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w з рівняння (2.52).

2.4. Оцінка похибок вимірювання

Точність розрахунків визначається похибкою вимірювання геометричних і технологічних параметрів. Оцінка похибки вимірювання наведена у табл. 2.5.

Вологість матеріалу вимірювали за допомогою високоточного аналізатора вологи RADWAG MA 50/1.R із точністю вимірювання 0,0001 % мас.

Вага вологого і сухого матеріалу вимірювали за допомогою електронних ваг марки AXIS AD3000 із точністю дискретністю 0,01 г.

Час вимірювали за допомогою електронного секундоміра фірми Casio HS-6 з точністю вимірювання 0,01 с.

Температуру вимірювали за допомогою ХК термопар та вимірювального пристрою РТ8-0102-8. Для градування ХК термопар застосовувалась стандартна методика.

Для вимірювання геометричних розмірів окремих частинок використовували електронний штангенциркуль SHANE 5110 0–150 мм та цифровий мікроскоп MICROmed XS-3330 LED з камерою 5 Мп. Також використовували сита з отворами 0,31÷10 мм.

Постійність температури фільтраційного сушіння підтримували за допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S з точністю $\pm 0,4$ °С.

Вимірювання витрати теплового агенту здійснювали за допомогою ротаметра РС-7, перепад тиску – за допомогою: до 4000 Па – U-подібного манометра.

метра і понад 4000 Па – вакуумметра.

Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень від експериментально отриманих розраховували за формулою [147]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{X})}{n-1}} \quad (2.67)$$

де X – розраховане значення;

\bar{X} – усереднене експериментальне значення;

n – кількість вимірювань.

Відносну похибку між розрахованими і експериментальними значеннями визначали за формулою [147]:

$$\Delta = \left| \frac{X_e - X_m}{X_e} \right| \quad (2.68)$$

Таблиця 2.5

Границі похибок вимірювань

Величина	Позначення	Один. вим.	Прилад	Похибка	
				абсолютна	відносна
<i>l</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Діаметр	<i>d</i>	м	SHANE 5110	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
			MICROmed XS-3330 LED	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Вага	<i>G</i>	кг	AXIS AD3000	$1 \cdot 10^{-3}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Об'єм	<i>V</i>	м ³	Мірний циліндр	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
			Лічильник РГ-40	–	1,81 %
Температура	<i>t</i>	°С	PT8-0102-8	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$
			SESTOS D1S	$1 \cdot 10^{-1}$	$5 \cdot 10^{-2}$
Відносна вологість	<i>φ</i>	%	PT-0102	1	$1 \cdot 10^{-2}$
Вологість матеріалу	<i>ω</i>	% мас.	RADWAG MA 50/1	–	$1 \cdot 10^{-4}$

1	2	3	4	5	6
Об'ємна витрата	V_c	м ³ /с	Ротаметр РС-7	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Перепад тисків	ΔP	кгс/см ²	Вакууметр	$2 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$
		мм. вод. ст.	U-подібний манометр	1	$4 \cdot 10^{-3}$
Час	τ	с	Casio HS-6	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$

Висновки до другого розділу

1. Здійснено вибір семи об'єктів вторинної сировини рослинного походження та наведені їх основні фізико-механічні характеристики.
2. Наведено методику експериментальних досліджень та комп'ютерного моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження під час фільтраційного сушіння.
3. Наведено методику експериментальних досліджень та узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження.
4. Наведено методики виготовлення та дослідження основних теплотворних характеристик альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.
5. Наведено методики визначення основних тепломасообмінних коефіцієнтів досліджуваних матеріалів під час процесу фільтраційного сушіння.
6. Наведено методи визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для частинок різної форми для досліджуваних матеріалів вторинної сировини рослинного походження.
7. Наведено методики супутніх вимірювань та наведено основні характеристики використаного обладнання.
8. Основні результати опубліковані в роботах [6, 51, 183, 194].

РОЗДІЛ 3

ГІДРОДИНАМІКА ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Розрахунок ефективності фільтраційного методу сушіння вимагає даних щодо двох основних складових – гідродинамічних та кінетичних закономірностей процесу. Гідродинамічні закономірності процесу фільтраційного сушіння дають уявлення про величину гідравлічного опору стаціонарного шару осушуваного матеріалу та, відповідно, дозволяють оцінити енергетичні затрати на подолання тепловим агентом гідравлічного опору стаціонарного шару. Кінетичні закономірності дозволяють прогнозувати тривалість процесу фільтраційного сушіння та визначати необхідну витрату теплового агента та енергетичні затрати на його нагрів.

3.1. Дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь шар вторинної сировини рослинного походження

Дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь пористий стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження було здійснено на експериментальній установці фільтраційного сушіння (рис. 2.1), схему та принцип роботи якої описано у розділі 2.2. Детальний вигляд циліндричного контейнера 5 експериментальної установки фільтраційного сушіння для досліджуваного матеріалу показано на рис. 2.2.

Метою експериментальних досліджень було встановлення впливу фіктивної швидкості потоку повітря v_0 на величину гідравлічного опору ΔP пористого шару досліджуваного матеріалу. Методика проведення експериментальних досліджень гідродинаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження детально подана у розділі 2.3.5.

Значення втрат тиску для шару матеріалу визначали шляхом віднімання додатково визначеного гідравлічного опору перфорованої перегородки 2 циліндричного контейнера 5 (рис. 2.2) експериментальної установки

фільтраційного сушіння (рис. 2.1) від загального визначеного гідравлічного опору під час експерименту для кожної досліджуваної вторинної сировини рослинного походження. Отримані дослідні дані було подано у вигляді графічної залежності впливу фіктивної швидкості теплового агента v_0 на гідравлічний опір ΔP перфорованої перегородки, приклад такої залежності наведено на рис. 3.1.

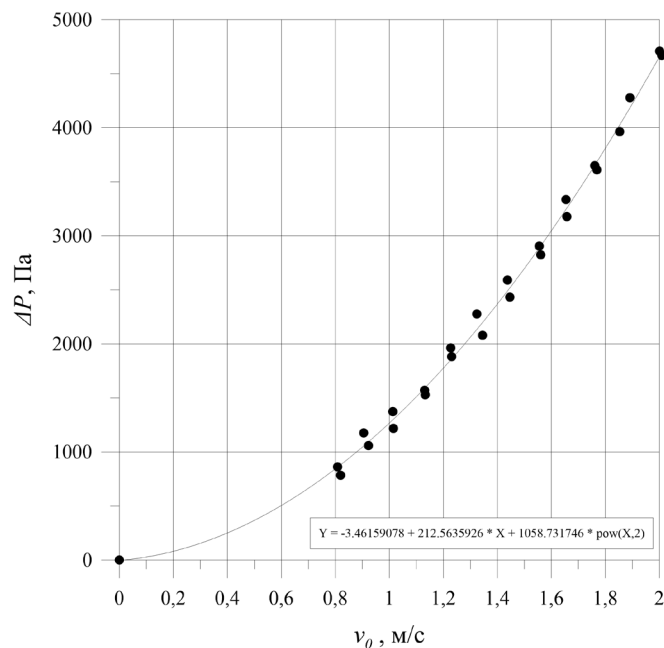


Рис. 3.1. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера експериментальної установки фільтраційного сушіння від фіктивної швидкості руху теплового агента.

На основі одержаних експериментальних даних було отримано рівняння полінома, яке характеризує зміну гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера залежно від фіктивної швидкості потоку теплового агента. Рівняння поліномів для серій експериментів із різною досліджуваною вторинною сировиною рослинного походження наведено у додатку А, рис. А1–А6. Гідравлічний опір шару осушеної вторинної сировини рослинного походження розраховували як різницю між повним отриманим експериментально значенням гідравлічного опору та значенням, розрахованим за рівнянням полінома для кожної величини фіктивної швидкості потоку теплового агента, яку досліджували.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь пористий шар кукурудзяної післяспиртової барди представлено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ (рис. 3.2) для рекомендованих значень висоти шару матеріалу за сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм із кроком 10 мм. Вологість досліджуваного матеріалу на момент експерименту становила 3,65 % мас.

Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної швидкості теплового агенту (рис. 3.2), одержана на основі експериментальних даних, свідчить про те, що гідравлічний опір досліджуваного матеріалу зростає із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агенту.

Вторинна сировина рослинного походження, як біомаса за своєю природою, характеризується неоднорідністю складу матеріалу у пробі, а також відмінностями у фракційному та структурному складі залежно від походження вихідної сировини. Зважаючи на попередньо зроблені висновки у роботі [195], було вирішено додатково провести дослідження гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь пористий шар досліджуваного матеріалу із меншим кроком досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм із кроком 5 мм. Звуження меж досліджуваних висот шару матеріалу мало на меті уточнити характер зміни гідравлічного опору шару досліджуваного матеріалу від зміни фіктивної швидкості теплового агенту, а також зробити висновок про вплив зміни досліджуваних меж на одержані результати за допомогою комп'ютерного моделювання процесу та можливості використання для розширеного діапазону меж висот досліджуваних матеріалів.

Результати експериментального дослідження зміни гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної

швидкості теплового агента за досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм представлено на рис. 3.3.

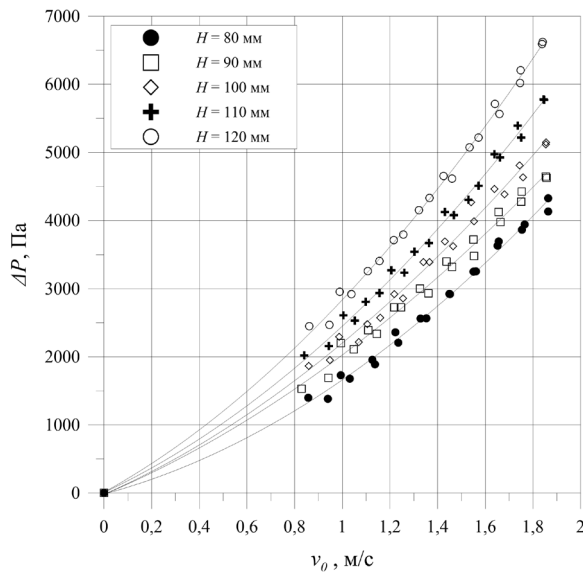


Рис. 3.2. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 16$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с)

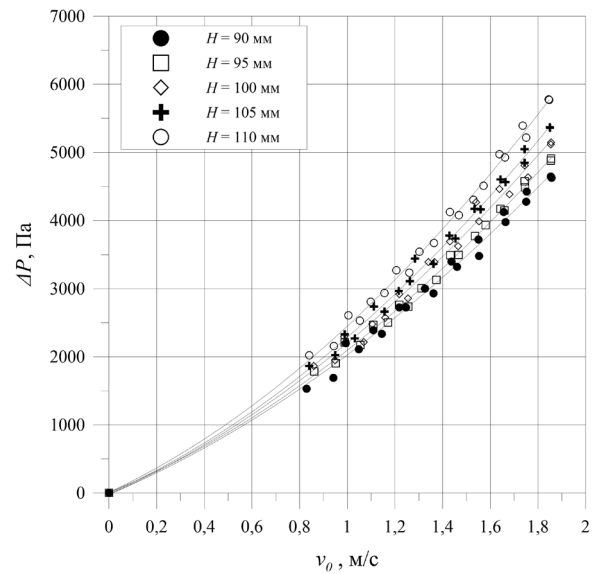


Рис. 3.3. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 16$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с)

Аналізуючи графічну залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди від зміни фіктивної швидкості теплового агента за досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм (рис. 3.3), спостерігаємо аналогічну кореляцію між значеннями ΔP та v_0 – гідравлічний опір досліджуваного матеріалу зростає із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агента. У порівнянні з рис. 3.2, на рис. 3.3 спостерігається значно менша відстань між кривими зміни фіктивної швидкості теплового агента за різних висот шару кукурудзяної післяспиртової барди.

Ячмінна пивна дробина

Вологість ячмінної пивної дробини на момент експерименту становила

12,69 % мас. Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару ячмінної пивної дробини від зміни фіктивної швидкості теплового агента наведено на рис. 3.4.

Графічна залежність $\Delta P = f(v_0)$ для ячмінної пивної дробини за висот шару досліджуваного матеріалу $H = 90 \div 110$ мм наведена на рис. 3.5.

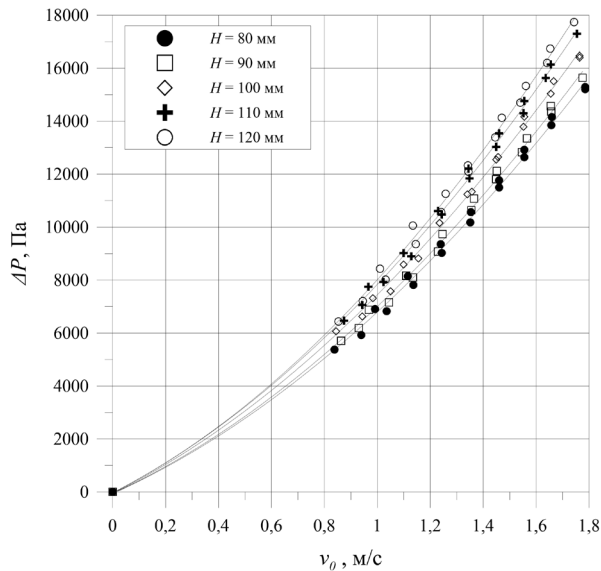


Рис. 3.4. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної ячмінної пивної дробини від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 15$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

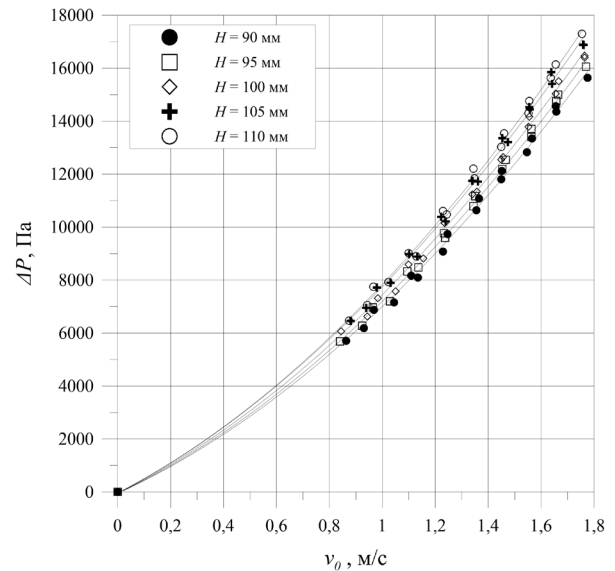


Рис. 3.5. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної ячмінної пивної дробини від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 15$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару осушеної ячмінної пивної дробини від зміни фіктивної швидкості теплового агента для висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.4), показує, аналогічно як для попередньо дослідженої кукурудзяної післяспиртової барди, що гідравлічний опір досліджуваного матеріалу зростає із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агента. Необхідно відмітити значно вищий гідравлічний опір шару ячмінної пивної дробини у порівнянні із гідравлічним опором шару кукурудзяної післяспиртової барди (рис. 3.2, 3.4).

Відходи кавового виробництва

Вологість відходів кавового виробництва на момент проведення експерименту становила 4,17 % мас. Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару відходів кавового виробництва від зміни фіктивної швидкості теплового агенту для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм наведено на рис. 3.6, а для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм – на рис. 3.7.

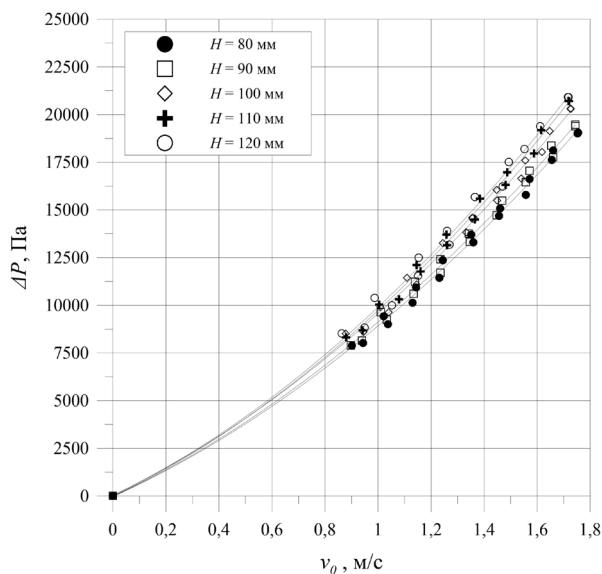


Рис. 3.6. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушених відходів виробництва кави від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 15$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

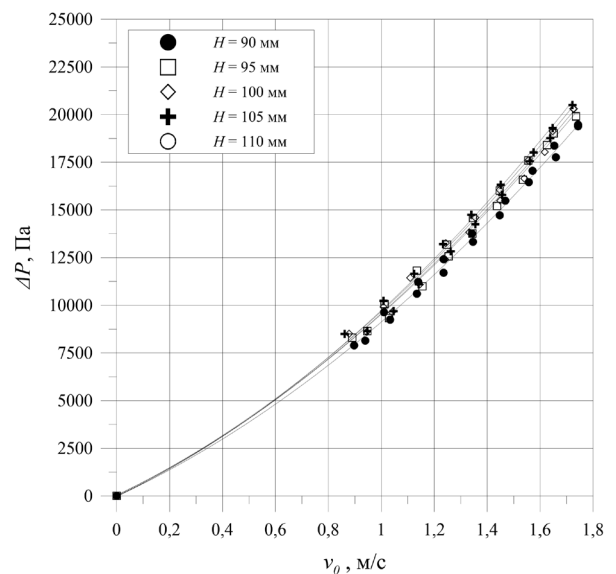


Рис. 3.7. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушених відходів виробництва кави від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 15$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

У випадку використання відходів кавового виробництва для експериментального визначення гідравлічного опору шару для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм, ми також спостерігаємо зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агенту. Аналогічні кореляції спостерігаються при експериментальних дослідженнях для висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм (рис. 3.7). Як і для ячмінної пивної дробини,

спостерігаємо значний гідравлічний опір шару відходів виробництва кави (рис. 3.6, 3.7).

Буряковий жом

Вологість осушеного бурякового жому на момент проведення експериментів становила 11,11 % мас. Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару бурякового жому від зміни фіктивної швидкості теплового агенту для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм наведено на рис. 3.8.

Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару бурякового жому від зміни фіктивної швидкості теплового агенту для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм наведено на рис. 3.9.

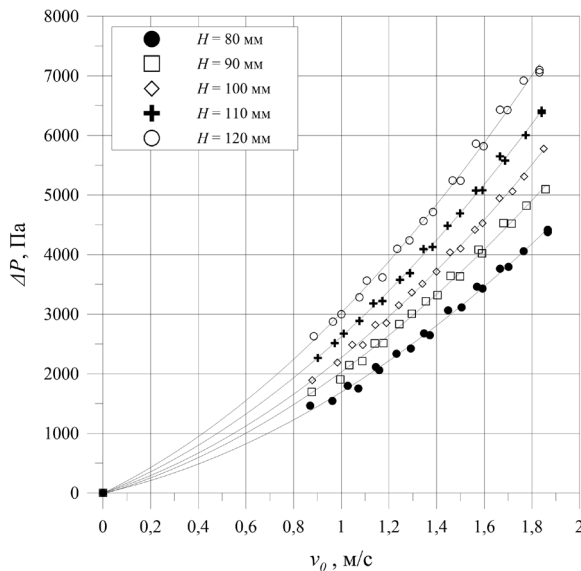


Рис. 3.8. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

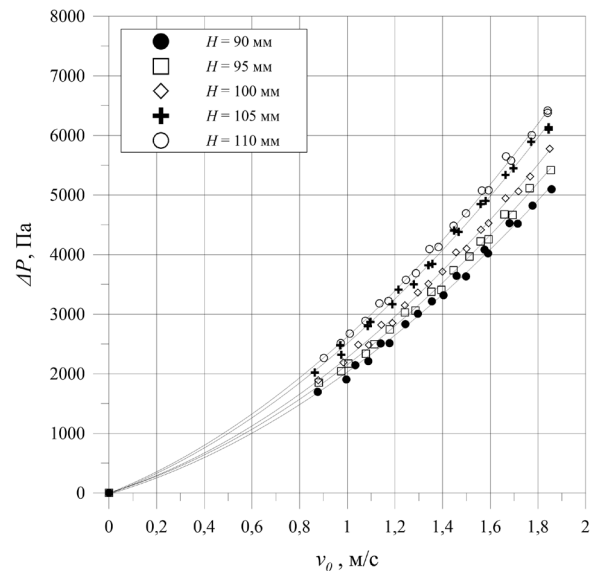


Рис. 3.9. Залежність зміни

гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

У випадку використання бурякового жому як досліджуваного матеріалу для експериментального визначення гідравлічного опору шару для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм, аналогічно відбувається

зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агенту (рис. 3.8).

Для досліджуваних висот шару бурякового жому $H = 90 \div 110$ мм спостерігається аналогічна кореляція – зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу, а також із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агенту (рис. 3.9). Необхідно відмітити, що абсолютні показники гідравлічного опору для шару бурякового жому наближені до значень гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди і нижчі, аніж для ячмінної пивної дробини та відходів виробництва кави.

Яблучні вичавки

Вологість осушених яблучних вичавок на момент проведення експериментальних досліджень становила 9,99 % мас. Графічна залежність зміни гідравлічного опору шару від зміни фіктивної швидкості теплового агенту для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм наведено на рис. 3.10, а для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм – на рис. 3.11.

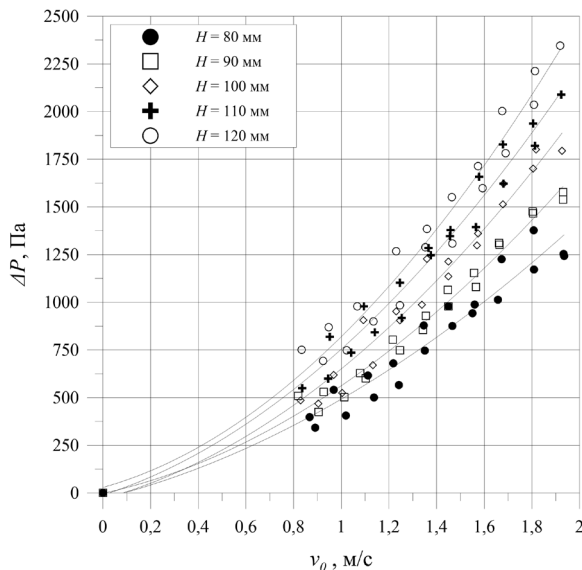


Рис. 3.10. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

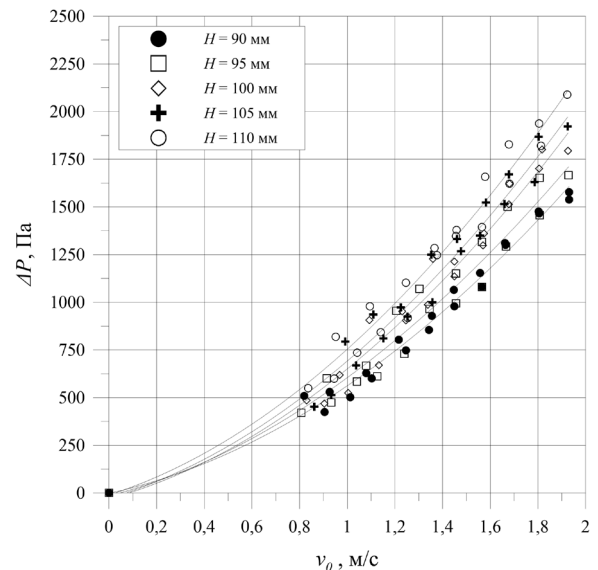


Рис. 3.11. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

Одержані залежності (рис. 3.10, 3.11) свідчать про найнижчий гідравлічний опір яблучних вичавок серед дослідженої вторинної сировини рослинного походження. У випадку використання яблучних вичавок як досліджуваного матеріалу для експериментального визначення гідравлічного опору шару для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм, як і попередньо описаних випадках, відбувається зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу та із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агенту (рис. 3.10, 3.11).

Жолуді

Вологість осушених жолудів на момент проведення експериментальних досліджень становила 3,08 % мас. Графічна залежність зміни гідравлічного опору стаціонарного шару жолудів від зміни фіктивної швидкості теплового агенту для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм наведено на рис. 3.12, а для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм – на рис. 3.13.

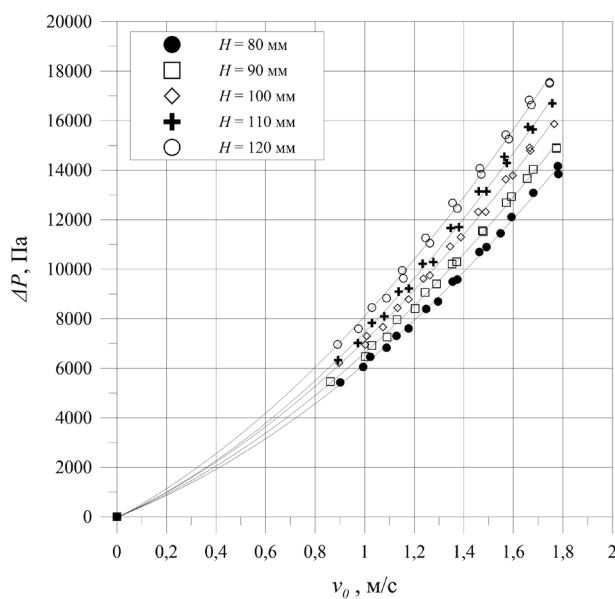


Рис. 3.12. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених жолудів від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

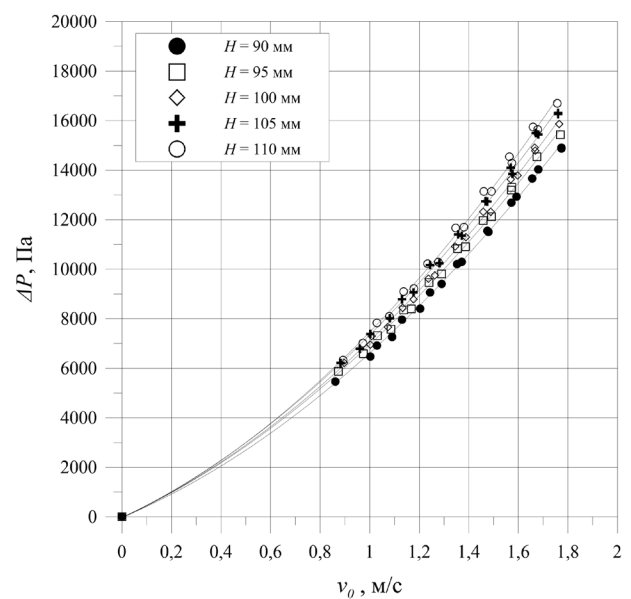


Рис. 3.13. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених жолудів від зміни фіктивної швидкості теплового агенту ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

Під час експериментального визначення гідравлічного опору шару осушених жолудів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм, як і у попередньо описаних випадках, відбувається зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу та із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агента (рис. 3.12, 3.13).

Каштани

Вологість осушених каштанів на момент проведення експериментальних досліджень становила 11,38 % мас.

Графічна залежність зміни гідравлічного опору стаціонарного шару каштанів від зміни фіктивної швидкості теплового агента для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм наведено на рис. 3.12, а для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм – на рис. 3.13.

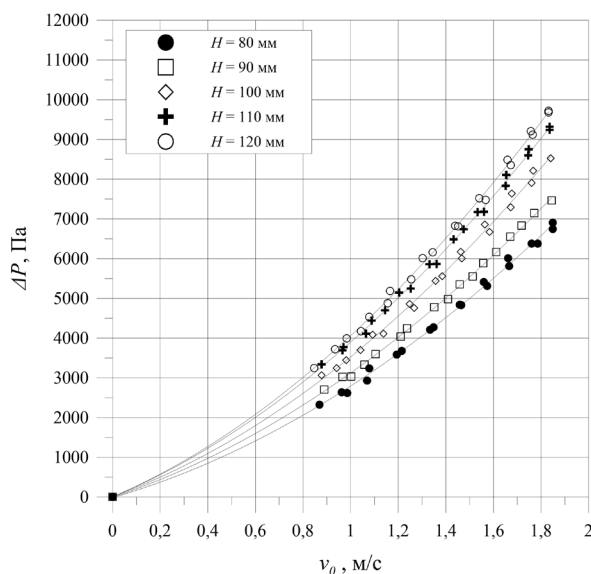


Рис. 3.14. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених каштанів від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,85$ м/с)

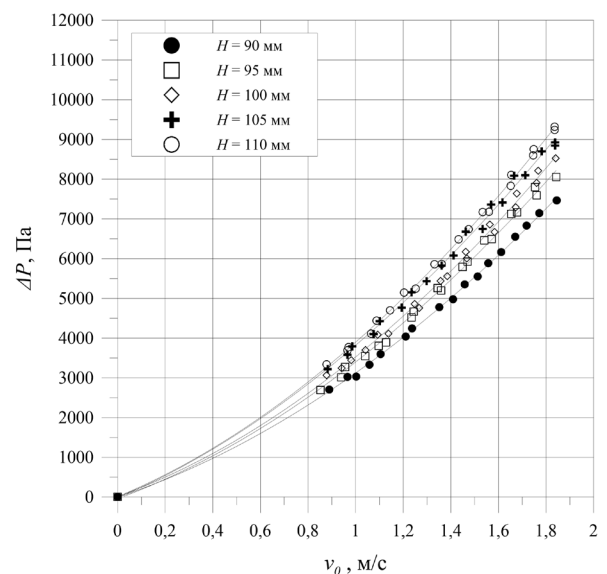


Рис. 3.15. Залежність зміни гідравлічного опору шару осушених каштанів від зміни фіктивної швидкості теплового агента ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,85$ м/с)

Під час експериментального визначення гідравлічного опору шару осушених каштанів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм, як і у попередньо описаних дослідженнях вторинної сировини рослинного походження, відбувається зростання гідравлічного опору із збільшенням висоти шару матеріалу та із зростанням фіктивної швидкості потоку теплового агента (рис. 3.14, 3.15).

3.2. Комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь шар вторинної сировини рослинного походження

Для моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу було використано програму *ANSYS Fluent 2022 R2*, що є однією з найкращих у своєму класі для CFD-моделювання. CFD-моделювання гідродинаміки руху теплового агента крізь пористий шар осушеної вторинної сировини рослинного походження у процесі фільтраційного сушіння було виконано з метою перевірки коректності використання одержаних результатів експериментальних досліджень для розширеного діапазону висот шару досліджуваних матеріалів та їх загальної універсалізації використання для розрахунку сушильного обладнання. Отримані результати дозволять прогнозувати енергетичні затрати на створення перепаду тисків руху теплового агента під час здійснення процесу фільтраційного сушіння матеріалу для розширеного діапазону меж висот шару без проведення додаткових попередніх експериментальних досліджень.

Методика виконання комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеної вторинної сировини рослинного походження наведена у розділі 2.3.7.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеної кукурудзяної післяспиртової барди наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.2 для

рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм [194].

Одержані експериментальні дані дозволяють визначити значення величин A^* та B^* на основі лінійної залежності (2.36). Будуємо графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.16).

Коефіцієнти у рівняння прямої поданої графічної залежності на рис. 3.16 відповідають величинам A^* та B^* у залежності (2.36), і рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 14629.02 \cdot H \cdot v_0 + 7571.36 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.1)$$

Рівняння (3.1), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Експериментальні дослідження щодо визначення гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди виконували за кімнатної температури, що на момент досліджень становила 16 °С. За даного значення температури, згідно літературних джерел, густина потоку повітря становить 1,226 кг/м³, а коефіцієнт динамічної в'язкості $1,79 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Підставивши наведені параметри потоку повітря у рівняння (2.38) та (2.39), отримуємо величини коефіцієнтів в'язкого опору $l/\alpha = 0,82 \cdot 10^9$ м⁻² та інерційного опору $C_2 = 1,24 \cdot 10^4$ м⁻¹ шару кукурудзяної післяспиртової барди для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм, що дають змогу виконати комп'ютерне моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди згідно методики, описаної у розділі 2.3.7.

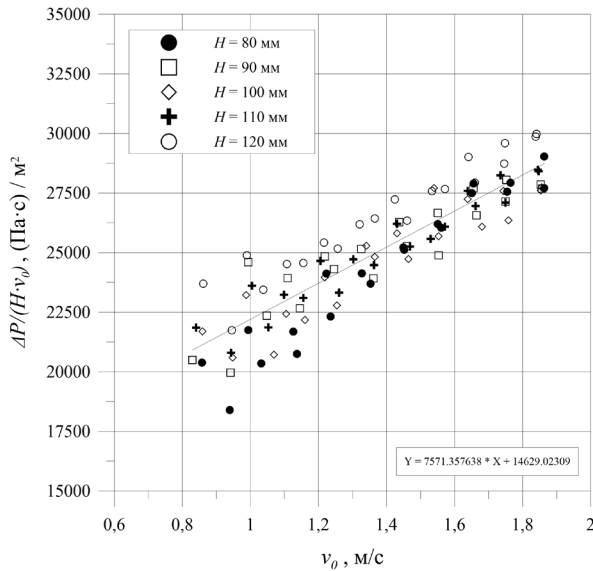


Рис. 3.16. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 16$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с)

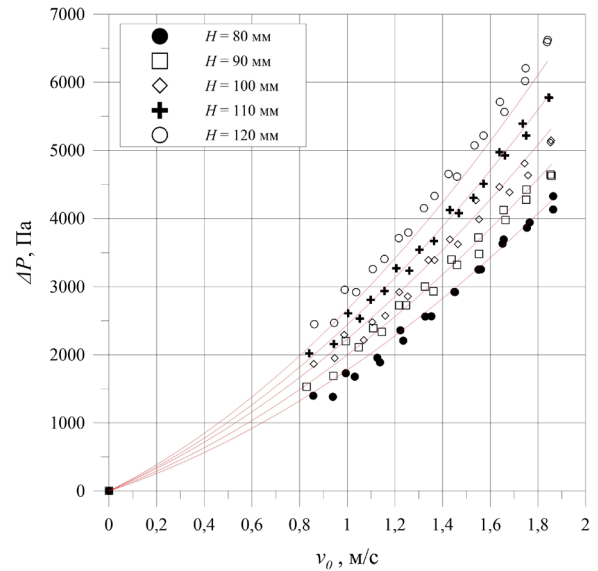


Рис. 3.17. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 16$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,86$ м/с)

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.17).

Отримані в результаті комп'ютерного моделювання графічні залежності (рис. 3.17), свідчать про відповідність розрахованих значень гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди до значень, одержаних експериментальним шляхом. У табл. 3.1 наведено значення відхилень моделювання щодо отриманих експериментальним шляхом значень гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм. Середнє значення відхилення комп'ютерного моделювання за усіма експериментальними точками

становить 3,71 %. Найбільше усереднене значення похибки становить 5,20 % для висот шару кукурудзяної післяспиртової барди $H = 120$ мм, а найбільше зафіксоване абсолютне значення відхилення моделювання – 18,22 % для висоти шару $H = 120$ мм.

Таблиця 3.1

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	4,22
90	3,28
100	3,44
110	2,42
120	5,20
Середнє значення:	3,71

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару кукурудзяної післяспиртової барди $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.18.

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 15021,43 \cdot H \cdot v_0 + 7060,39 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.2)$$

Рівняння (3.2), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм.

На основі рівняння (3.2) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $l/\alpha = 0,84 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 1,15 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару кукурудзяної післяспиртової барди для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110 \text{ мм}$.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110 \text{ мм}$ було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.19).

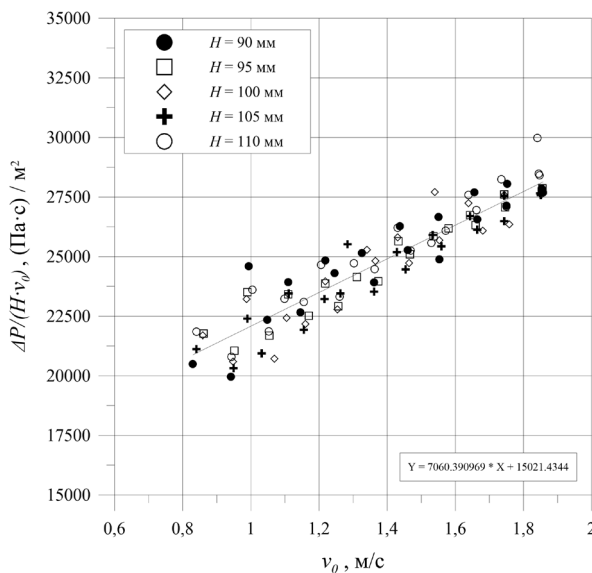


Рис. 3.18. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеної кукурудзяної післяспиртової барди ($H = 90 \div 110 \text{ мм}$, $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 0,83 \div 1,86 \text{ м/с}$)

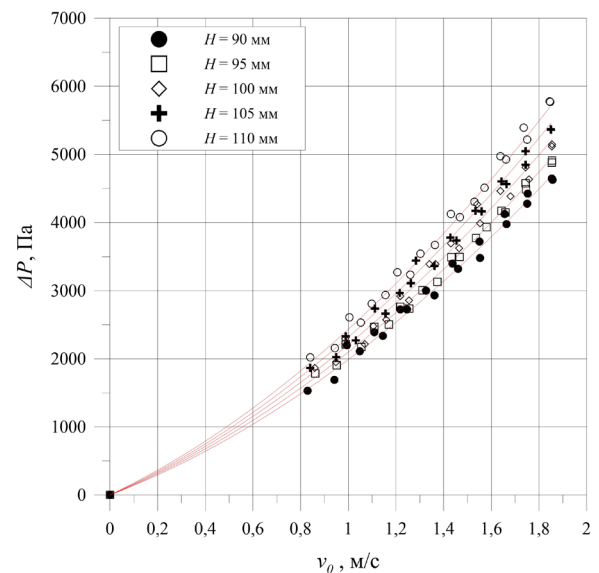


Рис. 3.19. Графічне порівняння отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110 \text{ мм}$, $T = 16 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 0,83 \div 1,86 \text{ м/с}$)

З рис. 3.19 помітно, що отримані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди дуже наближені до даних, отриманих експериментальним шляхом. Можна

стверджувати про доцільність використання експериментальних даних для висот шару досліджуваного матеріалу із меншим кроком та вужчими межами для підвищення точності комп'ютерного моделювання гідродинаміки процесу, що підтверджує попередні висновки про необхідність звуження меж досліджуваних висот для збільшення точності моделювання.

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання є меншими, ніж для моделювання для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.2. Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 2,72 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 3,28 % для висоти шару $H = 100$ мм, а найбільше абсолютне значення відхилення по усіх точках – 10,41 % для висоти шару $H = 90$ мм.

Таблиця 3.2

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	3,10
95	2,04
100	3,28
105	2,74
110	2,45
Середнє значення:	2,72

Як свідчить аналіз результатів комп'ютерного моделювання гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди, звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання. Порівняння одержаних усереднених відхилень для різних висот також вказує, що результати знаходяться в допустимих межах

(< 10 %), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару кукурудзяної післяспиртової барди можна використовувати для ширшого діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Для підтвердження коректності виконаного комп'ютерного моделювання було додатково виведено графічні візуалізації розподілу поля статичного тиску (рис. 3.20) та векторного поля швидкостей (рис. 3.21) у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди.

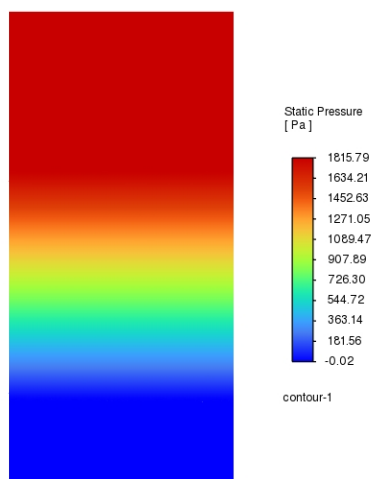


Рис. 3.20. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди ($H = 100$ мм, $T = 16$ °C, $v_0 = 0,86$ м/с)

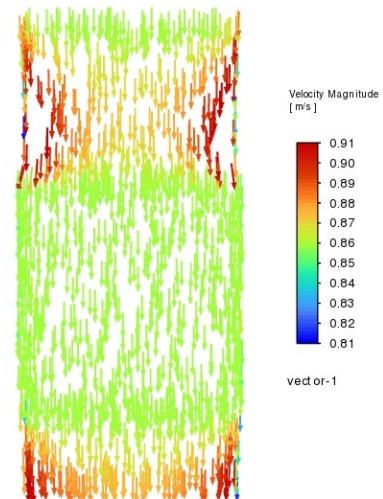


Рис. 3.21. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди ($H = 100$ мм, $T = 16$ °C, $v_0 = 0,86$ м/с)

Одержані візуалізації у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* підтверджують коректність виконаного моделювання та використаної для цього методики: спостерігається поступове зменшення статичного тиску, вздовж шляху проходження потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної

післяспиртової барди, а також спостерігається його стале значення у зонах над та під шаром матеріалу (рис. 3.20). Аналізуючи векторний розподіл поля швидкостей (рис. 3.21), бачимо, що потоку теплового агенту характерний прямолінійний рух вздовж області моделювання, додатково спостерігається його сповільнення біля стінок розрахункової області та на вході у пористу зону (рис. 3.21).

Ячмінна пивна дробина

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеної ячмінної пивної дробини наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.4 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм. За описаною вище методикою будемо графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.22).

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару ячмінної пивної дробини набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 27655,11 \cdot H \cdot v_0 + 47046,56 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.3)$$

Рівняння (3.3), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушеної ячмінної пивної дробини під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.3) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 2,63 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 4,54 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару ячмінної пивної дробини для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини для проміжку досліджуваних

висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.23).

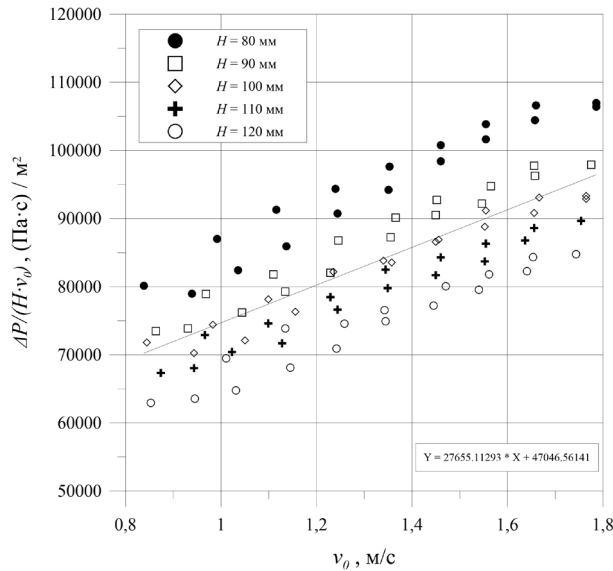


Рис. 3.22. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеної ячмінної пивної дробини ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

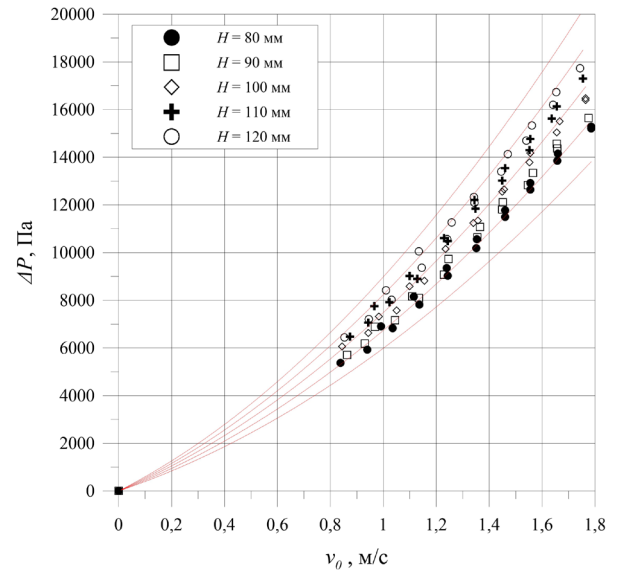


Рис. 3.23. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару ячмінної пивної дробини з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.23, спостерігаємо певне відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону. Дана тенденція підтверджує попередні висновки про доцільність досліджень на вузькому проміжку значень досліджуваних висот шару матеріалу.

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 3.3, у вигляді окремих значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх усереднене значення за усіма точками експерименту.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 6,85 % (табл. 3.3). Найменше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 1,88 % для висоти шару $H = 100$ мм, а найбільше усереднене значення відхилення за усіма точками 12,12 % для висоти шару $H = 120$ мм.

Таблиця 3.3

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний ячмінної пивної дробини для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	11,22
90	3,26
100	1,88
110	5,74
120	12,12
Середнє значення:	6,85

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару ячмінної пивної дробини $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.24.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушеної ячмінної пивної дробини під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 47369,83 \cdot H \cdot v_0 + 26962,55 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.4)$$

На основі рівняння (3.4) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 2,65 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 4,43 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару ячмінної пивної

дробини для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110$ мм. Результати комп'ютерного моделювання було порівняно із експериментальними даними та подано у вигляді залежності зміни ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.25).

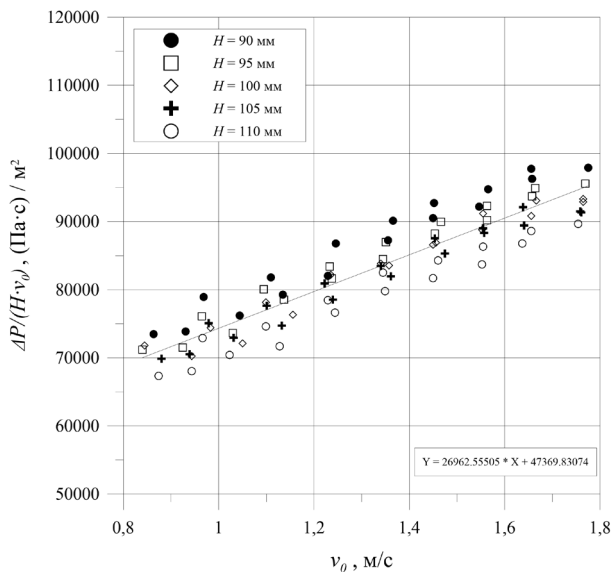


Рис. 3.24. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеної ячмінної пивної дробини ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

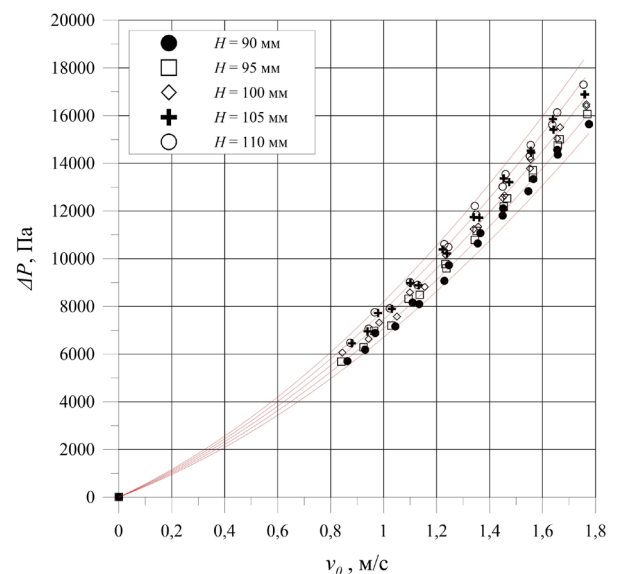


Рис. 3.25. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідралічного опору шару ячмінної пивної дробини з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 0,83 \div 1,78$ м/с)

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання є меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.4. Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 2,91 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 5,03 % для висоти шару $H = 110$ мм, а найменше – 1,64 % для висоти шару $H = 100$ мм.

Як свідчить аналіз результатів комп'ютерного моделювання гідралічного опору шару ячмінної пивної дробини, аналогічно до шару кукурудзяної післяспиртової барди, звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання.

Результати моделювання знаходяться в допустимих межах ($< 10\%$), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару ячмінної пивної дробини можна використовувати для ширшого діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Таблиця 3.4

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	3,91
95	1,82
100	1,64
105	2,15
110	5,03
Середнє значення:	2,91

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. А7, додаток А) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. А8, додаток А) підтверджують коректність моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини та мають аналогічний характер, як і у випадку кукурудзяної післяспиртової барди.

Відходи кавового виробництва

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених відходів кавового виробництва наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.6 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$

мм. За описаною вище методикою було побудовано графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару відходів кавового виробництва $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.26).

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару осушених відходів кавового виробництва набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 63970,68 \cdot H \cdot v_0 + 31810,12 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.5)$$

Рівняння (3.5), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушених відходів кавового виробництва під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.5) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 3,57 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 5,23 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушених відходів кавового виробництва для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених відходів кавового виробництва для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.27).

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.27, спостерігаємо певне відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 3.5, у вигляді усереднених значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх усереднене значення за усіма точками експерименту.

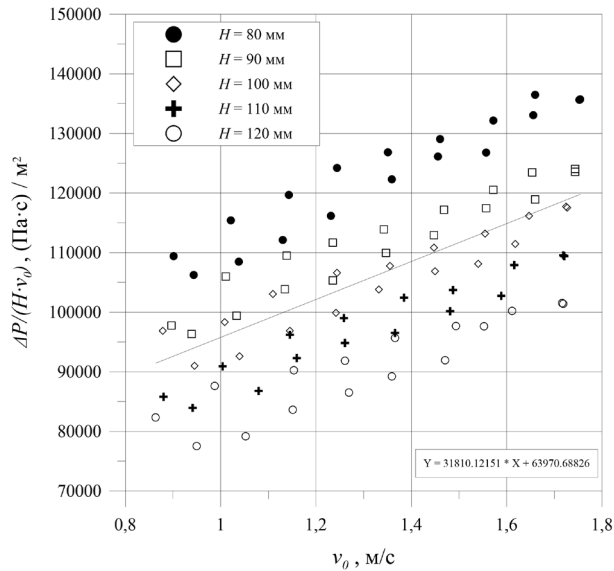


Рис. 3.26. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених відходів кавового виробництва ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

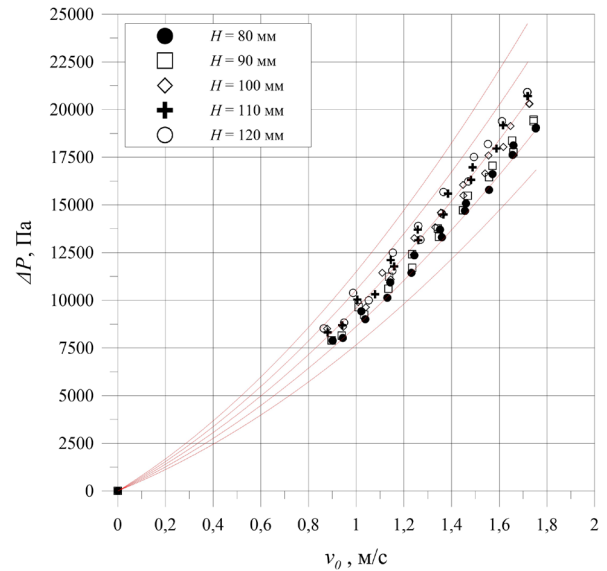


Рис. 3.27. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушених відходів кавового виробництва з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

Таблиця 3.5

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених відходів кавового виробництва для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	13,16
90	4,44
100	2,66
110	8,67
120	16,52
Середнє значення:	8,92

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 8,92 % (табл. 3.5). Найменше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 2,66 % для висоти шару $H = 100$ мм, а найбільше усереднене значення відхилення за усіма точками 16,52 % для висоти шару $H = 120$ мм.

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару відходів кавового виробництва $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.28.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушених відходів кавового виробництва під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 66014,57 \cdot H \cdot v_0 + 29649,32 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.6)$$

На основі рівняння (3.6) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 3,69 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 4,87 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару відходів кавового виробництва для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.29).

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання для проміжку висот відходів кавового виробництва $H = 90 \div 110$ мм є меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.6. Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 4,28 %. Найбільше усереднене значення

відхилення комп'ютерного моделювання становить 7,97 % для висоти шару $H = 110$ мм, а найменше – 2,43 % для висоти шару $H = 100$ мм.

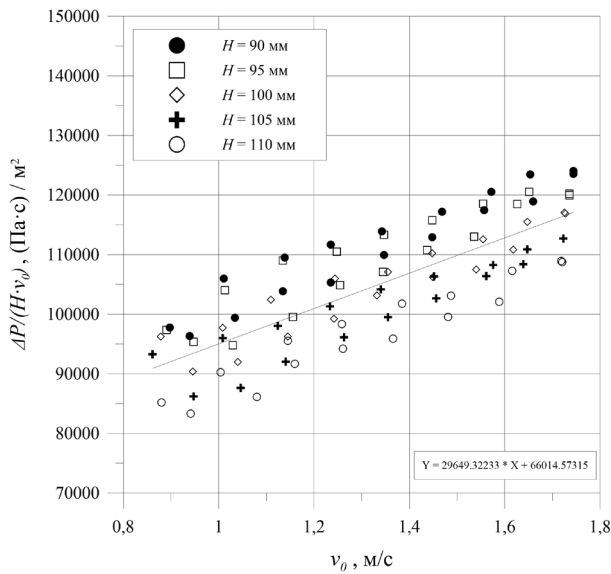


Рис. 3.28. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених відходів кавового виробництва ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

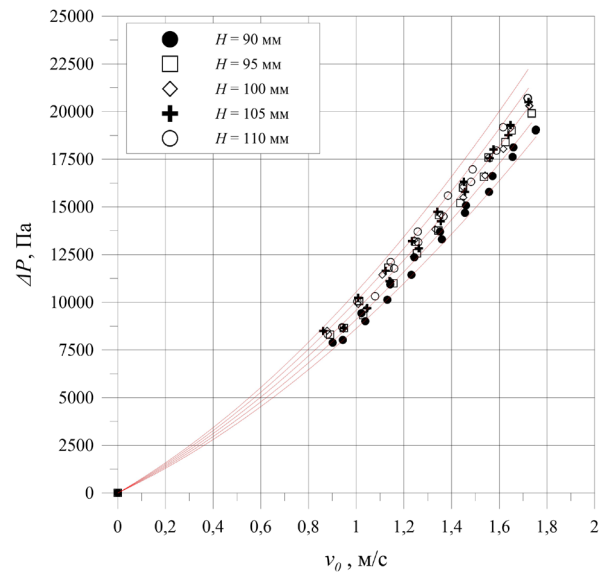


Рис. 3.29. Графічне порівняння отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару відходів кавового виробництва з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 0,86 \div 1,75$ м/с)

Аналогічно до результатів моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди та ячмінної пивної дробини, звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання. Результати моделювання знаходяться в допустимих межах (< 10 %), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару відходів виробництва кави можна використовувати для розширеного діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. A9, додаток A) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. A10, додаток A),

підтверджують коректність моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва та мають аналогічний характер, як і у випадку кукурудзяної післяспиртової барди та ячмінної пивної дробини.

Таблиця 3.6

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	3,01
95	4,06
100	2,43
105	4,36
110	7,97
Середнє значення:	4,28

Буряковий жом

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.8 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм. За описаною вище методикою було побудовано графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару осушеного бурякового жому $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.30).

Згідно описаного вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 13473,57 \cdot H \cdot v_0 + 9602,22 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.7)$$

Рівняння (3.7), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушеного бурякового жому під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.7) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 7,49 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 1,59 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушеного бурякового жому для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.31).

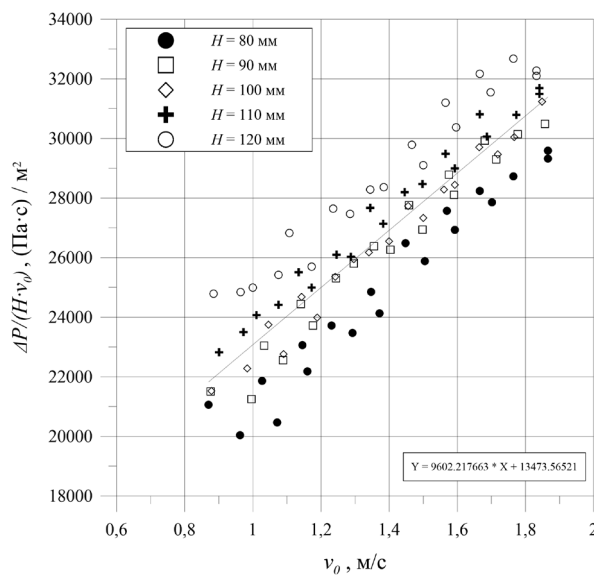


Рис. 3.30. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеного бурякового жому ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

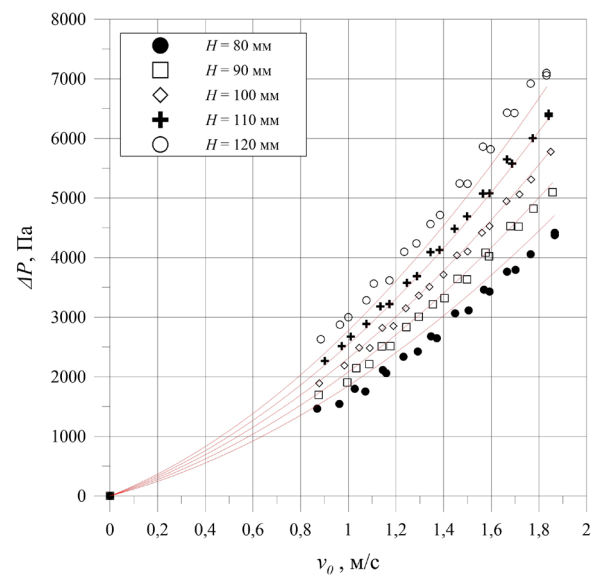


Рис. 3.31. Графічне порівняння отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.31, спостерігаємо певне відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм відносно експериментальних даних подано у табл. 3.7, у вигляді усереднених значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх усереднене значення за усіма точками експерименту.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 4,09 % (табл. 3.7). Найменше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 1,59 % для висоти шару $H = 100$ мм, а найбільше усереднене значення відхилення за усіма точками 7,86 % для висоти шару $H = 80$ мм.

Таблиця 3.7

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

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

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару відходів осушеного бурякового жому $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху

теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.32.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 13397,77 \cdot H \cdot v_0 + 9706,28 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.8)$$

На основі рівняння (3.8) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 7,44 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 1,61 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушеного бурякового жому для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.33).

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання для проміжку висот осушеного бурякового жому $H = 90 \div 110$ мм є меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.8.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 2,19 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 2,64 % для висоти шару $H = 90$ мм, а найменше – 1,72 % для висоти шару $H = 100$ мм (табл. 3.8).

Аналогічно до результатів моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар матеріалів, досліджених раніше, звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання. Результати моделювання знаходяться в допустимих межах (< 10 %), що дає змогу стверджувати, що одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару бурякового жому можна

використовувати для розширеного діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

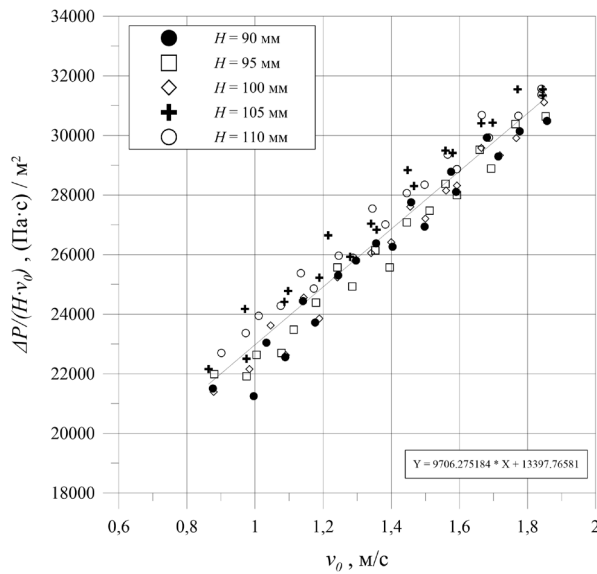


Рис. 3.32 Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушеного бурякового жому ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

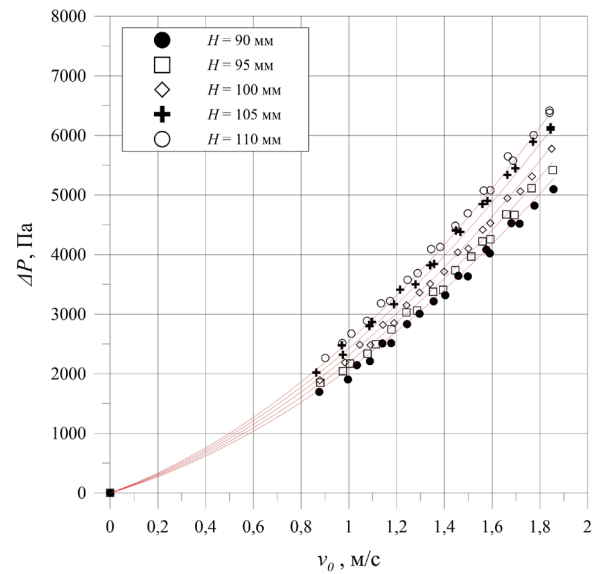


Рис. 3.33. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушеного бурякового жому з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,86$ м/с)

Таблиця 3.8

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

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

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. A11, додаток А) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. A12, додаток А), підтверджують коректність моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушеного бурякового жому та мають аналогічний характер, як і у випадку кукурудзяної післяспиртової барди, ячмінної пивної дробини та відходів кавового виробництва.

Яблучні вичавки

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушених яблучних вичавок наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.10 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм. За описаною вище методикою було побудовано графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару осушених яблучних вичавок $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.34).

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 3073,57 \cdot H \cdot v_0 + 3397,46 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.9)$$

Рівняння (3.9), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушених яблучних вичавок під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.9) та параметрів потоку теплового агента відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 1,71 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 5,6 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ шару осушених яблучних вичавок для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених яблучних вичавок для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.35).

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.39, спостерігаємо певне відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

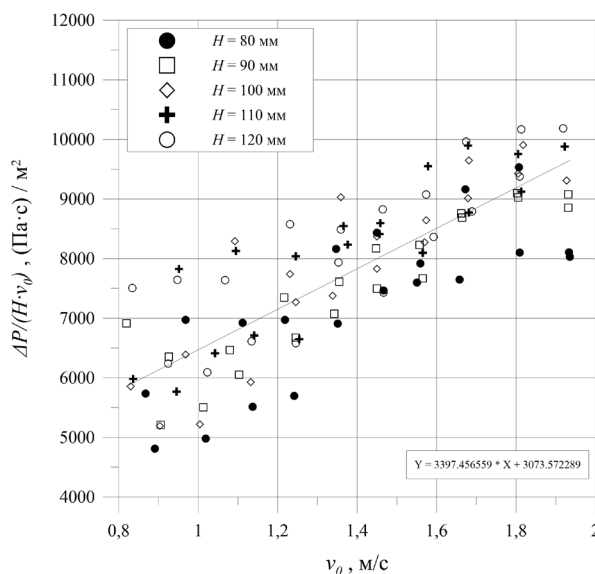


Рис. 3.34. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених яблучних вичавок ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

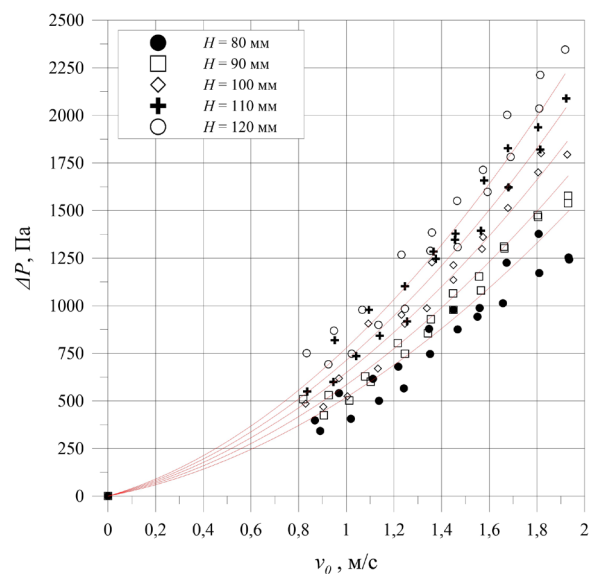


Рис. 3.35. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 3.9, у вигляді усереднених значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх усереднене значення за усіма точками експерименту.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 8,28 % (табл. 3.9).

Таблиця 3.9

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених яблучних вичавок для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	12,72
90	6,73
100	7,08
110	6,80
120	8,07
Середнє значення:	8,28

Найменше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 6,73 % для висоти шару $H = 90$ мм, а найбільше усереднене значення відхилення за усіма точками 12,72 % для висоти шару $H = 80$ мм (табл. 3.9).

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару осушених яблучних вичавок $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.36.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 2896,48 \cdot H \cdot v_0 + 3532,54 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.10)$$

На основі рівняння (3.10) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів

в'язкого опору $1/\alpha = 1,61 \cdot 10^8 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 5,82 \cdot 10^3 \text{ м}^{-1}$ шару осушених яблучних вичавок для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар яблучних вичавок для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.37).

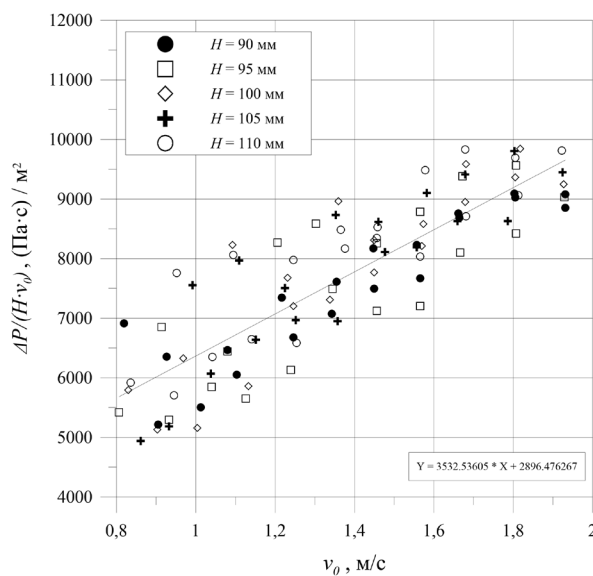


Рис. 3.36. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених яблучних вичавок ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

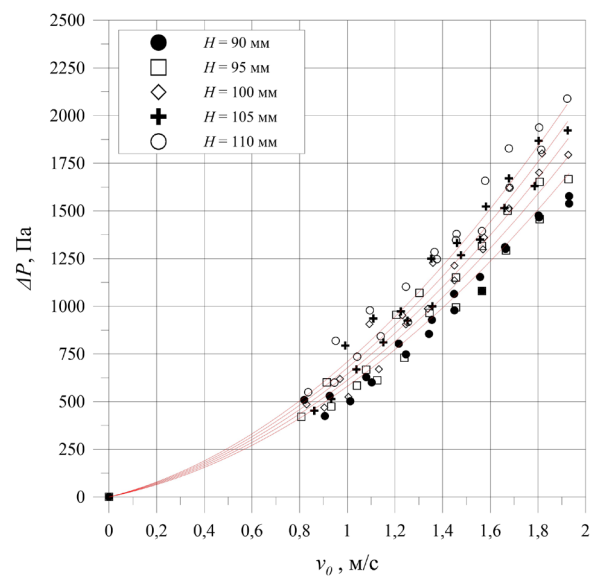


Рис. 3.37. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару яблучних вичавок з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,93$ м/с)

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання для проміжку висот яблучних вичавок $H = 90 \div 110$ мм є меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.10.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 7,56 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 7,59 % для висоти шару

$H = 105$ мм, а найменше – 6,71 % для висоти шару $H = 110$ мм (табл. 3.10).

Таблиця 3.10

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар яблучних вичавок для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	6,96
95	9,62
100	6,95
105	7,59
110	6,71
Середнє значення:	7,56

Аналогічно до зроблених раніше висновків, звуження меж досліджуваного шару висот та кроку висот зменшує усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання, які знаходяться в допустимих межах (< 10 %). Одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару яблучних вичавок можливо використовувати для розширеного діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. A13, додаток А) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. A14, додаток А), підтверджують коректність моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар яблучних вичавок та мають аналогічний характер, як і у випадку кукурудзяної післяспиртової барди, ячмінної пивної дробини, відходів виробництва кави та бурякового жому.

Жолуді

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар осушених жолудів наведено у вигляді графічної залежності

$\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.12 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм. За описаною вище методикою було побудовано графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару осушених яблучних вичавок $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.38).

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару осушених яблучних вичавок набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 44893,2 \cdot H \cdot v_0 + 26321,85 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.11)$$

Рівняння (3.11), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушених жолудів під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.11) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 2,49 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 4,35 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушених жолудів для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар жолудів для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.39).

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.45, спостерігаємо певне відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 3.11.

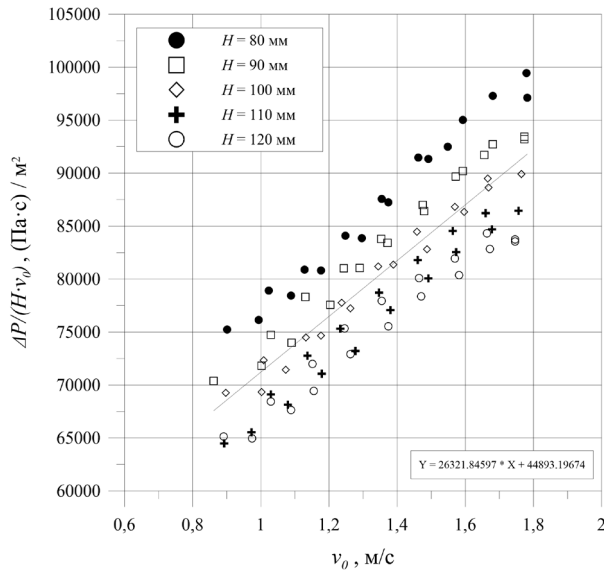


Рис. 3.38. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених жолудів ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

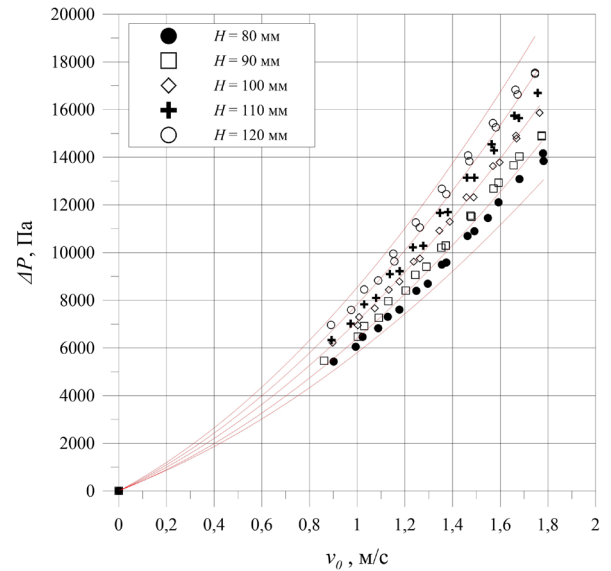


Рис. 3.39. Графічне порівняння отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушених жолудів з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

Таблиця 3.11

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	7,13
90	2,90
100	1,19
110	4,81
120	6,49
Середнє значення:	4,47

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 4,47 % (табл. 3.11). Найменше усереднене

значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 1,19 % для висоти шару $H = 100$ мм, а найбільше усереднене значення – 7,13 % для $H = 80$ мм.

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару осушених жолудів $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.40.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушених жолудів під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 44416,86 \cdot H \cdot v_0 + 26496,32 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.12)$$

На основі рівняння (3.12) та параметрів потоку теплового агента відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 2,47 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 4,38 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушених жолудів для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.41).

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання для проміжку висот шару жолудів $H = 90 \div 110$ мм є меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та подані у табл. 3.12.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 2,64 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 4,65 % для висоти шару $H = 110$ мм, а найменше – 1,16 % для висоти шару $H = 100$ мм (табл. 3.12).

Аналогічно до зроблених раніше висновків, зважаючи на одержані результати комп'ютерного моделювання, одержані рівняння для прогнозування гідравлічного опору шару жолудів дубу звичайного можливо використовувати

для розширеного діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

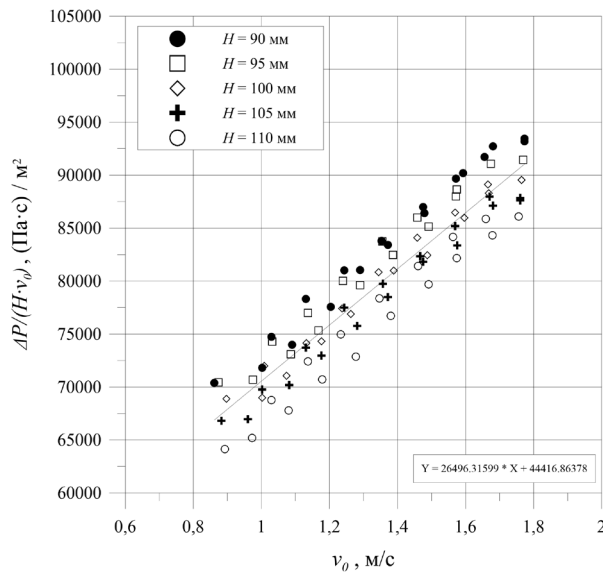


Рис. 3.40. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених жолудів ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

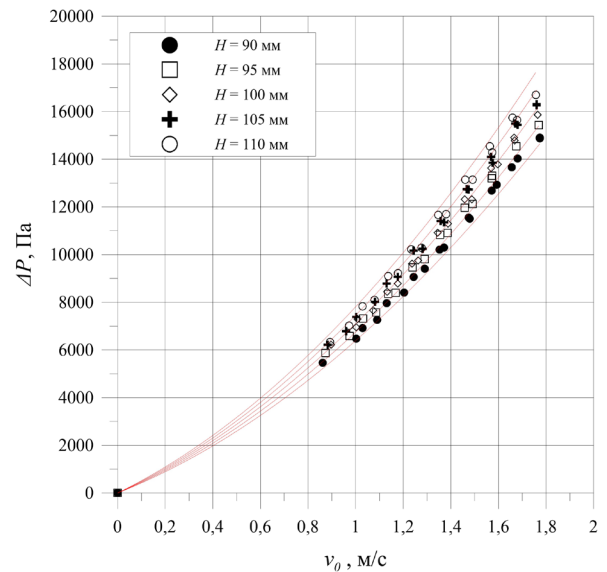


Рис. 3.41. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару жолудів з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,78$ м/с)

Таблиця 3.12

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	3,04
95	2,22
100	1,16
105	2,12
110	4,65
Середнє значення:	2,64

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. A15, додаток А) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. A16, додаток А), підтверджують коректність моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів та мають аналогічний характер, як і у випадку інших досліджених матеріалів.

Каштани

Результати дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар осушених каштанів наведено у вигляді графічної залежності $\Delta P = f(v_0)$ у розділі 3.1 на рис. 3.14 для рекомендованих значень висоти шару матеріалу для сушіння у промислових умовах $H = 80 \div 120$ мм. За описаною вище методикою було побудовано графічну залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, що зображується у вигляді усередненої лінії для проміжку досліджуваних висот шару осушених яблучних вичавок $H = 80 \div 120$ мм (рис. 3.42).

Згідно описано у даному розділі вище, рівняння (2.37) для вираження гідравлічного опору шару осушених каштанів набуде наступного вигляду для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм:

$$\Delta P = 21852,26 \cdot H \cdot v_0 + 12958,51 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.13)$$

Рівняння (3.13), отримане в результаті виконання експериментальних досліджень, дає можливість розраховувати гідравлічний опір шару осушених каштанів під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

На основі рівняння (3.13) та параметрів потоку теплового агента відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів в'язкого опору $1/\alpha = 1,21 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 2,14 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушених каштанів для обраного проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120$ мм.

Одержані результати комп'ютерного моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар каштанів для проміжку досліджуваних висот шару

матеріалу $H = 80 \div 120$ мм було порівняно із експериментально одержаними даними та подано у вигляді залежності зміни гідравлічного опору ΔP від фіктивної швидкості v_0 (рис. 3.43).

Аналізуючи отримані графічні залежності, зображені на рис. 3.43, аналогічно до інших досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження, спостерігаємо відхилення отриманих результатів моделювання по відношенню до експериментальних даних по мірі збільшення різниці висот шару відносно від середньої висоти шару досліджуваного діапазону.

Розраховані відхилення результатів комп'ютерного моделювання відносно експериментальних даних подано у табл. 3.13, у вигляді усереднених значень для кожної досліджуваної висоти шару та їх усереднене значення за усіма точками експерименту.

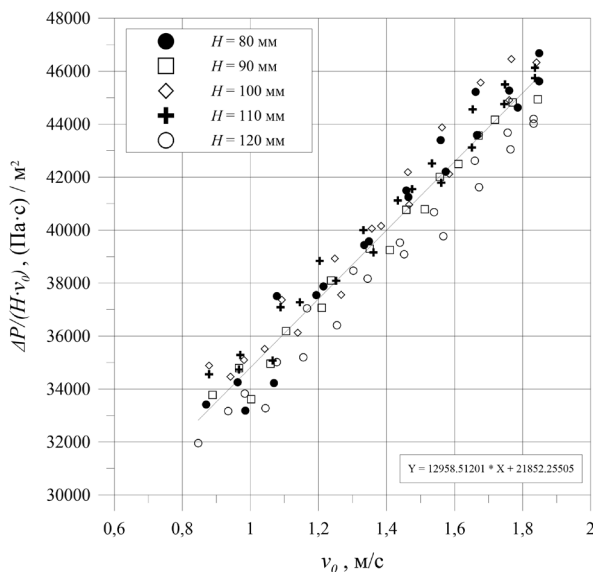


Рис. 3.42. Графічна залежність

$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених каштанів ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,85$ м/с)

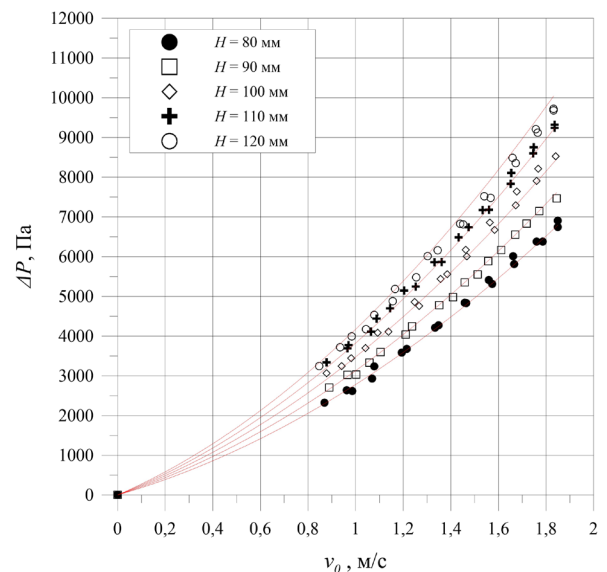


Рис. 3.43. Графічне порівняння

отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару осушених каштанів з експериментально одержаними (точки) ($H = 80 \div 120$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 0,86 \div 1,85$ м/с)

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 1,92 % (табл. 3.11). Найменше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 1,06 % для висоти шару $H = 90$ мм, а найбільше усереднене значення відхилення за усіма точками 3,21 % для висоти шару $H = 120$ мм.

Таблиця 3.13

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар каштанів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
80	1,65
90	1,06
100	1,93
110	1,64
120	3,21
Середнє значення:	1,92

Для звуженого проміжку досліджуваних висот шару осушених каштанів $H = 90 \div 110$ мм, результати дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного матеріалу у вигляді графічної залежності $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$, наведено на рис. 3.44.

Згідно описаного у даному розділі вище, рівняння для розрахунку гідравлічного опору шару осушених каштанів під час процесу фільтраційного сушіння для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм:

$$\Delta P = 22471,51 \cdot H \cdot v_0 + 12992,12 \cdot H \cdot v_0^2, \quad (3.14)$$

На основі рівняння (3.14) та параметрів потоку теплового агенту відповідно до рівнянь (2.38) і (2.39), було визначено значення коефіцієнтів

в'язкого опору $1/\alpha = 1,25 \cdot 10^9 \text{ м}^{-2}$ та інерційного опору $C_2 = 2,15 \cdot 10^4 \text{ м}^{-1}$ шару осушених каштанів для обраного проміжку висот матеріалу $H = 90 \div 110 \text{ мм}$.

Одержані результати комп'ютерного моделювання для шару осушених каштанів для проміжку досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110 \text{ мм}$ було порівняно із експериментально одержаними даними (рис. 3.45).

Визначені величини відносних відхилень комп'ютерного моделювання для проміжку висот шару каштанів $H = 90 \div 110 \text{ мм}$ є дещо меншими, ніж для моделювання для проміжку висот матеріалу $H = 80 \div 120 \text{ мм}$ та подані у табл. 3.14.

Усереднене значення відносного відхилення за усіма розрахованими точками досліджень становить 1,78 %. Найбільше усереднене значення відхилення комп'ютерного моделювання становить 2,62 % для висоти шару $H = 90 \text{ мм}$, а найменше – 1,30 % для висоти шару $H = 110 \text{ мм}$ (табл. 3.14).

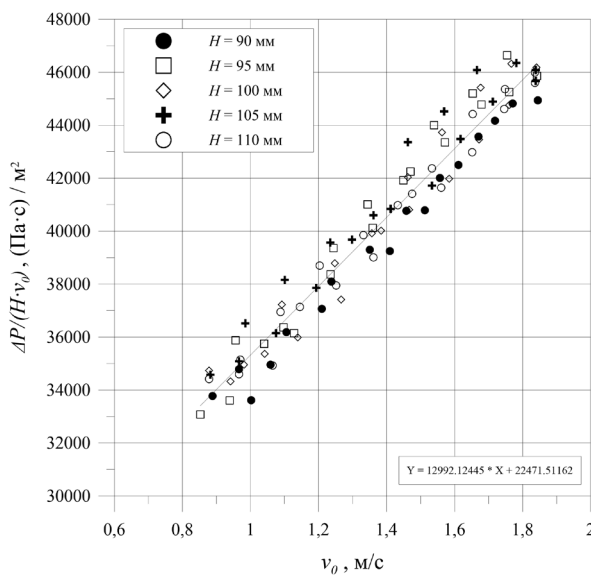


Рис. 3.44. Графічна залежність $\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = f(v_0)$ для досліджених висот шару осушених каштанів ($H = 90 \div 110 \text{ мм}$, $T = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 0,86 \div 1,85 \text{ м/с}$)

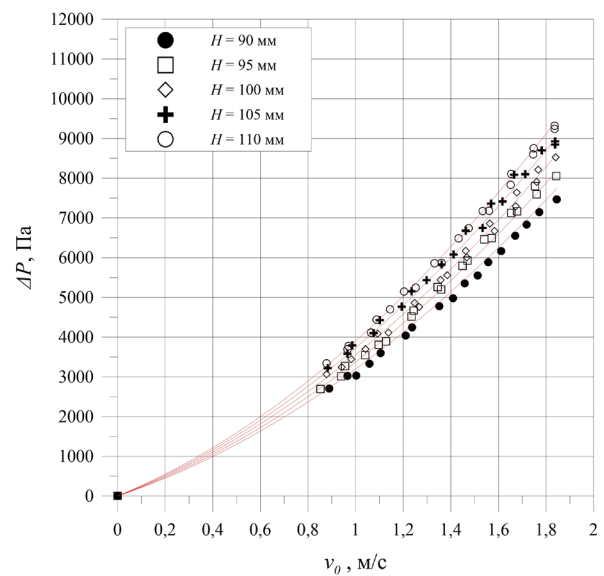


Рис. 3.45. Графічне порівняння отриманих значень моделювання (лінії) гідравлічного опору шару каштанів з експериментально одержаними (точки) ($H = 90 \div 110 \text{ мм}$, $T = 19 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 0,86 \div 1,85 \text{ м/с}$)

Аналогічно до зроблених раніше висновків, зважаючи на одержані результати комп'ютерного моделювання, одержані рівняння для прогнозування

гідравлічного опору шару каштанів гіркокаштану звичайного можливо використовувати для розширеного діапазону висот шару матеріалу для розрахунків параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Таблиця 3.14

Відносне відхилення результатів комп'ютерного моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар каштанів для досліджуваних висот шару матеріалу $H = 90 \div 110$ мм

Висота шару матеріалу, мм	Усереднене відхилення моделювання, %
90	2,62
95	1,64
100	1,64
105	1,78
110	1,30
Середнє значення:	1,78

Одержані у програмі *ANSYS Fluent 2022 R2* візуалізації розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання (рис. A17, додаток А) та векторного розподілу поля швидкостей (рис. A18, додаток А), підтверджують коректність моделювання руху теплового агенту крізь стаціонарний шар каштанів та мають аналогічний характер, як і у випадку кукурудзяної післяспиртової барди, ячмінної пивної дробини, відходів виробництва кави, бурякового жому, яблучних вичавок та жолудів.

3.3. Узагальнення результатів експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар вторинної сировини рослинного походження

Рух теплового агенту крізь стаціонарний шар матеріалу під час процесу фільтраційного сушіння характеризується обтіканням ним окремих частинок (зовнішня задача гідродинаміки) і рухом у каналах між частинками (внутрішня

задача гідродинаміки). Рух теплового агента в проміжках між частинками зернистого шару можна описати рівнянням Нав'є–Стокса, але застосувати це рівняння у диференціальній формі для визначення втрат тиску в шарі полідисперсного матеріалу (який складається із частинок різних за формою і геометричними розмірами) є практично неможливим. Це пояснюється неможливістю сформулювати початкові і граничні умови, які складаються при обтіканні окремих частинок шару. Однак рівняння Нав'є–Стокса можна привести до безрозмірного виду за допомогою теорії подібності та отримати критеріальні рівняння, у які входять інваріанти фізичної подібності:

$$f(Eu, Re, Fr, Ho) = 0 \quad (3.15)$$

Дане рівняння відображає фізичну і динамічну подібність потоків газу, а також їх подібність в часі. Однак на втрати напору в шарі зернистого матеріалу має значний вплив структура шару зернистого матеріалу. Тому для повної подібності рівняння (3.15) необхідно доповнити критерієм геометричної подібності, який характеризує структуру шару зернистого матеріалу:

$$f(Eu, Re, Fr, Ho, \Gamma) = 0 \quad (3.16)$$

Критерії Re, Fr, Ho, Γ характеризують умови однозначності гідравлічної системи і їх можна розрахувати. Тільки критерій Ейлера є наслідком цієї подібності, бо в нього входить така величина як втрата тиску (ΔP), значення якої залежить від фізичних властивостей потоку (ρ і μ), швидкості руху (v) і структурних характеристик шару (H, d_e, ε). Тому рівняння (3.15) можна переписати у вигляді:

$$Eu = f(Re, Fr, Ho, \Gamma) \quad (3.17)$$

Кількісний вплив перелічених визначальних критеріїв на хід процесу є неоднаковим. Беручи до уваги те, що при дослідженні гідродинаміки сухого шару дисперсного матеріалу рух газу є встановленим, то впливом на гідродинаміку критерію гомохромності (Ho) можна знехтувати. Враховуючи невелику густину

повітря, а також вимушений рух повітря, впливом сили тяжіння на втрати напору, а отже і критерієм Фруда (Fr), також можна знехтувати, а рівняння (3.17) можна переписати у вигляді степеневі функції:

$$Eu = A \cdot Re^n \cdot \Gamma^y \quad (3.18)$$

або

$$Eu = A \cdot Re^n \cdot \left(\frac{H}{d}\right)^m \quad (3.19)$$

Значення константи A і показників степенів n та m знайти за допомогою теорії подібності є неможливо. Їх знаходять шляхом опрацювання експериментальних даних конкретних процесів. Дуже важливо під час узагальнення гідродинаміки руху теплового агента визначити, що буде мати визначальний вплив на втрати тиску в шарі дисперсного матеріалу: діаметр і форма частинок, які формують шар, або розміри і форма пор крізь які фільтрується тепловий агент. В технічній літературі як визначальні застосовуються як розміри частинок так і еквівалентний діаметр пор [146].

Кукурудзяна післяспиртова барда

Аналіз отриманих результатів експериментальних досліджень (рис. 3.46) вказує на те, що критерій Ейлера залежить від висоти шару матеріалу, а експериментальні значення критерію Ейлера з достатньою точністю добре апроксимуються степеневою залежністю. Криві є майже паралельними між собою, а відстань між кривими є пропорційною зміні висоти шару досліджуваного матеріалу (рис. 3.46).

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса $Eu = A \cdot Re^n$ наведено у табл. 3.15.

З огляду на те, що константи A є різними для різних висот шару матеріалу, узагальнимо значення цієї константи для усієї висоти, зобразивши графічну залежність $A = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$ (рис.3.47).

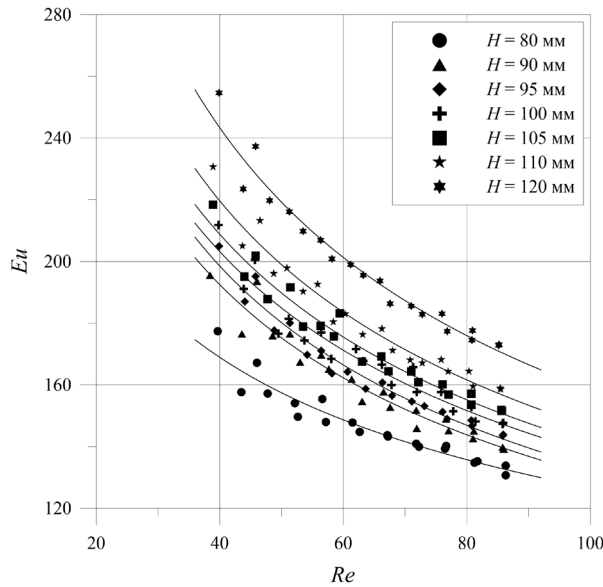


Рис. 3.46. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди

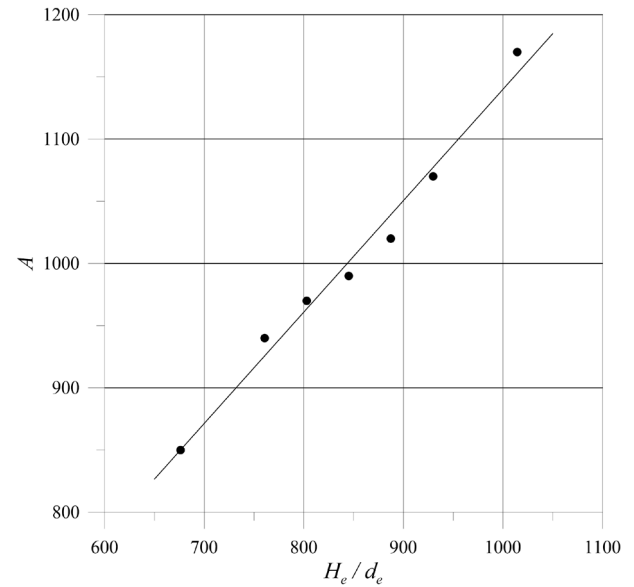


Рис. 3.47. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди

Еквівалентну висоту шару H_e , з огляду на рекомендації [146], приймаємо рівною:

$$H_e = 1,5 \cdot H, \quad (3.20)$$

де H – висота шару матеріалу, м.

Еквівалентний діаметр розраховували як відношення порізності шару до питомої поверхні a :

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (3.21)$$

де ε – порізність шару, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Питому поверхню визначали за методикою, наведеною у розділі 2.3.12. Приклад визначення питомої поверхні кукурудзяної післяспиртової барди за допомогою мікроскопічного методу наведено на рис. Б1, додаток Б. Результати визначення питомої поверхні наведено у описі об'єктів досліджень у розділі 2.1.

Внаслідок аналізу побудованої залежності (рис. 3.47), отримуємо значення константи A для всіх висот шару кукурудзяної післяспиртової барди, а також

узагальнююче рівняння виду $Eu = A \cdot Re^n \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^m$, що характеризує залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса:

$$Eu = 1,2 \cdot Re^{-0,43} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.22)$$

Таблиця 3.15

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар кукурудзяної післяспиртової барди

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	676	850	-0,43
0,09	761	940	
0,095	803	970	
0,1	845	990	
0,105	888	1020	
0,11	930	1070	
0,12	1014	1170	

Ячмінна пивна дробина

Результати аналізу одержаних експериментальних даних наведені на рис. 3.48. Результати визначення констант A і показника степеня n для залежності $Eu = A \cdot Re^n$ наведено у табл. 3.16. Питому поверхню ячмінної пивної дробини визначали за допомогою електронного штангенциркуля за методикою, наведеною в розділі 2.3.12.

Узагальнимо значення константи A для усієї висоти шару ячмінної пивної дробини, зобразивши графічну залежність $A = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$ (рис. 3.49).

Внаслідок аналізу побудованої залежності (рис. 3.49), отримуємо значення константи A для всіх висот шару ячмінної пивної дробини, а також узагальнююче рівняння залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса:

$$Eu = 25 \cdot Re^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.23)$$

Таблиця 3.16

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар ячмінної пивної дробини

H , м	H_e/d_e	A	n
0,08	320	9500	-0,5
0,09	360	9800	
0,095	380	10050	
0,1	400	10290	
0,105	421	10600	
0,11	441	10700	
0,12	481	11000	

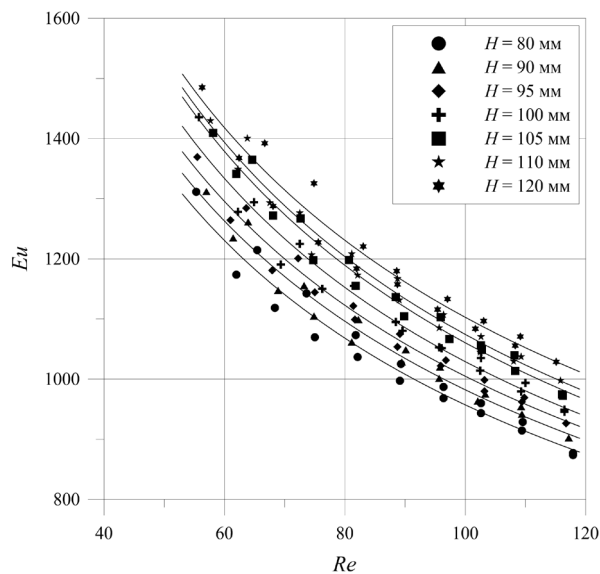


Рис. 3.48. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар ячмінної пивної дробини

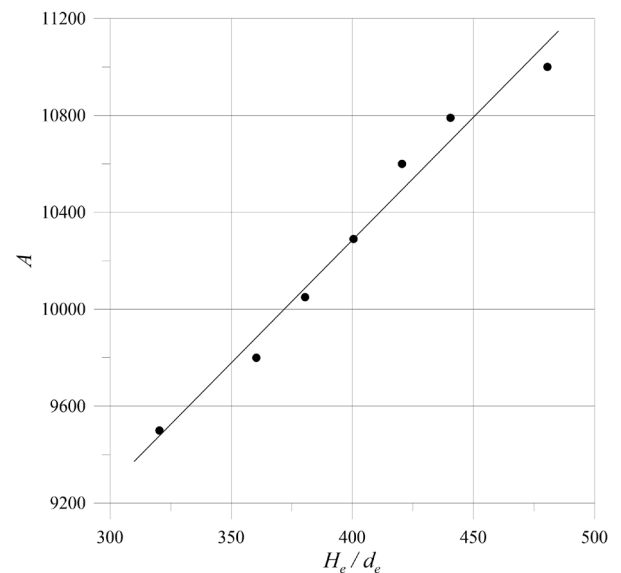


Рис. 3.49. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар ячмінної пивної дробини

Відходи кавового виробництва

Результати аналізу одержаних експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар відходів виробництва кави подано на рис. 3.50.

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Eu від критерію Re наведено у табл. 3.17. Приклад визначення питомої поверхні відходів виробництва кави за допомогою мікроскопічного методу наведено на рис. Б2, додаток Б.

Таблиця 3.17

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар відходів виробництва кави

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	279	13300	-0,59
0,09	313	13740	
0,095	331	13980	
0,1	348	14120	
0,105	366	14330	
0,11	383	14530	
0,12	418	14800	

Узагальнюємо значення константи A за допомогою графічної залежності (рис. 3.51), внаслідок аналізу якої отримуємо значення константи A для всіх висот досліджуваного шару відходів виробництва кави, а також узагальнююче рівняння залежності критерію Eu від критерію Re :

$$Eu = 40 \cdot Re^{-0,59} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.24)$$

Буряковий жом

Результати аналізу одержаних експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар бурякового жому подано на рис. 3.52.

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності $Eu = A \cdot Re^n$ наведено у табл. 3.18.

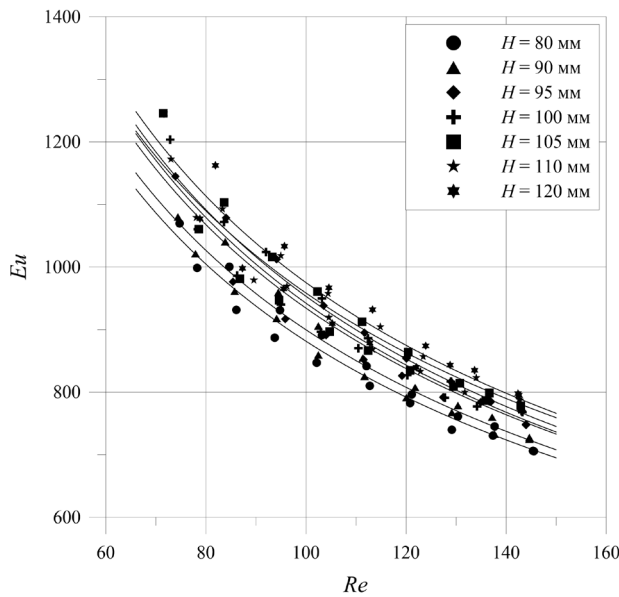


Рис. 3.50. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар відходів виробництва кави

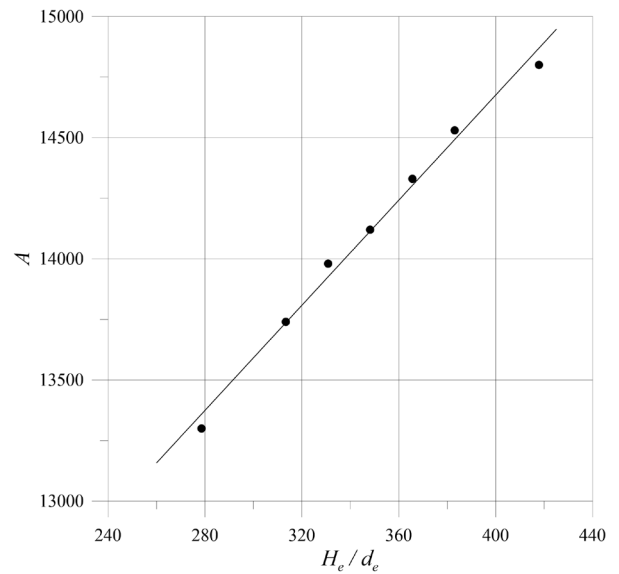


Рис. 3.51. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар відходів виробництва кави

Питому поверхню бурякового жому визначали за допомогою електронного штангенциркуля за методикою, наведеною в розділі 2.3.12.

Таблиця 3.18

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар бурякового жому

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	44,75806452	10900	-0,48
0,09	50,35282258	12500	
0,095	53,15020161	13100	
0,1	55,94758065	13700	
0,105	58,74495968	14800	
0,11	61,54233871	15300	
0,12	67,13709677	17100	

Загальне значення константи A для усіх висот шару знаходимо із графічної залежності (рис. 3.53). Внаслідок аналізу побудованої залежності (рис. 3.53), отримуємо узагальнююче рівняння що характеризує залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса при русі теплового агенту крізь шар бурякового жому:

$$Eu = 250 \cdot Re^{-0,48} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.25)$$

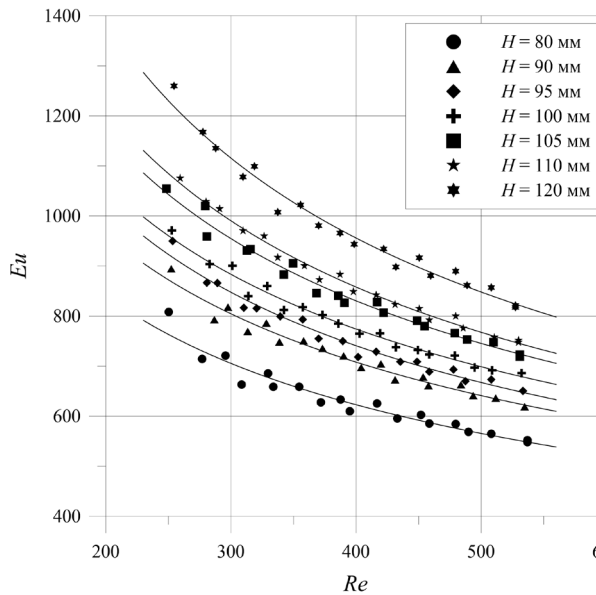


Рис. 3.52. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар бурякового жому

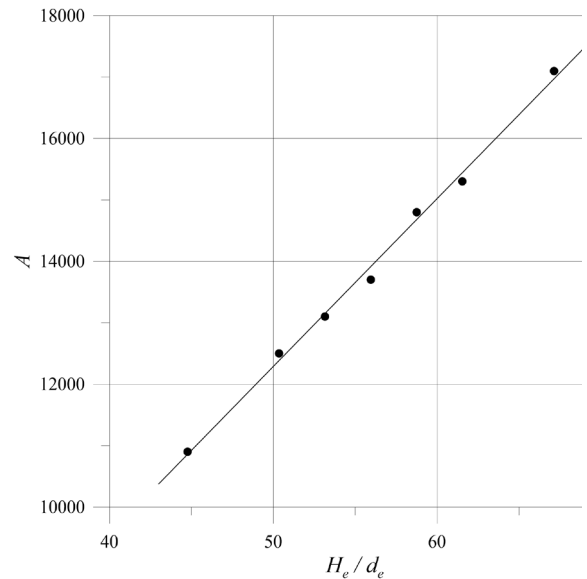


Рис. 3.53. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар бурякового жому

Яблучні вичавки

Результати аналізу одержаних експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар яблучних вичавок подано на рис. 3.54.

Результати визначення констант A і показника степеня n наведено у табл. 3.19. Питому поверхню ячмінної пивної дробини визначали за допомогою електронного штангенциркуля за методикою, наведеною в розділі 2.3.12.

Знайдемо загальне значення константи A для всіх висот шару, зобразивши графічну залежність $A = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$ (рис. 3.55).

З аналізу побудованої залежності (рис. 3.55), отримуємо значення константи A для досліджуваного шару яблучних вичавок, а також узагальнююче рівняння:

$$Eu = 0,38 \cdot Re^{-0,25} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.26)$$

Таблиця 3.19

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар яблучних вичавок

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	6645	2850	-0,25
0,09	7475	2990	
0,095	7891	3040	
0,1	8307	3090	
0,105	8722	3150	
0,11	9137	3250	
0,12	9968	3370	

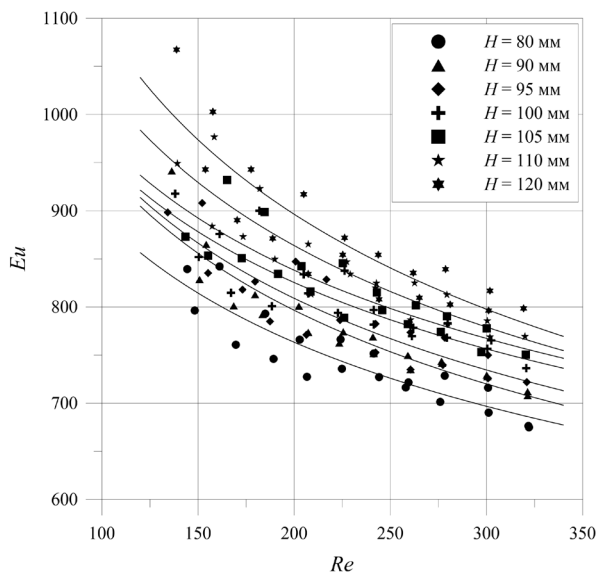


Рис. 3.54. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар яблучних вичавок

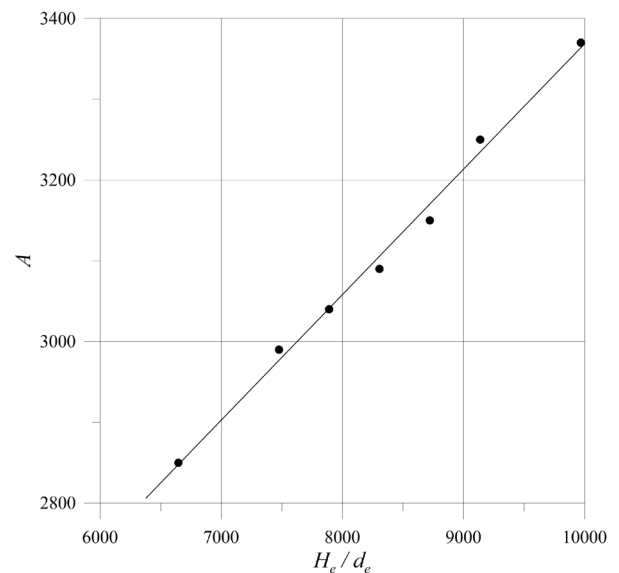


Рис. 3.55. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар яблучних вичавок

Жолуді

Результати аналізу одержаних експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар жолудів дубу звичайного подано на рис. 3.56.

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності $Eu = A \cdot Re^n$ наведено у табл. 3.20.

Таблиця 3.20

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар жолудів

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	6609	11650	-0,55
0,09	7435	12500	
0,095	7848	13000	
0,1	8261	13300	
0,105	8674	13700	
0,11	9087	14000	
0,12	9913	15000	

Приклад визначення питомої поверхні жолудів за допомогою мікроскопічного методу наведено на рис. Б3, додаток Б.

Узагальнення значення константи A для усієї висоти шару жолудів виконуємо за допомогою рис. 3.57, внаслідок аналізу якої отримуємо значення константи A для усього шару жолудів, а також узагальнююче рівняння виду

$$Eu = A \cdot Re^n \cdot \left(\frac{H_e}{d_e}\right)^m :$$

$$Eu = 1,6 \cdot Re^{-0,55} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.27)$$

Каштани

Результати аналізу одержаних експериментальних даних гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар каштанів гіркокаштану звичайного подано на рис. 3.58.

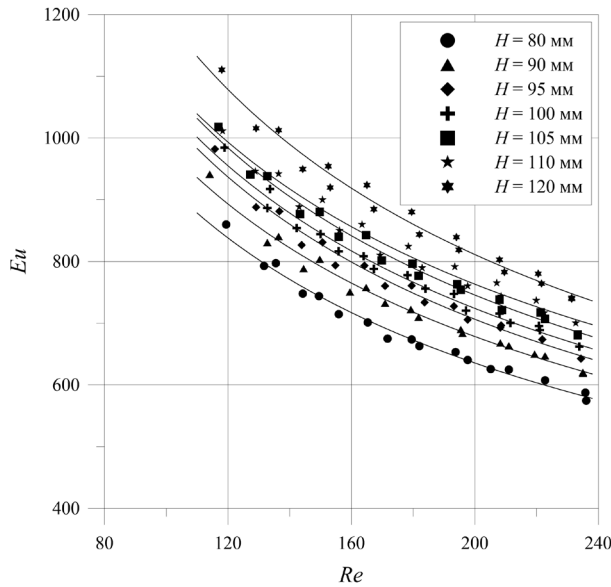


Рис. 3.56. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар жолудів

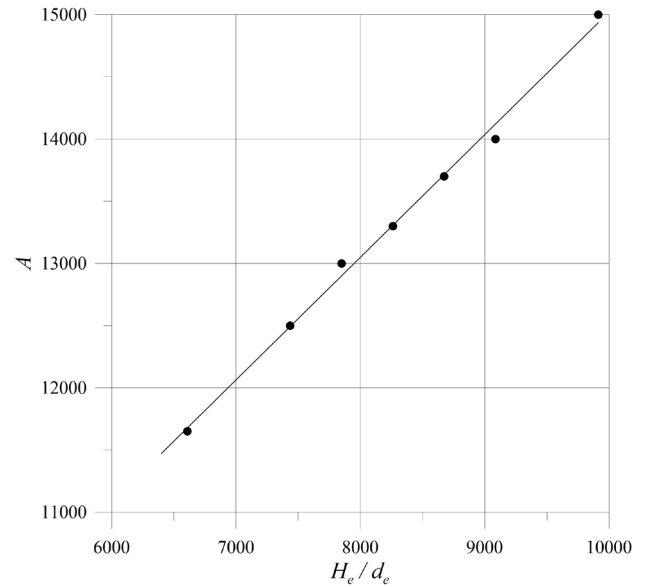


Рис. 3.57. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар жолудів

Результати визначення A і n для степеневі функції залежності критерію Eu від критерію Re для руху теплового агенту крізь шар каштанів наведено у табл. 3.21. Питому поверхню каштанів визначали за допомогою електронного штангенциркуля за методикою, наведеною в розділі 2.3.12.

Таблиця 3.21

Результати визначення констант A і показника степеня n для степеневі функції залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар каштанів

$H, \text{ м}$	H_e/d_e	A	n
0,08	117	9000	-0,5
0,09	131	9900	
0,095	139	10600	
0,1	146	11000	
0,105	153	11700	
0,11	160	12000	
0,12	175	12400	

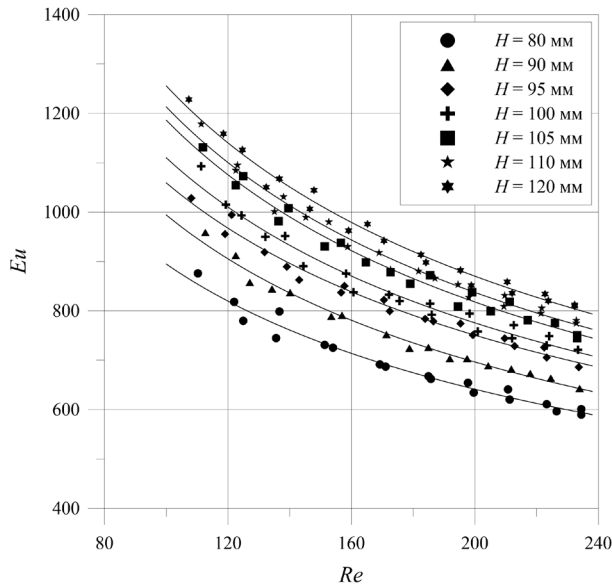


Рис. 3.58. Графічні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь шар каштанів

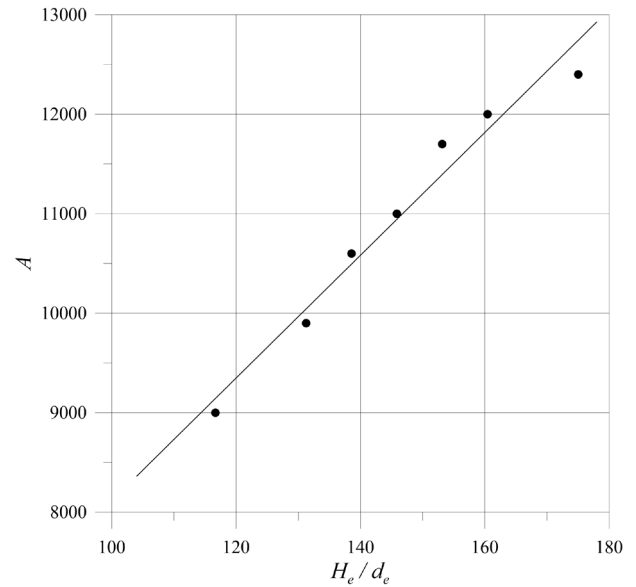


Рис. 3.59. Графічна залежність констант A до $\frac{H_e}{d_e}$ для руху теплового агенту крізь шар каштанів

Внаслідок аналізу побудованої залежності (рис. 3.59), одержуємо значення узагальненої константи A та рівняння, що характеризує залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса:

$$Eu = 75 \cdot Re^{-0,5} \cdot \frac{H_e}{d_e} \quad (3.28)$$

Усереднені значення відхилення теоретично розрахованих значень залежності критерію Ейлера Eu від критерію Рейнольдса Re для $H = 80 \div 120$ мм від експериментально одержаних даних згідно рівнянь (3.22) – (3.28) наведено у табл. 3.22.

Таблиця 3.22

Усереднені значення відхилення теоретично розрахованих значень залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для $H = 80 \div 120$ мм від експериментально одержаних даних

Дослідний матеріал	Відхилення, %
Кукурудзяна післяспиртова барда	3,93
Ячмінна пивна дробина	6,36

Дослідний матеріал	Відхилення, %
Відходи виробництва кави	7,75
Буряковий жом	1,59
Яблучні вичавки	6,73
Жолуді	4,29
Каштани	2,52

Максимальне усереднене відхилення теоретичних значень від експериментально одержаних не перевищує 7,75 % (табл. 3.22), що підтверджує адекватність виконаних розрахунків.

Висновки до третього розділу

1. Виконано експериментальні дослідження гідродинаміки руху потоку теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження для висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм – кукурудзяної післяспиртової барди, ячмінної пивної дробини, відходів виробництва кави, бурякового жому, яблучних вичавок, жолудів та каштанів.
2. Встановлено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння та визначено коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана, що дає змогу прогнозувати гідравлічний опір шару та енергетичні витрати на створення перепаду тиску для кожного дослідженого матеріалу.
3. Отримано розрахункові залежності для визначення гідравлічного опору стаціонарного шару вторинної сировини рослинного походження для висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм – кукурудзяної післяспиртової барди (3.1), (3.2), ячмінної пивної дробини (3.3, 3.4), відходів виробництва кави (3.5), (3.6), бурякового жому (3.7), (3.8),

яблучних вичавок (3.9), (3.10), жолудів (3.11), (3.12) та каштанів (3.13), (3.14).

4. Виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Визначено, що усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання не перевищує 9 %, що є прийнятною точністю. Встановлено, що одержані результати дослідження гідродинаміки під час фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів можна використовувати для розширеного діапазону меж досліджуваних висот стаціонарного шару матеріалу з прийнятною точністю.
5. Узагальнено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Отримано критеріальні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної рослинної сировини для досліджених висот шару матеріалів – кукурудзяної післяспиртової барди (3.22), ячмінної пивної дробини (3.23), відходів виробництва кави (3.24), бурякового жому (3.25), яблучних вичавок (3.26), жолудів (3.27) та каштанів (3.28).
6. Основні результати досліджень опубліковані в роботах [194–202].

РОЗДІЛ 4

КІНЕТИЧНІ ЗАКОНОМІРНОСТІ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

4.1. Дослідження кінетики фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Дослідження кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вологих матеріалів є одним із ключових етапів для визначення параметрів протікання процесу, а саме його тривалості та технологічно доцільних режимів проведення. В загальному кінетика процесу сушіння характеризує зміну вмісту вологи у матеріалі від часу – фактично час осушення до необхідного вологовмісту матеріалу. Характер та вигляд кінетичних кривих визначається структурними особливостями досліджуваного матеріалу, особливостями тепло- та масообміну всередині тіла та між його поверхнею і довкіллям. На кінетику процесу сушіння впливають властивості осушуваних матеріалів (вологовміст, форма зв'язку вологи із структурою матеріалу тощо), параметри теплового агенту та його руху (вологовміст, температура, швидкість), стан перебування матеріалу в зоні сушіння (стаціонарний, киплячий, зважений). Значна кількість параметрів впливу ускладнюють теоретичний розрахунок процесу і вимагають обов'язкове проведення експериментальних досліджень із подальшим узагальненням одержаних результатів.

Метою дослідження кінетики фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було проведення експериментальних досліджень, для встановлення впливу основних параметрів процесу (висота вологого матеріалу H , температура теплового агенту T , швидкість руху теплового агенту v_0) зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу з часом та подальшого узагальнення одержаних даних.

Для виконання експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння було використано експериментальну установку фільтраційного

сушіння, опис та принцип роботи якої наведено у розділі 2.2. Методики проведення експерименту та визначення супутніх необхідних параметрів наведено у розділах 2.3.1, 2.3.2, 2.3.3.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної висоти шару досліджуваного матеріалу H наведено на рис. 4.1.

Аналіз графічних залежностей на рис. 4.1 свідчить про збільшення тривалості фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди із зростанням висоти шару досліджуваного матеріалу: за висоти шару $H = 40$ мм кінцевий вологовміст досліджуваного матеріалу досягається за ~ 1200 с, а для висоти шару $H = 160$ мм за ~ 3800 с.

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної температури теплового агенту T наведено на рис. 4.2.

Графічні залежності на рис. 4.2 вказують на зменшення тривалості фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди із зростанням температури теплового агенту: за температури теплового агенту $T = 90$ °C кінцевий вологовміст досліджуваного матеріалу досягається за ~ 2200 с, а для $T = 60$ °C за ~ 3300 с.

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної швидкості теплового агенту v_0 наведено на рис. 4.3.

Графічні залежності на рис. 4.3 вказують на зменшення тривалості фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди із зростанням швидкості теплового агенту: за швидкості теплового агенту $v_0 = 1,76$ м/с кінцевий вологовміст досліджуваного матеріалу досягається за ~ 2200 с, а за $v_0 = 1,24$ м/с за ~ 3100 с.

Одержані експериментальні дані фільтраційного сушіння кукурудзяної пі-

сляспиртової барди свідчать про підвищення інтенсивності процесу із збільшенням температури теплового агенту порівняно із зміною швидкості його профільтрування крізь шар досліджуваного матеріалу (рис. 4.2, 4.3).

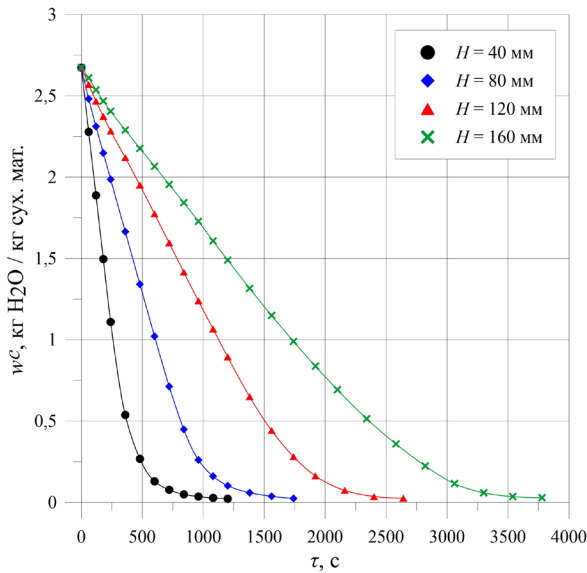


Рис. 4.1. Графічні залежності

зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

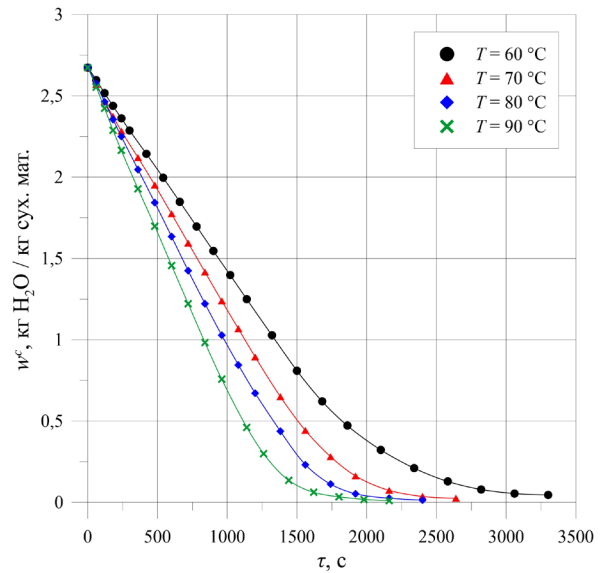


Рис. 4.2. Графічні залежності

зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди у часі за різної температури теплового агенту ($H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

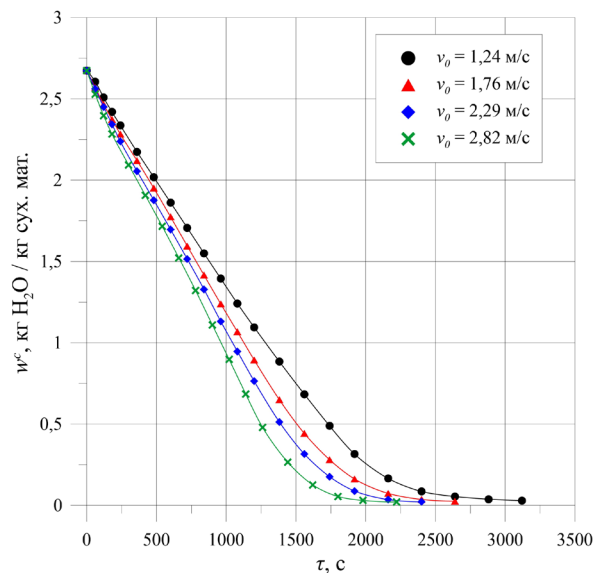


Рис. 4.3. Графічні залежності

зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди у часі за різної швидкості теплового агенту ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,24 \div 2,82$ м/с)

Графічні залежності на рис. 4.1–4.3 свідчать про наявність періодів повного та часткового насичення теплового агенту вологою під час проведення процесу фільтраційного сушіння.

Ячмінна пивна дробина

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної висоти шару досліджуваного матеріалу H наведено на рис. 4.4. Графічні залежності на рис. 4.4 вказують на зростання часу сушіння із збільшенням висоти шару досліджуваного матеріалу. За висоти шару ячмінної пивної дробини $H = 40$ мм значення кінцевого вологовмісту досягається ~ 1900 с, а за $H = 160$ мм ~ 5200 с.

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різних температур теплового агенту T наведено на рис. 4.5. Залежності зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу свідчать про вищу інтенсивність процесу фільтраційного сушіння із зростанням температури теплового агенту: за температури теплового агенту $T = 90$ °C кінцевий вологовміст досліджуваного матеріалу досягається за ~ 3000 с, а для $T = 50$ °C за ~ 7300 с.

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної швидкості теплового агенту v_0 наведено на рис. 4.6.

Кінетичні криві сушіння на рис. 4.6 розташовані нерівномірно за пропорційної зміни швидкості руху теплового агенту, що вказує на перебіг процесу фільтраційного сушіння у внутрішньодифузійній області перенесення вологи у досліджуваному матеріалі. Це, в свою чергу, пояснює чому збільшення швидкості руху теплового агенту вище за $v_0 = 1,81$ м/с практично не має впливу на час сушіння.

У загальному випадку, підвищення швидкості руху теплового агенту збільшує інтенсивність процесу фільтраційного сушіння, зменшуючи його тривалість (рис. 4.6).

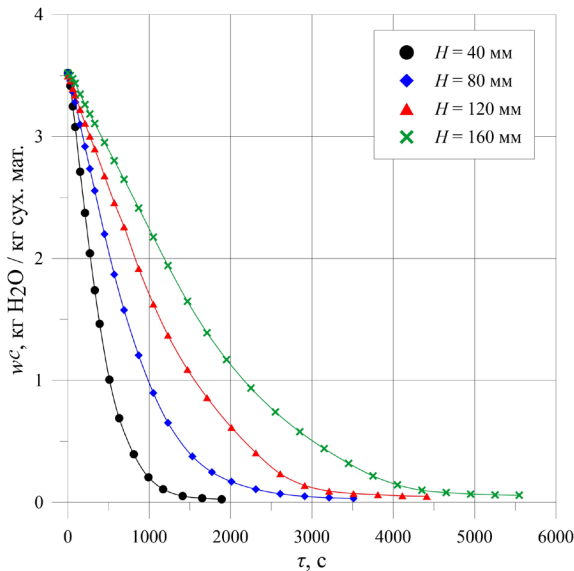


Рис. 4.4. Графічні залежності

зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °C, $v_0 = 1,81$ м/с)

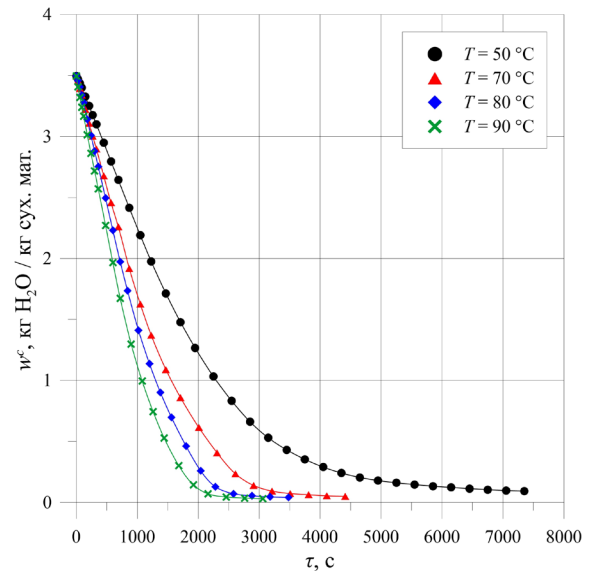


Рис. 4.5. Графічні залежності

зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини у часі за різної температури теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 50 \div 90$ °C, $v_0 = 1,81$ м/с)

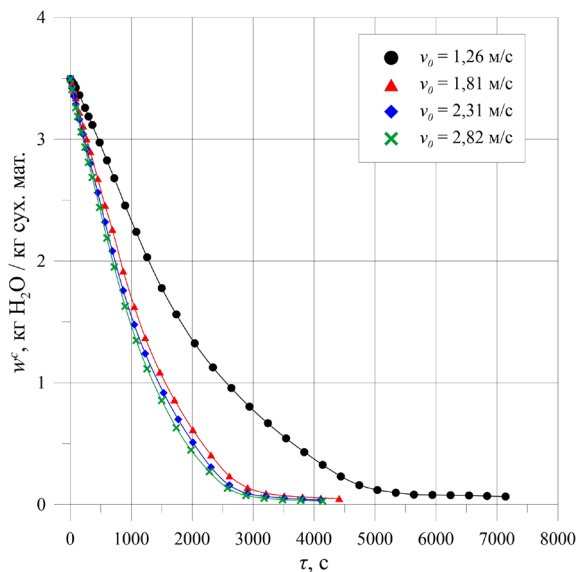


Рис. 4.6. Графічні залежності зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °C, $v_0 = 1,26 \div 2,82$ м/с)

Аналіз рис. 4.5–4.6 вказує, що температура теплового агента має вагоміший вплив на швидкість фільтраційного сушіння у порівнянні швидкістю руху теплового агента. Графічні залежності на рис. 4.4–4.6 свідчать про

наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою під час проведення процесу фільтраційного сушіння.

Відходи кавового виробництва

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння відходів виробництва кави наведено на рис. 4.7–4.9.

Графічні залежності на рис. 4.7 вказують на те, що із збільшенням висоти стаціонарного шару відходів виробництва кави від $H = 40$ мм до $H = 160$ мм, час фільтраційного сушіння пропорційно зростає. Кінетичні криві фільтраційного сушіння на рис. 4.8. свідчать також про зростання часу, необхідного на осушення відходів виробництва кави із пониженням температури теплового агента.

Аналіз кінетичних кривих сушіння відходів виробництва кави (рис. 4.7–4.9) вказує на наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою.

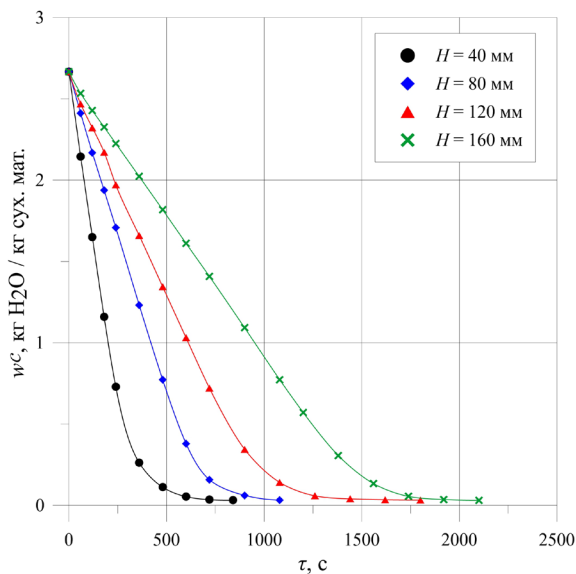


Рис. 4.7. Графічні залежності зміни вологовмісту відходів виробництва кави у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

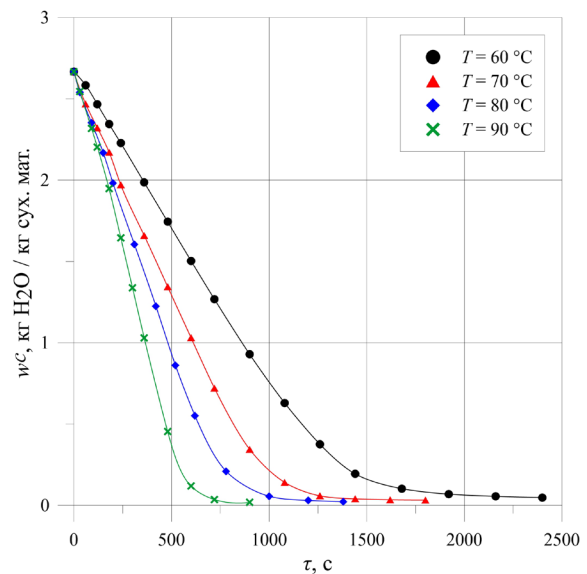


Рис. 4.8. Графічні залежності зміни вологовмісту відходів виробництва кави у часі за різної температури теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

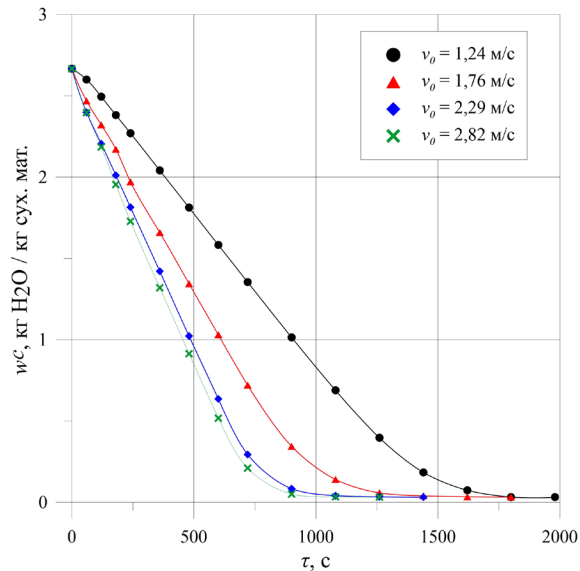


Рис. 4.9. Графічні залежності зміни вологовмісту відходів виробництва кави у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,24 \div 2,82$ м/с)

Буряковий жом

Кінетичні криві, що відображають результати експериментальних досліджень зміни вологовмісту шару бурякового жому в часі за різних значень висоти шару матеріалу (рис. 4.10), температур потоку теплового агента (рис. 4.11) та різних швидкостей руху теплового агента потоку крізь шар вологого матеріалу (рис. 4.12) наведено нижче.

При аналізі отриманих графічних залежностей, помітно, що час фільтраційного сушіння бурякового жому збільшується із зменшенням висоти вологого шару (рис. 4.10), підвищенням температури теплового агента (рис. 4.11) і швидкості його руху (рис. 4.12).

Варто зазначити, що для швидкостей потоку теплового агента 1,76 м/с, 2,29 м/с та 2,82 м/с фактично відсутня відмінність в інтенсивності осушення бурякового жому фільтраційним методом, що свідчить про те, що процес відбувається у внутрішньодифузійній області (рис. 4.12).

З огляду на це, для подальших розрахунків було враховано швидкість потоку теплового агента рівну 1,76 м/с, як спільну для даних серій дослідів за різних температур теплового агента і висот шару.

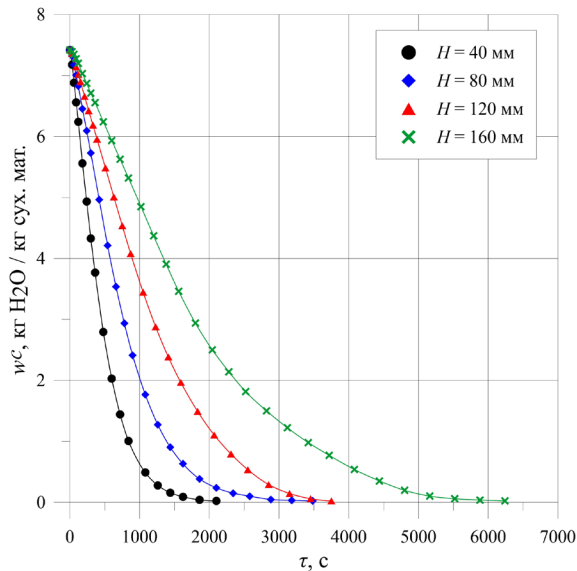


Рис. 4.10 Графічні залежності зміни вологовмісту бурякового жому у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °C, $v_0 = 1,76$ м/с)

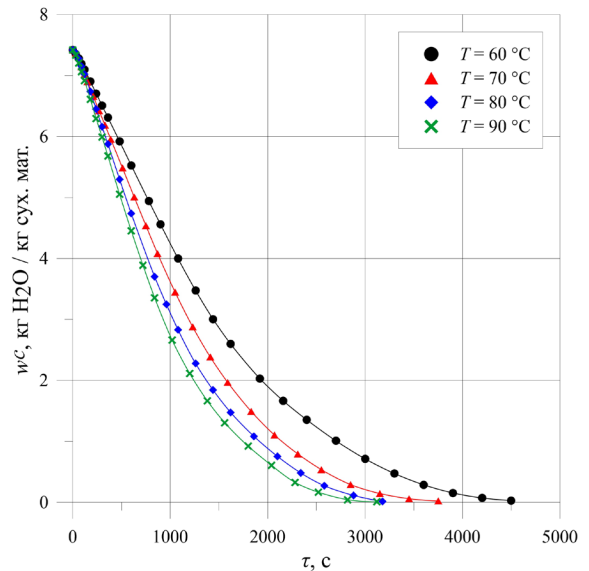


Рис. 4.11. Графічні залежності зміни вологовмісту бурякового жому у часі за різної температури теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °C, $v_0 = 1,76$ м/с)

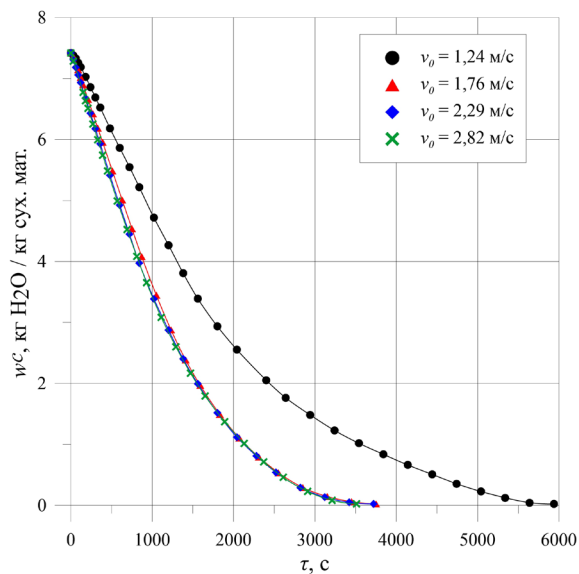


Рис. 4.12. Графічні залежності зміни вологовмісту бурякового жому у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °C, $v_0 = 1,24 \div 2,82$ м/с)

Аналіз графічних залежностей фільтраційного сушіння бурякового жому (рис. 4.10–4.12) вказує на наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою.

Яблучні вичавки

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару досліджуваного матеріалу H наведено на рис. 4.13. Графічні залежності вказують на зростання часу сушіння із збільшенням висоти шару досліджуваного матеріалу (рис. 4.13).

Також відмітимо, що для яблучних вичавок необхідний найдовший час для досягнення значень кінцевого вологовмісту, незважаючи на не найвищу вологість матеріалу на початку процесу. Це може пояснюватись особливостями структури біомаси, а також її вихідними розмірами.

Вплив зміни температури теплового агенту та швидкості його руху аналогічний до впливу за зміни T і v_0 для інших досліджуваних матеріалів – інтенсивність процесу підвищується із збільшенням температури та швидкості теплового агенту (рис. 4.14, 4.15).

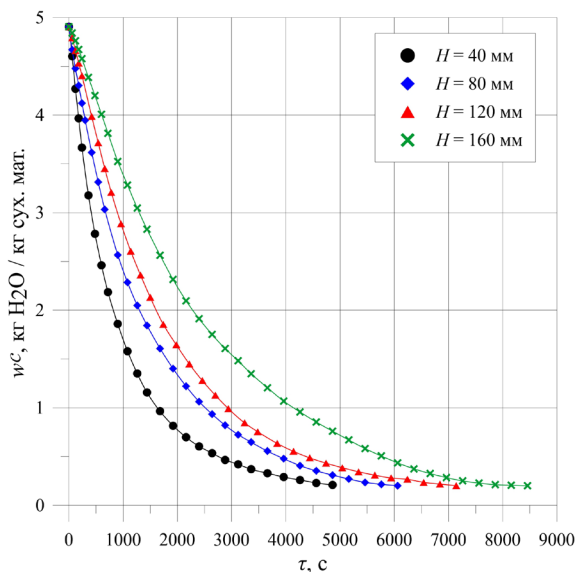


Рис. 4.13 Графічні залежності зміни вологовмісту яблучних вичавок у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

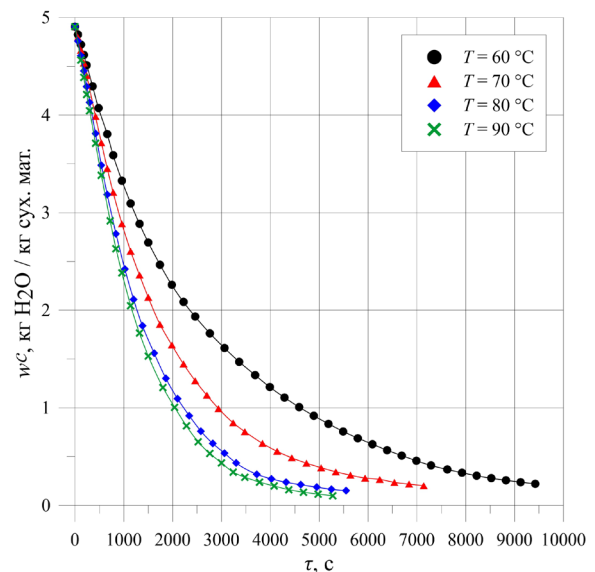


Рис. 4.14. Графічні залежності зміни вологовмісту яблучних вичавок у часі за різної температури теплового агенту ($H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

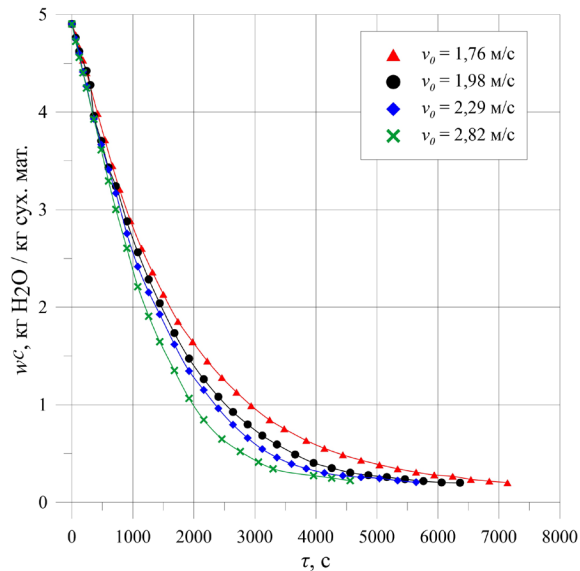


Рис. 4.15. Графічні залежності зміни вологовмісту яблучних вичавок у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76 \div 2,82$ м/с)

Також можна помітити, що вплив зміни температури теплового агента під час фільтраційного сушіння на зміну вологовмісту яблучних вичавок у часі є вищим за вплив зміни швидкості руху теплового агента (рис. 4.14, 4.15). Відмітимо дуже високу тривалість процесу сушіння у випадку використання низькотемпературного теплового агента, а також за його низьких швидкостей (рис. 4.14, 4.15).

Аналіз графічних залежностей фільтраційного сушіння яблучних вичавок (рис. 4.13–4.15) вказує на наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою.

Жолуді

Результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння жолудів дубу звичайного за різної висоти шару досліджуваного матеріалу H наведено на рис. 4.16. Аналіз графічних залежностей фільтраційного сушіння жолудів (рис. 4.16–4.18) вказує на наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою.

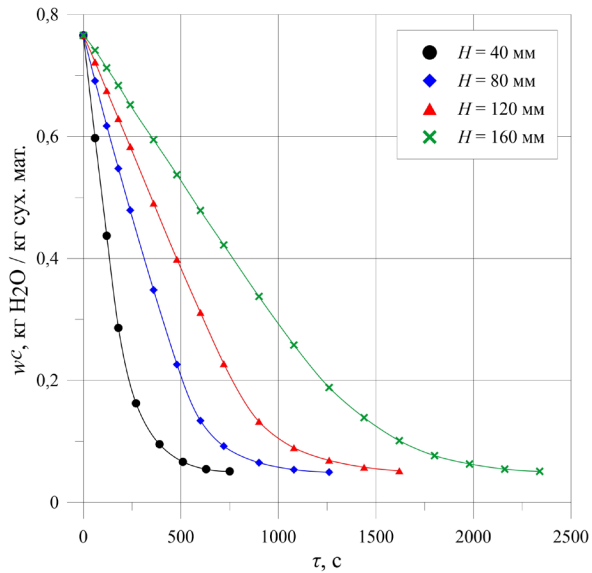


Рис. 4.16. Графічні залежності зміни вологовмісту жолудів у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

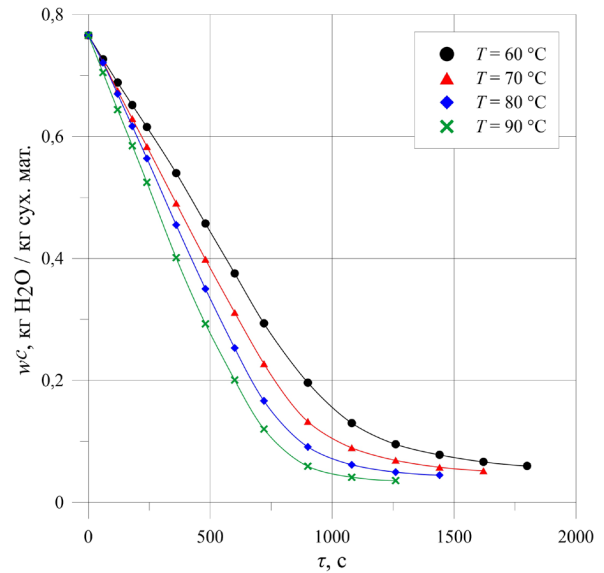


Рис. 4.17. Графічні залежності зміни вологовмісту жолудів у часі за різної температури теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 60 \div 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с)

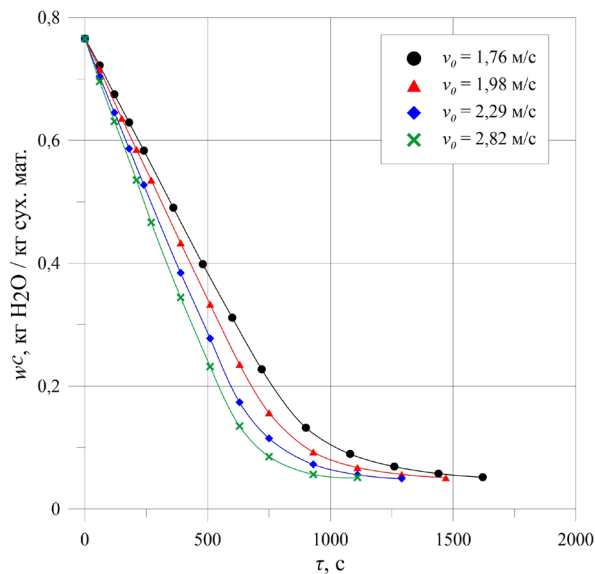


Рис. 4.18. Графічні залежності зміни вологовмісту жолудів у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,76 \div 2,82$ м/с)

Вплив зміни температури теплового агента та швидкості його руху аналогічний до впливу за зміни T і v_0 для інших досліджуваних матеріалів – інтенсивність процесу підвищується із збільшенням температури та швидкості теплового агента (рис. 4.17, 4.18).

Каштани

Кінетичні криві, що відображають результати експериментальних досліджень зміни вологовмісту шару каштанів гіркокаштану звичайного в часі за різних значень висоти шару матеріалу (рис. 4.19), температур потоку теплового агента (рис. 4.20) та різних швидкостей руху теплового агента потоку крізь шар вологого матеріалу (рис. 4.21) наведено нижче.

При аналізі отриманих графічних залежностей (рис. 4.19–4.21), помітно, що час фільтраційного сушіння каштанів збільшується із зменшенням висоти вологого шару, підвищенням температури теплового агента і швидкості його руху.

Аналіз графічних залежностей фільтраційного сушіння каштанів (рис. 4.19–4.21) свідчить про наявність періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою.

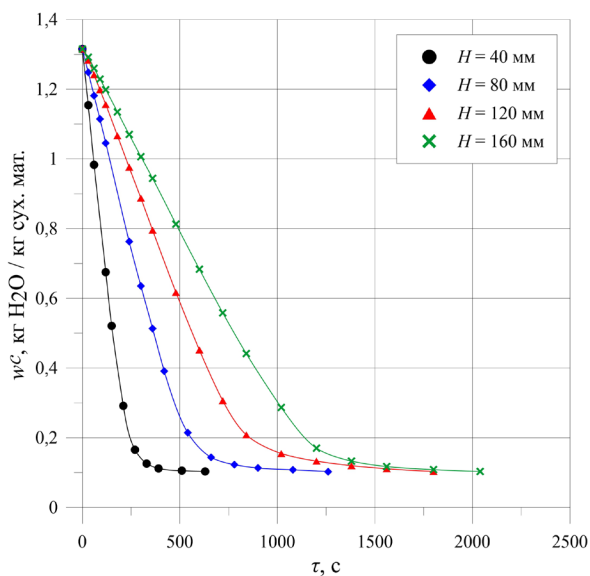


Рис. 4.19. Графічні залежності зміни вологовмісту каштанів у часі за різних висот шару досліджуваного матеріалу ($H = 40 \div 160 \text{ мм}$, $T = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 1,81 \text{ м/с}$)

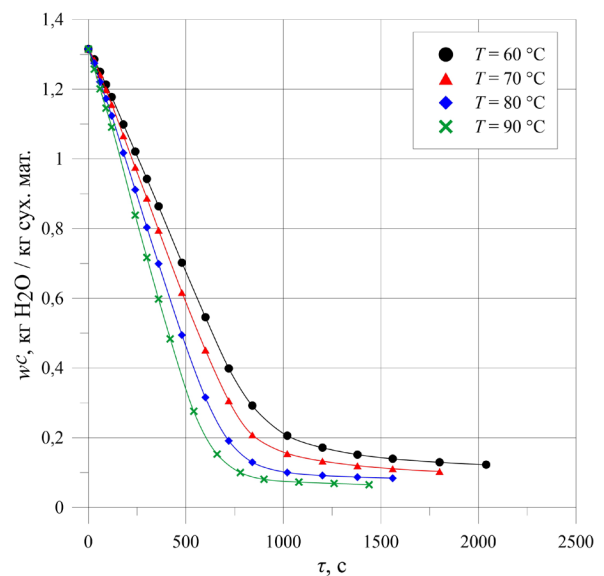


Рис. 4.20. Графічні залежності зміни вологовмісту каштанів у часі за різної температури теплового агента ($H = 120 \text{ мм}$, $T = 60 \div 90 \text{ }^\circ\text{C}$, $v_0 = 1,81 \text{ м/с}$)

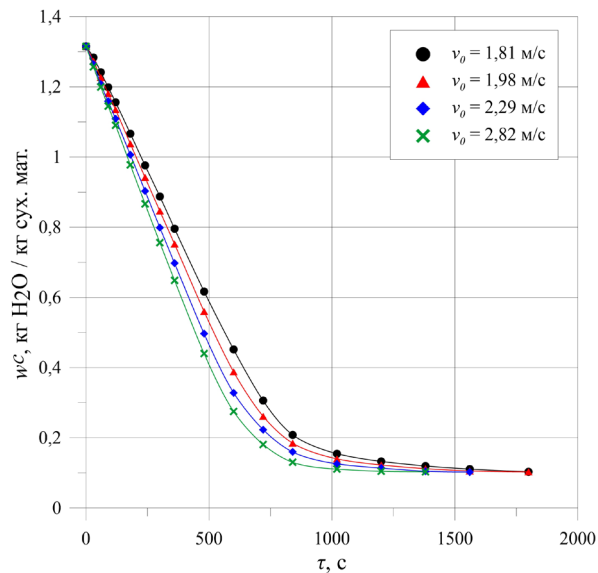


Рис. 4.21. Графічні залежності зміни вологовмісту каштанів у часі за різної швидкості теплового агента ($H = 120$ мм, $T = 70$ °С, $v_0 = 1,81 \div 2,82$ м/с)

4.2. Математичне узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Для математичних узагальнень кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було використано результати експериментальних досліджень, наведених у розділі 4.2.

Метою узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було математичне вираження зміни вологовмісту досліджуваних матеріалів у часі та тривалості процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження у періодах повного та часткового насичення теплового агента вологою.

Методику розрахунків математичного узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження наведено у розділі 2.3.4.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Для визначення критичного вологовмісту досліджуваного матеріалу w_{cr}^c досягнення зоною тепломасообміну перфорованої перегородки циліндричного контейнера експериментальної установки (рис. 2.1, 2.2), зображали попередньо

отримані експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння аісляспиртової кукурудзяної барди (рис. 4.1–4.3) у вигляді графічних залежностей у координатах $\lg(w^c - w^e) = f(\tau)$ (рис. 4.22–4.24).

Графоаналітичним методом було визначено періоди повного та часткового насичення теплового агенту вологою за допомогою апроксимації експериментальних даних прямими лініями (рис. 4.22–4.24). Точки перетину прямих і їх проекція на осі рисунків, дозволяють визначити логарифм критичного вологовмісту матеріалу $\lg w_{cr}$ та критичний час τ_{cr} досягнення зоною тепломасообміну перфорованої перегородки контейнера експериментальної установки, тобто, час сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою (рис. 4.22–4.24). Ординати точок перетину прямих ліній будуть відповідати логарифмам критичного вологовмісту досліджуваного матеріалу $\lg w_{cr}$, а абсциси – критичному часу τ_{cr} (рис. 4.22–4.24).

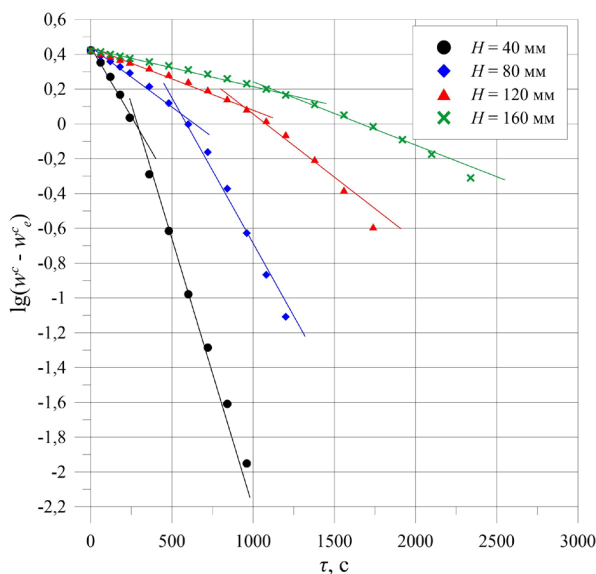


Рис. 4.22. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної висоти шару матеріалу H

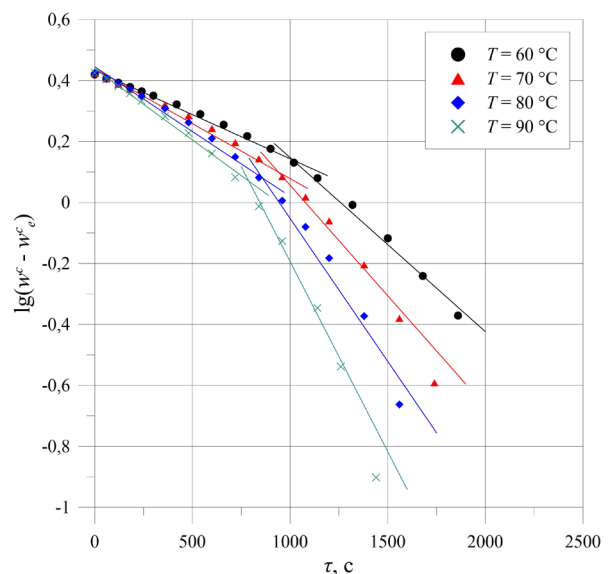


Рис. 4.23. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної температури теплового агенту T

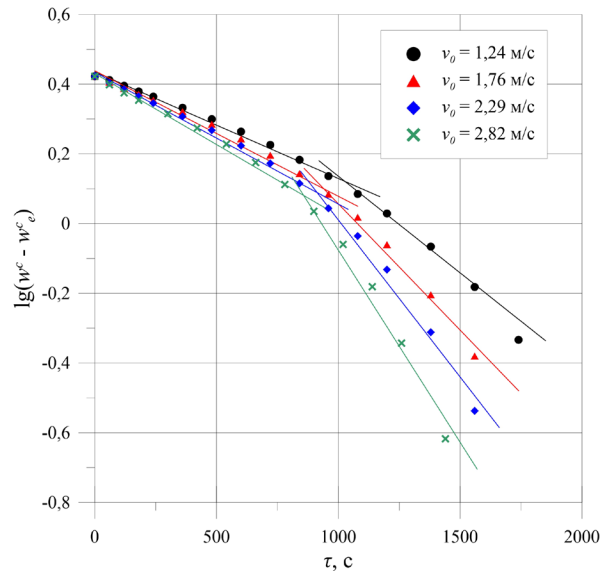


Рис. 4.24. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Розрахунок значень критичного вологовмісту w_{cr}^c на рис. 4.22–4.24 може бути виконаний за допомогою рівняння:

$$w_{cr}^c = 10 \cdot x + w_e^c, \quad (4.1)$$

де w_{cr}^c – критичний вологовміст досліджуваного матеріалу досягнення зоною тепломасообміну перфорованої перегородки циліндричного контейнера експериментальної установки, кг H_2O /кг сухого матеріалу;

$x = \lg(w^c - w_e^c)$ – ордината точки перетину двох прямих ліній на графічній залежності у координатах $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$;

w_e^c – рівноважний вологовміст досліджуваного матеріалу, кг H_2O /кг сухого матеріалу.

Експериментальним шляхом було визначено значення рівноважного вологовмісту w_e^c кукурудзяної післяспиртової барди, як найнижче досягнуте значення вологовмісту досліджуваного матеріалу під час процесу фільтраційного сушіння. За температур теплового агента під час фільтраційного сушіння досліджуваного матеріалу 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С, значення рівноважного вологовмісту w_e^c кукурудзяної післяспиртової барди становило відповідно 0,01, 0,014, 0,025, 0,046 кг H_2O /кг сухого матеріалу, так як значення

w^c_e залежать від термодинамічного потенціалу системи, і змінюються залежно від температури сушильного агента.

За допомогою графоаналітичного методу, описаного вище, було визначено значення критичного вологовмісту w^c_{cr} та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різних параметрів процесу (табл. 4.1).

Аналіз даних, наведених у табл. 4.1 свідчить про зростання значення критичного вологовмісту w^c_{cr} кукурудзяної післяспиртової барди із збільшенням висоти шару досліджуваного матеріалу, та при зменшенні температури теплового агента та швидкості руху його потоку. Аналогічний вплив параметри фільтраційного сушіння мають на критичний час τ_{cr} (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Значення критичного вологовмісту w^c_{cr} та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w^c_e)$	w^c_{cr} , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,76	-0,038	0,941	290	
80			0,06	1,173	550	
120			0,1	1,284	930	
160			0,171	1,508	1190	
120	60		0,139	1,423	1010	
	80		0,08	1,216	870	
	90		0,071	1,188	780	
	70		1,24	0,122	1,349	1010
			2,29	0,088	1,250	910
			2,82	0,081	1,230	850

Для узагальнення кінетичних закономірностей процесу фільтраційного су-

шіння кукурудзяної післяспиртової барди у періоді повного насичення теплового агенту вологою необхідно визначити графоаналітичним методом значення кінетичних коефіцієнтів a та η , як було описано у розділі 2.3.4. Визначення даних коефіцієнтів виконували за допомогою графічної залежності у системі координат $\ln((1 - w^c/w^c_0)/\tau) = f(H)$ (рис. 4.25).

Побудову графічних залежностей на рис. 4.25 виконували наступним чином. Спочатку будували узагальнену лінію l для даних експериментальних досліджень за різних висот стаціонарного шару досліджуваного матеріалу H . Кінетичний коефіцієнт a визначали як тангенс кута нахилу прямої лінії l (рис. 4.25), який є сталим для певного типу матеріалу [149] і, таким чином, кут нахилу лінії l буде однаковим для усіх наступних ліній. Лінії для даних експериментальних досліджень за різних температур теплового агенту T (лінії 2–4, рис. 4.25) та швидкостей руху теплового агенту v_0 (лінії 5–7, рис. 4.25) будували як усереднені паралельно до лінії l . Значення $\ln(\eta)$ відповідали точкам перетину прямих ліній 1–7 з віссю ординат. Для побудови графічних залежностей використовували лише дані для періоду повного насичення теплового агенту вологою, тобто до значень w^c_{cr} (табл. 4.1).

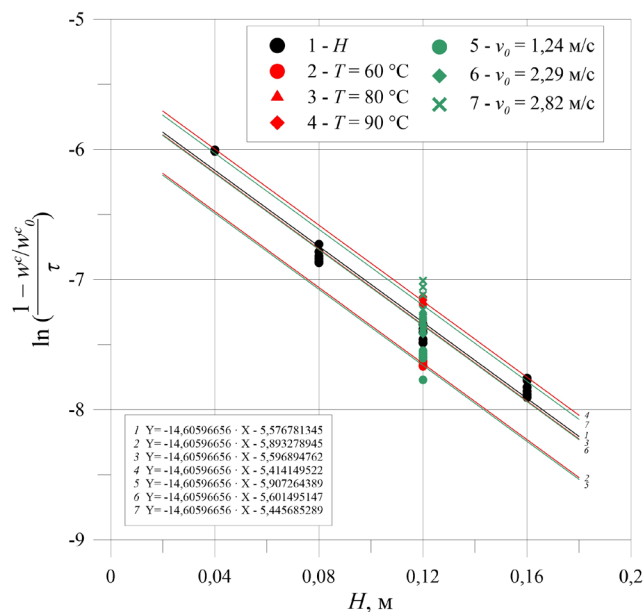


Рис. 4.25. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

Визначені за допомогою графічних залежностей з рис. 4.25 значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди наведено у табл. 4.2.

Додатково склали систему рівнянь для визначення констант A , m та n у рівнянні (2.7), що містила значення кінетичних коефіцієнтів η за різних параметрів процесу фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди, так як зміна вологовмісту досліджуваного матеріалу у періоді повного насичення теплового агенту вологою обмежується зовнішніми умовами процесу сушіння.

$$\begin{cases} \eta_1 = A \cdot T_1^m \cdot v_{01}^n \\ \eta_2 = A \cdot T_2^m \cdot v_{02}^n \\ \eta_3 = A \cdot T_3^m \cdot v_{03}^n \end{cases} \quad (4.2)$$

Систему рівнянь (4.2) виражали у логарифмічному вигляді та розв'язували матричним способом, отримували значення констант A , m та n . Для розв'язку системи рівнянь було використано дані ліній 1, 4, 7 (рис. 4.25, табл. 4.2).

$$\begin{cases} \ln \eta_1 = \ln A + m \cdot \ln T_1 + n \cdot \ln v_{01} \\ \ln \eta_2 = \ln A + m \cdot \ln T_2 + n \cdot \ln v_{02} \\ \ln \eta_3 = \ln A + m \cdot \ln T_3 + n \cdot \ln v_{03} \end{cases} \quad (4.3)$$

У результаті розв'язку системи рівнянь (4.3) одержуємо наступні значення:

$$A = 2,086 \cdot 10^{-4}, m = 0,645, n = 0,278$$

На основі розрахованих констант, отримуємо вираз для коефіцієнта η фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди:

$$\eta = 2,086 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,645} \cdot v_0^{0,278} \quad (4.4)$$

Аналіз рівняння (4.4) підтверджує висновки, зроблені у розділі 4.1, про вагомий вплив температури теплового агенту за вплив швидкості руху його потоку на процес фільтраційного сушіння, оскільки значення констант для цих параметрів описується співвідношенням $m > n$.

Таблиця 4.2

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

№ лінії рис. 4.25	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с			
1	40	70	1,76	14,606	-5,576781345	0,003784728			
	80								
	120								
	160								
2	120	60	1,24	14,606	-5,893278945	0,002757919			
3		80							
4		90							
5		70					2,29	-5,907264389	0,002719617
6							2,29	-5,601495147	0,003692339
7							2,82	-5,445685289	0,004314882

Таким чином, використавши одержані коефіцієнти для рівняння (2.8), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w^c_0 > w^c \geq w^c_{cr}$:

$$w^c = w^c_0 \cdot (1 - 2,086 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,645} \cdot v_0^{0,278} \cdot \tau \cdot e^{-14,606 \cdot H}) \quad (4.5)$$

Для математичного узагальнення кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у періоді часткового насичення теплового агенту вологою, за допомогою графоаналітичного методу знайдемо коефіцієнти швидкості сушіння K .

Побудуємо графічні залежності у системі координат $\ln((w^c - w^c_e)/(w^c_{cr} - w^c_e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ для значень вологовмісту досліджуваного матеріалу у межах $w^c_e < w^c <$

w_{cr}^c , де коефіцієнти швидкості сушіння K будуть дорівнювати тангенсам кута нахилу одержаних прямих ліній (рис. 4.26–4.28).

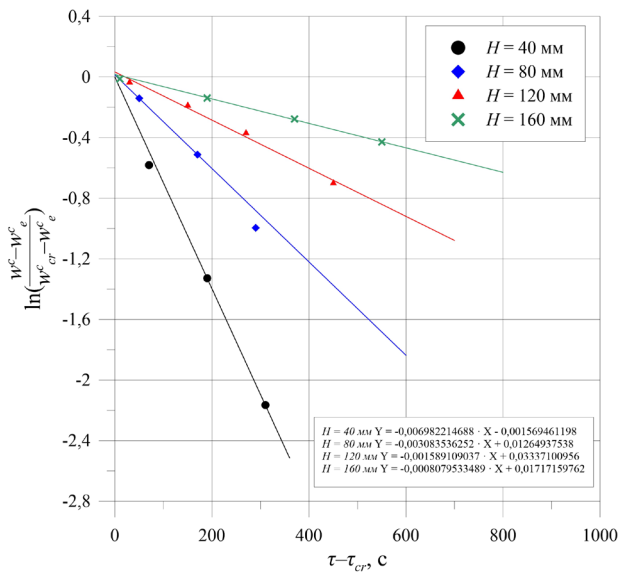


Рис. 4.26. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної висоти шару матеріалу H

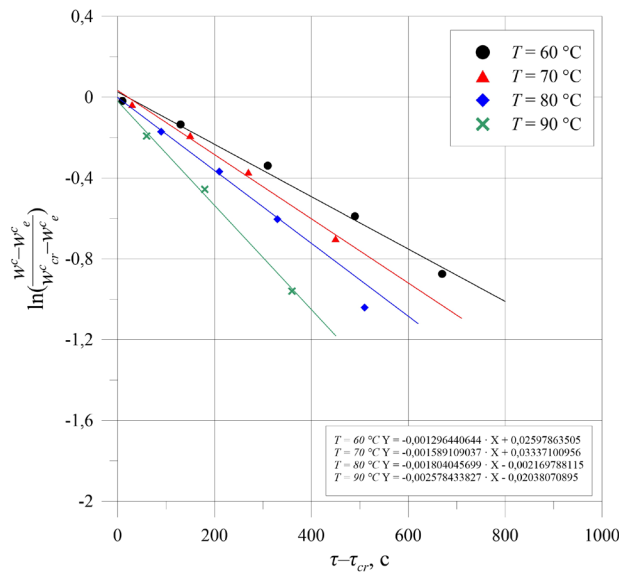


Рис. 4.27. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної температури теплового агента T

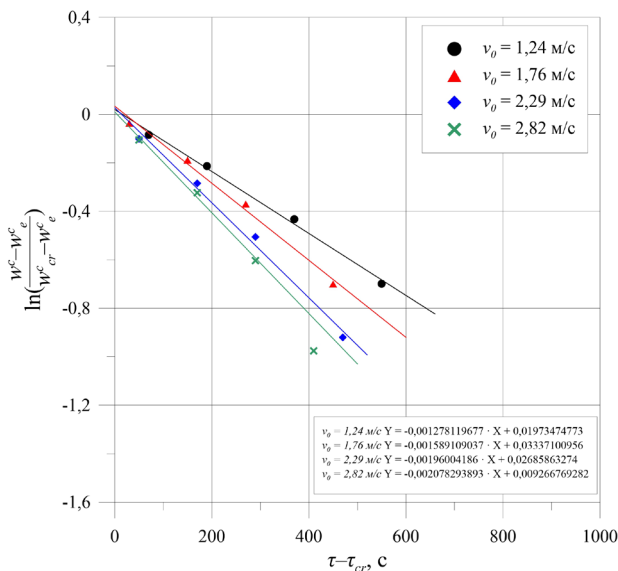


Рис. 4.28. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної швидкості руху теплового агента v_0

Графічні побудови виконуємо для всіх змінних досліджуваних параметрів процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження – висот вологого матеріалу H (рис. 4.26), температур теплового агенту T (рис. 4.27), швидкостей руху теплового агенту v_0 (рис. 4.28).

Швидкість сушіння N розраховується згідно рівняння (2.13).

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N для різних параметрів процесу наведено у табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.)·с	
40	70	1,76	0,006982214688	0,005973793	
80			0,003083536252	0,002728000	
120			0,001589109037	0,001493978	
160			0,0008079533489	0,000979328	
120	60		0,001296440644	0,001238020	
	80		0,001804045699	0,001675172	
	90		0,002578433827	0,001904359	
	70		1,24	0,001278119677	0,001311287
			2,29	0,00196004186	0,001564176
			2,82	0,002078293893	0,001698118

Будуємо графічну залежність $K = f(N)$, використовуючи дані, наведені у табл. 4.3, на основі якої визначаємо значення відносного коефіцієнта сушіння χ як тангенс кута нахилу одержаної усередненої прямої лінії, який для кукурудзяної післяспиртової барди рівний $\chi = 1,187$ кг сухого матеріалу / кг H₂O (рис. 4.27).

Таким чином, використавши одержані коефіцієнти для рівняння (2.14), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-1,187 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.6)$$

Для оцінки коректності одержаних виразів зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння, було побудовано графічний розподіл одержаних відхилень експериментальних даних та теоретично розрахованих значень (рис. 4.28).

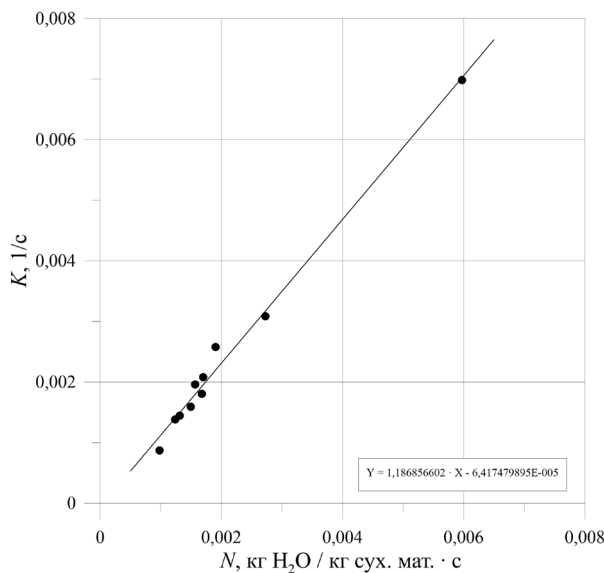


Рис. 4.27. Графічна залежність для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

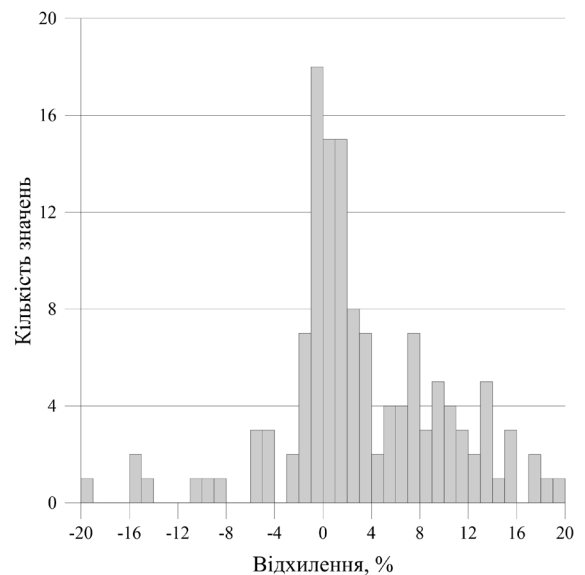


Рис. 4.28. Графічна залежність розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння

Максимальне значення відносного відхилення становить 19,42 %, а середнє відносне відхилення становить 5,37 %, що дозволяє використовувати

одержані залежності зміни вологовмісту кукурудзяної післяспиртової барди під час фільтраційного сушіння для розрахунку сушильного обладнання.

Час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди τ_I у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w_{cr}^c \leq w^c < w_0^c$, згідно рівняння (2.15), (4.5):

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{2,086 \cdot 10^{-4} \cdot T^{0,645} \cdot v_0^{0,278} \cdot \tau \cdot e^{-14,606 \cdot H}} \quad (4.7)$$

Час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди τ_{II} у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, згідно рівняння (2.16), (4.6):

$$\tau_{II} = \frac{1,187 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{1,187 \cdot N} \quad (4.8)$$

Загальний час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди від початкового до кінцевого вологовмісту розраховується як сума часів τ_I та τ_{II} . Для значень вологовмісту $w^c < 0,5$ кг Н₂О / кг сухого матеріалу додатково необхідно враховувати додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної вологи за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K\tau_{II} = 0,7 \div 0,9$ для врахування затрат теплоти на випаровування зв'язаної вологи та нагрівання вологого матеріалу, як було описано у розділі 2.3.4.

Ячмінна пивна дробина

Для того щоб визначити значення критичного вологовмісту w_{cr}^c за різних параметрів процесу фільтраційного сушіння для ячмінної пивної дробини, згідно описаної вище у даному розділі методики для кукурудзяної післяспиртової барди, а також критичного часу сушіння у періоді повного насичення вологою τ_{cr} , результати експериментальних досліджень зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі (рис. 4.4–4.6) було представлено у вигляді графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$ (рис. 4.29–4.31).

Періоди повного та часткового насичення теплового агента вологою узагальнено прямими лініями як було описано у даному розділі вище (рис. 4.29–4.31) та визначено значення критичних вологовмістів w_{cr}^e за рівнянням (4.1) та часу за різних параметрів фільтраційного сушіння τ_{cr} , результати наведено у табл. 4.4.

Необхідне для розрахунків значення рівноважного вологовмісту w_e^c , що залежить від термодинамічного потенціалу системи i , як наслідок, є змінним для різних температур теплового агента, для ячмінної пивної дробини умовно приймали як найнижче значення досягнутого вологовмісту за температури теплового агента під час процесу фільтраційного сушіння при проведенні експериментальних досліджень: для 50 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С значення w_e^c становили, відповідно, 0,03, 0,04, 0,05, 0,09 кг Н₂О/кг сухого матеріалу.

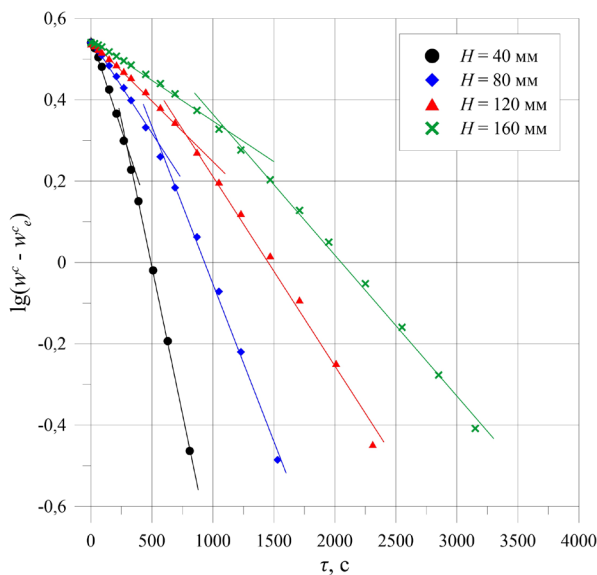


Рис. 4.29. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної висоти шару матеріалу H

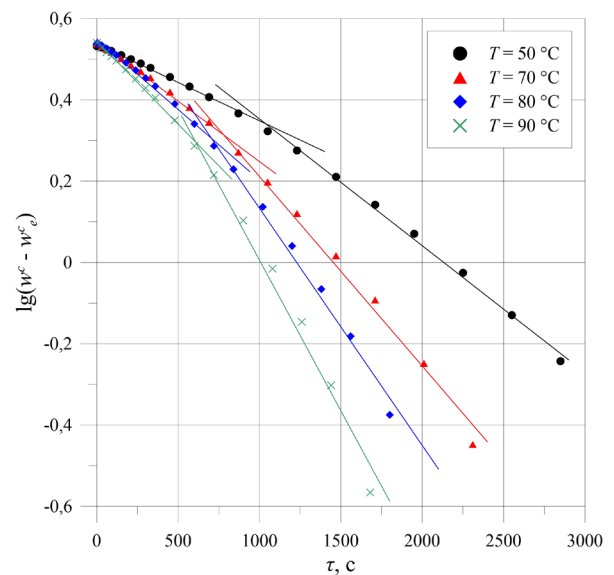


Рис. 4.30. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної температури теплового агента T

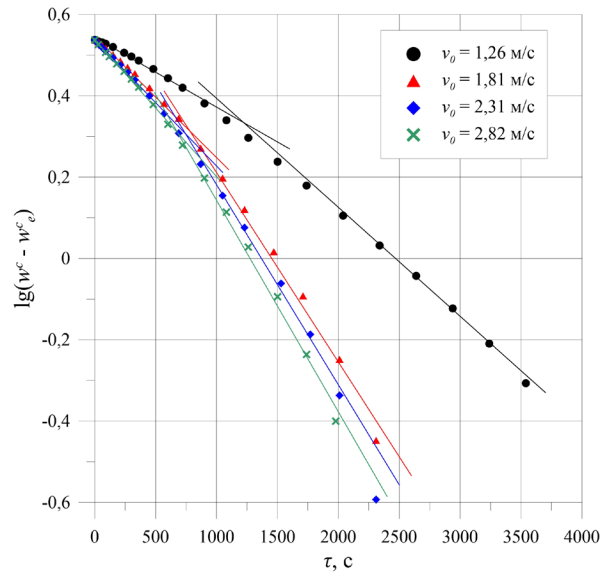


Рис. 4.31. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Таблиця 4.4

Значення критичного вологовмісту w^c_{cr} та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w^e)$	w^c_{cr} , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,81	0,289	1,995	280	
80			0,295	2,022	550	
120			0,313	2,106	780	
160			0,325	2,163	1120	
120	50		0,341	2,283	1040	
	80		0,304	2,054	720	
	90		0,296	2,007	590	
	70		1,26	0,334	2,208	1210
			2,31	0,306	2,073	750
			2,82	0,301	2,05	710

Аналіз даних з табл. 4.4 свідчить, що значення критичного вологовмісту для ячмінної пивної дробини залежить від температури теплового агенту, швидкості руху потоку теплового агенту, а також висоти стаціонарного шару вологого матеріалу.

Для узагальнення кінетичних закономірностей процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини у періоді повного насичення теплового агенту вологою визначали графоаналітичним методом у системі координат $\ln \left(\frac{1 - w^c/w^c_0}{\tau} \right) = f(H)$ значення кінетичних коефіцієнтів a та η , згідно описаного у розділі 2.3.4 та у даному розділі вище (рис. 4.32).

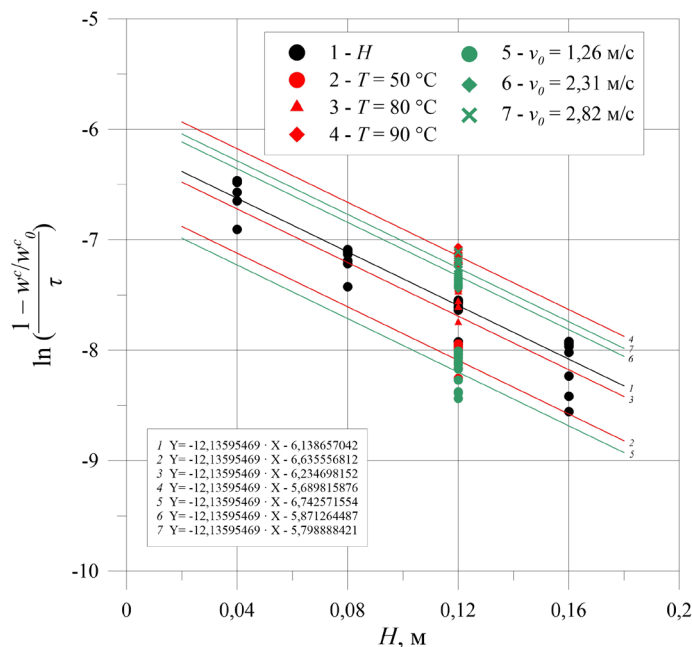


Рис. 4.32. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини

Визначені за допомогою графічних залежностей з рис. 4.32 значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини наведено у табл. 4.5.

Складали систему рівнянь (4.2), розв'язок якої дозволяє визначити коефіцієнти A , m та n для рівняння (2.8). Для розв'язку системи рівнянь (4.2)

використовували дані ліній 1, 4, 7 (рис. 4.31, табл. 4.4), у результаті одержано наступні коефіцієнти:

$$A = 7,093 \cdot 10^{-7}, m = 1,781, n = 0,765$$

Таблиця 4.5

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини

№ лінії рис. 4.32	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с	
1	40	70	1,81	12,136	-6,138657042	0,00215782	
	80						
	120						
	160						
2	120	50	1,26		-6,635556812	0,001312848	
3		80			-6,234698152	0,001960221	
4		90			-5,689815876	0,003380215	
5		70			2,31	-6,742571554	0,00117961
7					2,31	-5,871264487	0,002819306
8					2,82	-5,798888421	0,003030922
					2,82		

Аналіз розрахованих коефіцієнтів A , m , n підтверджує висновки, зроблені у розділі 4.1, про вагомий вплив температури теплового агенту за вплив швидкості руху його потоку на процес фільтраційного сушіння, оскільки значення констант для цих параметрів описується співвідношенням $m > n$.

Як результат, використавши одержані коефіцієнти A , m , n для рівняння (2.8), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w_{cr}^c \leq w^c < w_0^c$:

$$w^c = w_0^c \cdot (1 - 7,093 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1,781} \cdot \nu_0^{0,765} \cdot \tau \cdot e^{-12,136 \cdot H}) \quad (4.9)$$

Для опису кінетичних закономірностей процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини у періоді повного насичення теплового агенту вологою, за допомогою графічних залежностей у системі координат $\ln((w^c - w_e^c)/(w_{cr}^c - w_e^c)) = f(\tau - \tau_{cr})$ для значень вологовмісту досліджуваного матеріалу у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, знайдемо коефіцієнти швидкості сушіння K (рис. 4.33–4.35).

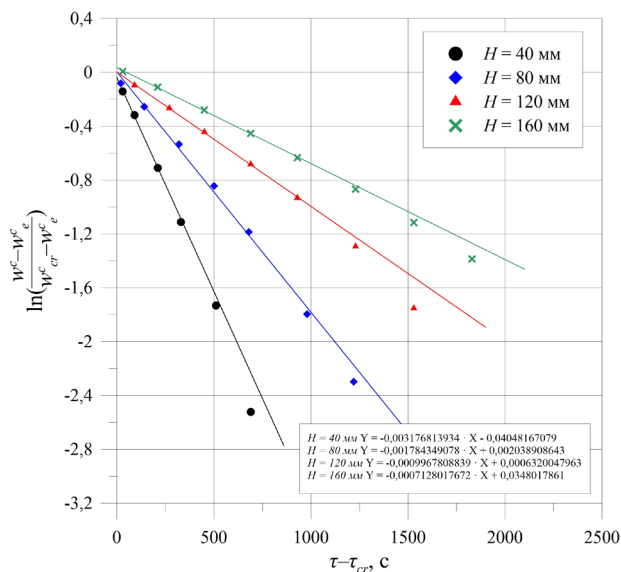


Рис. 4.33. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної висоти шару матеріалу H

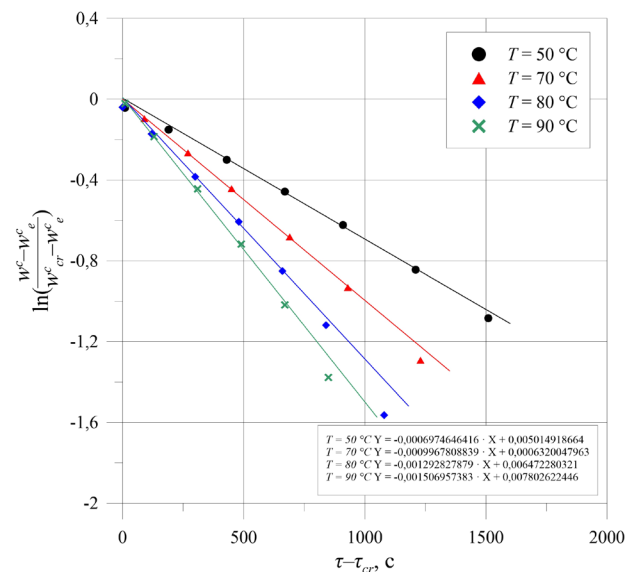


Рис. 4.34. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної температури теплового агенту T

Швидкість сушіння N розраховували за рівнянням (2.13). Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K визначали як тангенси кутів нахилу прямих на рис. 4.33–4.35. Визначені дані наведено у табл. 4.6.

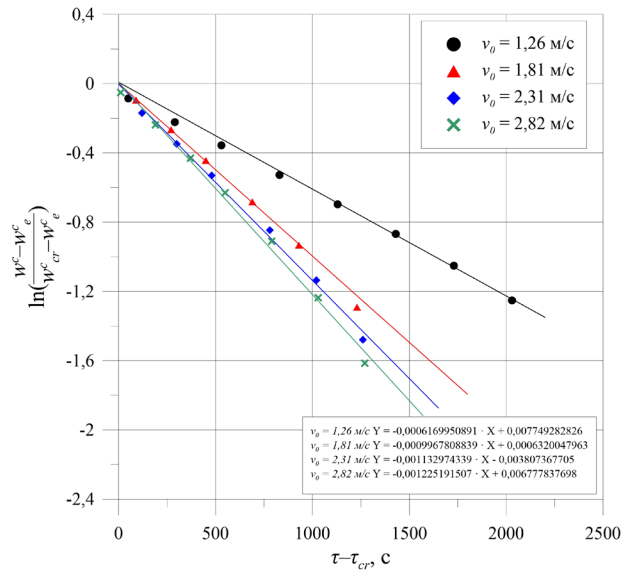


Рис. 4.35. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної швидкості руху теплового агента v_0

Таблиця 4.6

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с	
40	70	1,81	0,003176813934	0,005449035	
80			0,001784349078	0,002723600	
120			0,0009967808839	0,001781260	
160			0,0007128017672	0,001330373	
120	50		0,0006974646416	0,001165752	
	80		0,001292827879	0,002001920	
	90		0,001506957383	0,002522682	
	70		1,26	0,0006169950891	0,001063953
			2,31	0,001132974339	0,001896510
			2,82	0,001225191507	0,002035750

На основі узагальнених даних табл. 4.6 було побудовано графічну залежність $K = f(N)$ (рис. 4.36), та за допомогою графоаналітичного методу визначали значення відносного коефіцієнта сушіння χ для фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини як тангенса кута нахилу одержаної прямої лінії до осі абсцис: $\chi = 0,596 \text{ кг H}_2\text{O/кг сухого матеріалу}$.

Як результат, використавши одержане значення відносного коефіцієнта сушіння χ для рівняння (2.14), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,596 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c, \quad (4.10)$$

Для оцінки коректності одержаних рівнянь зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння (4.9) та (4.10), побудовано графічну залежність кореляції відхилень експериментальних даних та теоретично розрахованих значень (рис. 4.37).

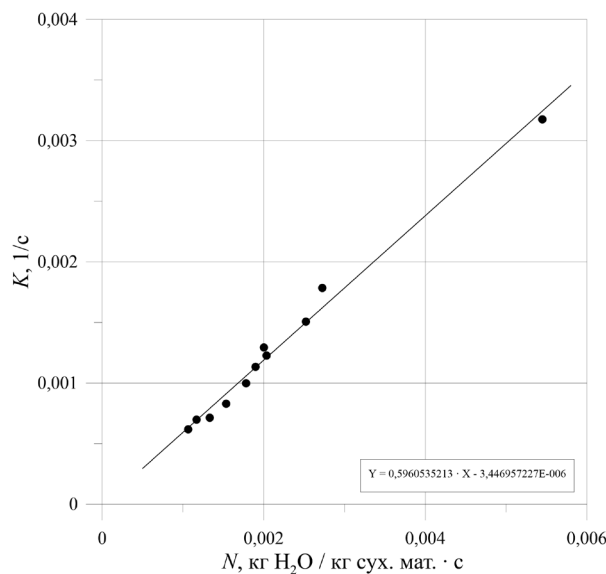


Рис. 4.36. Графічна залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою N для фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини

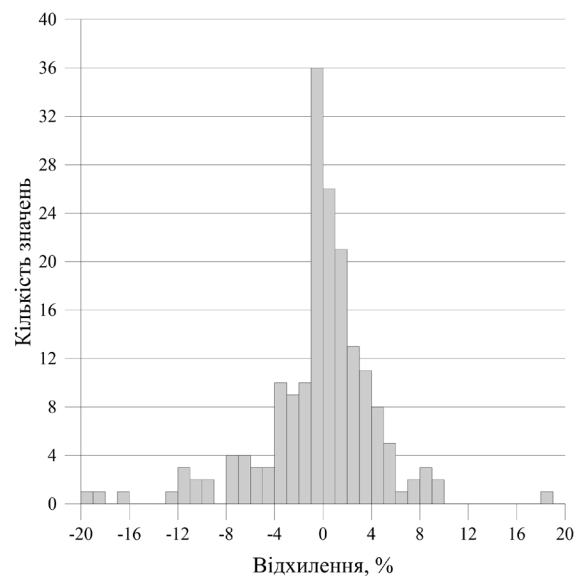


Рис. 4.37. Графічна залежність розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння

Максимальне значення відносного відхилення становить 18,32 %, а середнє відносне відхилення становить 3,15 %, що дозволяє використовувати одержані залежності зміни вологовмісту ячмінної пивної дробини під час фільтраційного сушіння для розрахунку сушильного обладнання.

Час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини τ_I у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w_{cr}^c \leq w^c < w_0^c$, згідно рівняння (2.15), (4.9):

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{7,093 \cdot 10^{-7} \cdot T^{1,781} \cdot v_0^{0,765} \cdot \tau \cdot e^{-12,136 \cdot H}} \quad (4.11)$$

Час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини τ_{II} у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, згідно рівняння (2.16), (4.10):

$$\tau_{II} = \frac{0,596 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{0,596 \cdot N} \quad (4.12)$$

Загальний час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини від початкового до кінцевого вологовмісту розраховується як сума часів τ_I та τ_{II} . Для значень вологовмісту $w^c < 0,5$ кг H₂O / кг сухого матеріалу додатково потрібно враховувати додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної вологи за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K_{\tau_{II}} = 0,7 \div 0,9$ для врахування затрат теплоти на випаровування зв'язаної вологи та нагрівання вологого матеріалу, як було описано у розділі 2.3.4.

Відходи виробництва кави

Згідно описаної вище методики за допомогою графоаналітичного методу аналізу графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$ було визначено значення критичного вологовмісту відходів виробництва кави w_{cr}^c досягнення зоною тепломасообміну перфорованої перегородки циліндричного контейнера експериментальної установки (рис. 4.38–4.40).

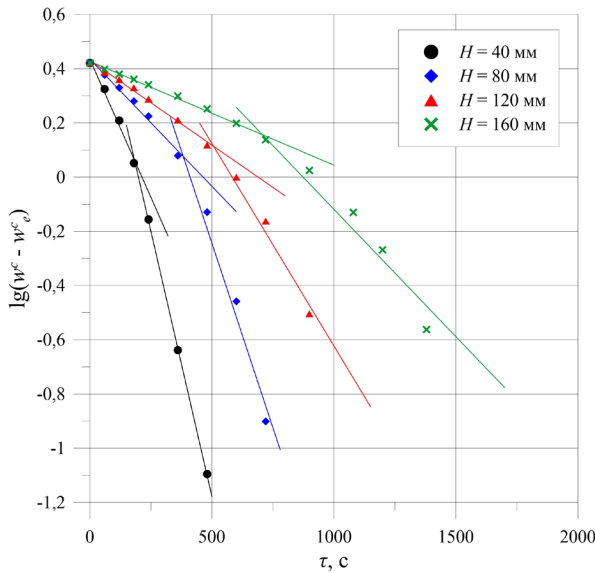


Рис. 4.38. Графічна залежність

для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної висоти шару матеріалу H

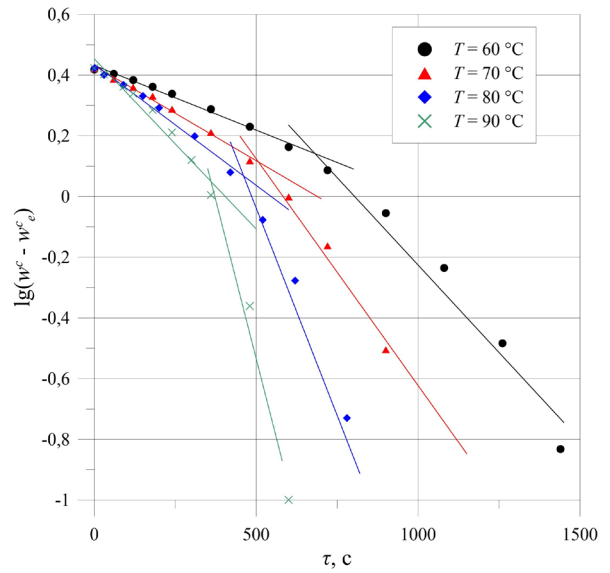


Рис. 4.39. Графічна залежність

для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної температури теплового агента T

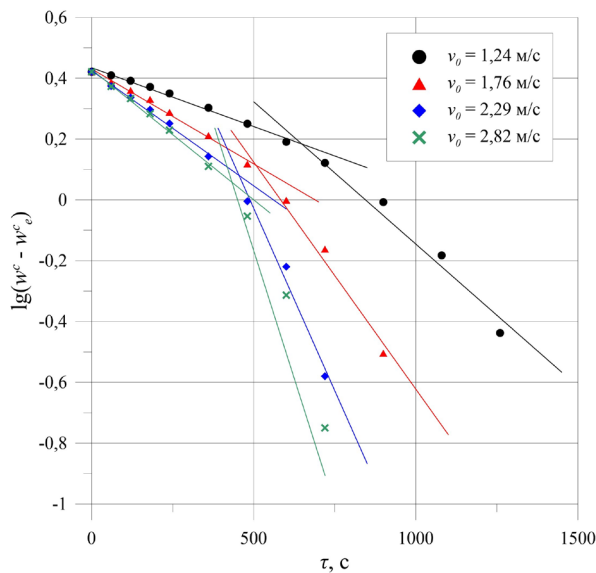


Рис. 4.40. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Для розрахунків додатково визначали значення рівноважного вологовмісту відходів виробництва кави w^e , який умовно приймали як найнижче

досягнуте значення вологовмісту за певної температури теплового агенту. Відповідно для використаних в серії експериментів температур теплового агенту 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С значення w^c_e становили, відповідно, 0,047, 0,032, 0,023, 0,018 кг Н₂О/кг сухого матеріалу.

Результати визначених за допомогою графоаналітичного методу значень критичного вологовмісту w^c_{cr} і часу його досягнення τ_{cr} наведено у табл. 4.7.

Таблиця 4.7

Значення критичного вологовмісту w^c_{cr} та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різних параметрів процесу

Н, мм	Т, °С	v_0 , м/с	$\lg(w^c - w^c_e)$	w^c_{cr} , кг Н ₂ О / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,76	0,052	1,159	190	
80			0,079	1,231	360	
120			0,111	1,323	510	
160			0,155	1,461	700	
120	60	1,24	0,160	1,492	610	
	80		0,068	1,192	460	
	90		0,033	1,097	350	
	70		2,29	0,182	1,553	610
			2,29	0,08	1,234	440
			2,82	0,056	1,170	420

Як показує аналіз табл. 4.7, критичний вологовміст відходів кавового виробництва також залежить від параметрів системи під час фільтраційного сушіння – висоти шару матеріалу, температури теплоносія та його швидкості руху.

Наступним кроком була побудова графічних залежностей, згідно описаної вище методики, у системі координат $\ln((1 - w^c/w^c_0)/\tau) = f(H)$ для періоду повного

насичення теплового агенту вологою (рис. 4.41) для визначення кінетичних коефіцієнтів a та η , одержані результати наведено у табл. 4.8.

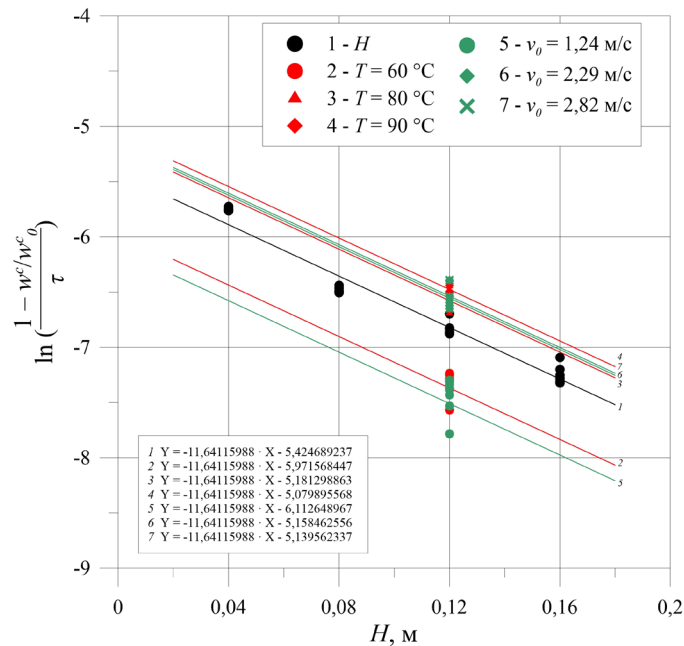


Рис. 4.41. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави

За даними табл. 4.8 (лінії 1, 4, 7) було складено систему рівнянь (4.2), з розв'язку якої одержуємо наступні значення:

$$A = 9,37 \cdot 10^{-6}, m = 1,368, n = 0,604$$

Аналіз рівняння (4.4) в черговий раз підтверджує висновки, зроблені у розділі 4.1, про вагомійший вплив температури теплового агенту за вплив швидкості руху його потоку на процес фільтраційного сушіння, оскільки значення констант для цих параметрів описується співвідношенням $m > n$.

Використавши одержані коефіцієнти для рівняння (2.8), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту відходів виробництва кави під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w^c_{cr} \leq w^c < w^c_0$:

$$w^c = w^c_0 \cdot (1 - 9,37 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,368} \cdot v_0^{0,604} \cdot \tau \cdot e^{-11,641 \cdot H}) \quad (4.13)$$

Таблиця 4.8

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави

№ лінії рис. 4.41	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с
1	40	70	1,76	11,641	- 5,424689237	0,004406435
	80					
	120					
	160					
2	120	60			- 5,971568447	0,002550238
3		80			- 5,181298863	0,005620701
4		90			- 5,079895568	0,006220559
5		70	1,24		- 6,112648967	0,002214676
6			2,29		- 5,158462556	0,005750534
7			2,82		- 5,139562337	0,005860254

Для узагальнення закономірностей зміни вологовмісту відходів виробництва кави за процесу фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою було побудовано графічні залежності у системі координат $\ln((w^c - w^e)/(w^{c_{cr}} - w^e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ для значень вологовмісту досліджуваного матеріалу у межах $w^e < w^c < w^{c_{cr}}$ для визначення коефіцієнту сушіння K (рис. 4.42–4.44), що у свою чергу дозволяє знайти відносний коефіцієнт сушіння χ за відомого значення швидкості сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою N .

Визначені значення K згідно рис. 4.42–4.44 та розраховані, згідно рівняння (2.13) відповідні значення N наведено у табл. 4.9.

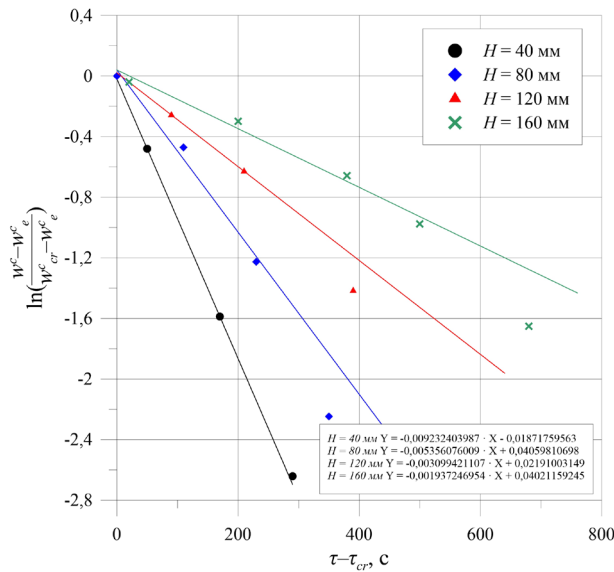


Рис. 4.42. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної висоти шару матеріалу H

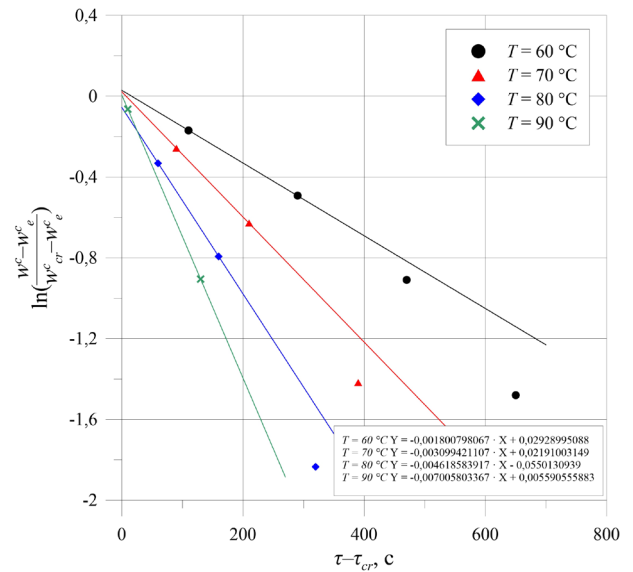


Рис. 4.43. Графічна залежність

для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної температури теплового агента T

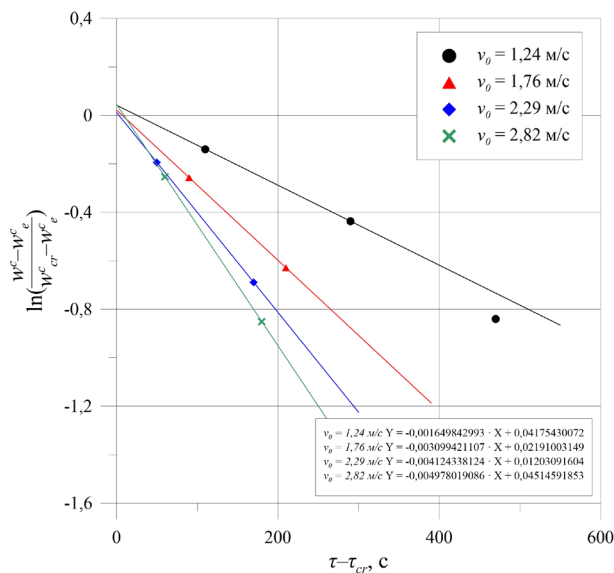


Рис. 4.44. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної швидкості руху теплового агента v_0

Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ , за даними табл. 4.9 було побудовано графічну залежність $K = f(N)$ (рис. 4.45), де шуканий коефіцієнт ви-

значається як тангенс кута нахилу усереднюючої прямої.

Таблиця 4.9

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с	
40	70	1,76	0,009232403987	0,007933966	
80			0,005356076009	0,003987371	
120			0,003099421107	0,002634222	
160			0,001937246954	0,001722076	
120	60		0,001800798067	0,001925334	
	80		0,004618583917	0,003205334	
	90		0,007005803367	0,004484153	
	70		1,24	0,001649842993	0,001825334
			2,29	0,004124338124	0,003331287
			2,82	0,004978019086	0,003562984

Рис. 4.45 свідчить, що для відходів виробництва кави значення відносного коефіцієнта сушіння $\chi = 1,281$ кг сухого матеріалу / кг H₂O, підставивши дане значення у рівняння (2.14), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту відходів виробництва кави під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агента вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-1,281 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.14)$$

Для оцінки відповідності експериментальних даних до теоретично розрахованих, було побудовано графічний розподіл одержаних відхилень (рис. 4.46).

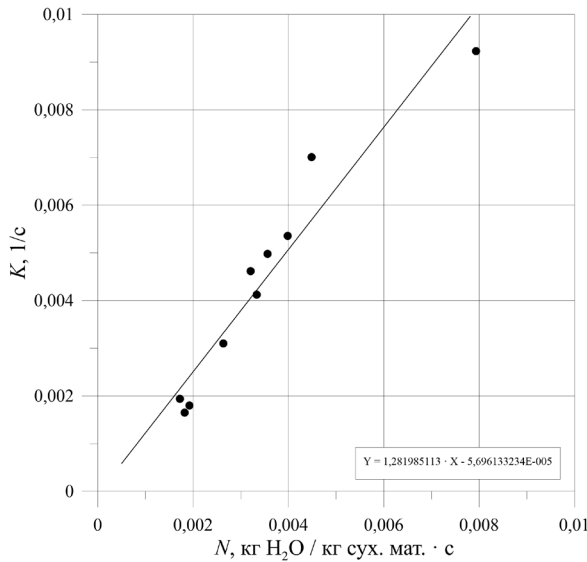


Рис. 4.45. Графічна залежність

для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави

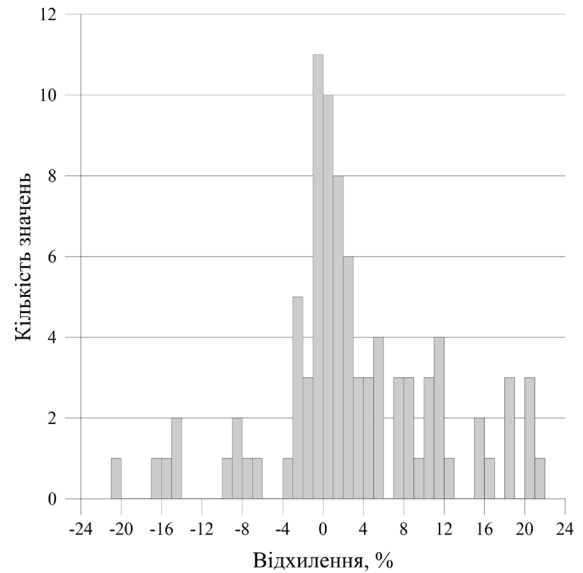


Рис. 4.46. Графічна залежність

розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень змін вологовмісту відходів виробництва кави під час фільтраційного сушіння

Максимальне значення відносного відхилення становить 21,78 %, а середнє відносне відхилення становить 5,83 %, що дозволяє використовувати одержані залежності зміни вологовмісту відходів виробництва кави (4.13) та (4.14) під час фільтраційного сушіння для розрахунку сушильного обладнання.

Час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави τ_I у періоді повного насичення теплового агента вологою у межах $w_{cr}^c \leq w^c < w_0^c$, згідно рівняння (2.15), (4.13):

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{9,37 \cdot 10^{-6} \cdot T^{1,368} \cdot v_0^{0,604} \cdot e^{-11,641 \cdot H}} \quad (4.15)$$

Час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави τ_{II} у періоді часткового насичення теплового агента вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, згідно рівняння (2.16), (4.6):

$$\tau_{II} = \frac{1,281 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{1,281 \cdot N} \quad (4.16)$$

Загальний час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави від початкового до кінцевого вологовмісту розраховується як сума часів τ_I та τ_{II} . Для значень вологовмісту $w^c < 0,5$ кг Н₂О / кг сухого матеріалу додатково треба враховувати додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної вологи за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K\tau_{II} = 0,7 \div 0,9$, як було описано у розділі 2.3.4.

Буряковий жом

Результати експериментальних досліджень кінетичних закономірностей фільтраційного сушіння бурякового жому (рис. 4.10–4.12) було виражено у вигляді графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$ (рис. 4.47–4.49).

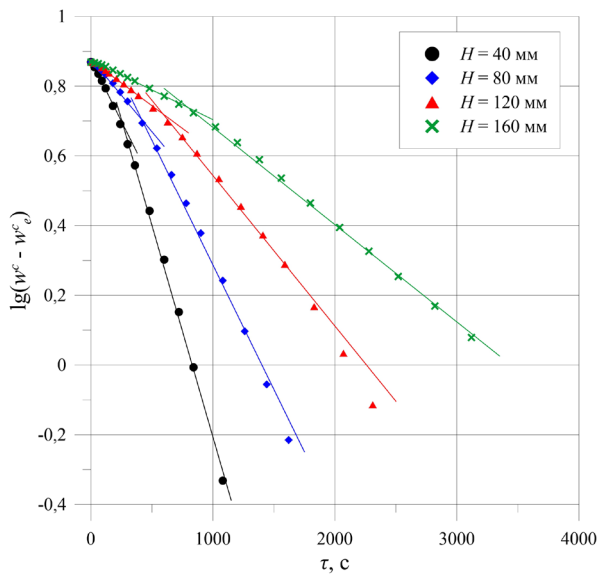


Рис. 4.47. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної висоти шару матеріалу H

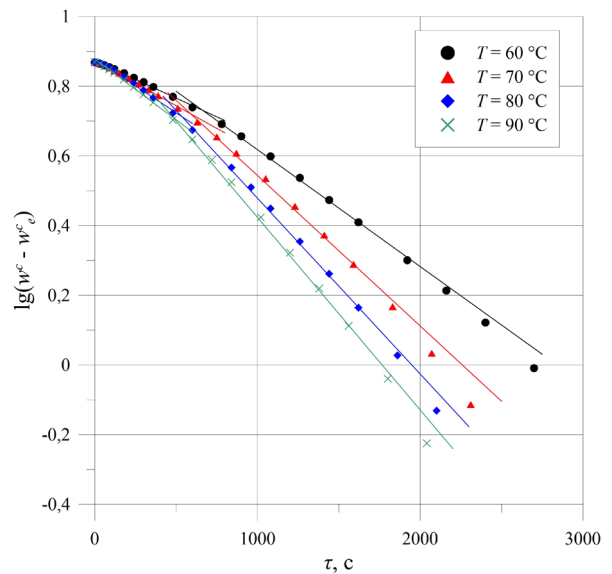


Рис. 4.48. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної температури теплового агенту T

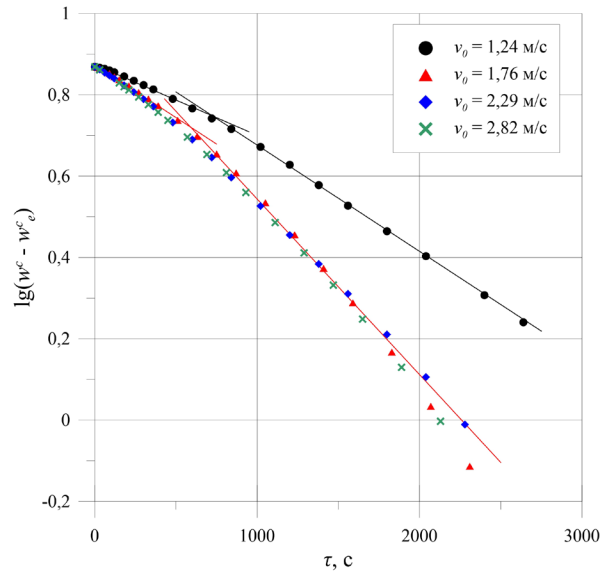


Рис. 4.49. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Було визначено рівноважний вологовміст w^e бурякового жому, який змінюється в залежності від температури теплового агента і становить 0,031, 0,023, 0,015, 0,009 кг Н₂О/кг сухого матеріалу для досліджуваних температур 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С відповідно.

За допомогою графоаналітичного методу було визначено значення критичного вологовмісту бурякового жому w^c_{cr} досягнення зоною тепломасообміну перфорованої перегородки циліндричного контейнера експериментальної установки та часу його досягнення τ_{cr} під час процесу фільтраційного сушіння (рис. 4.47–4.49), результати визначення узагальнено в табл. 4.10.

Як було описано у розділі 4.1, через фактичну відсутність відмінностей в інтенсивності осушення бурякового жому фільтраційним методом за швидкостей потоку теплового агента 1,76 м/с, 2,29 м/с та 2,82 м/с, для подальших розрахунків було враховано результати за швидкості потоку теплового агента $v_0 = 1,76$ м/с, як спільні для визначення коефіцієнтів у розрахунках (рис. 4.49).

Таблиця 4.10

Значення критичного вологовмісту w_{cr}^c та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w_e^c)$	w_{cr}^c , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с
40	70	1,76	0,689	4,910	250
80			0,704	5,081	410
120			0,72	5,271	580
160			0,739	5,506	790
120	60	1,24	0,731	5,414	660
	80		0,709	5,132	520
	90		0,706	5,091	470
	70		0,748	5,621	730

Далі для узагальнення кінетичних закономірностей процесу фільтраційного сушіння бурякового жому у періоді повного насичення теплового агенту вологою визначали за допомогою графоаналітичного методу значення кінетичних коефіцієнтів a та η за допомогою графічної залежності у системі координат $ln((1 - w^c/w_0^c)/\tau) = f(H)$ (рис. 4.50, табл. 4.11).

За даними табл. 4.11 (лінії 1, 4, 7) було складено систему рівнянь (4.2), з розв'язку якої одержали значення коефіцієнтів:

$$A = 6,159 \cdot 10^{-5}, m = 0,61, n = 1,547$$

Аналіз одержаних коефіцієнтів свідчить про вагомий вплив швидкості руху потоку теплового агенту на процес фільтраційного сушіння, оскільки значення констант для цих параметрів описується співвідношенням $n > m$.

Використавши одержані коефіцієнти для рівняння (2.8), отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту бурякового жому під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w_{cr}^c < w^c < w_0^c$:

$$w^c = w_0^c \cdot (1 - 6,159 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,61} \cdot v_0^{1,547} \cdot \tau \cdot e^{-12,753 \cdot H}) \quad (4.17)$$

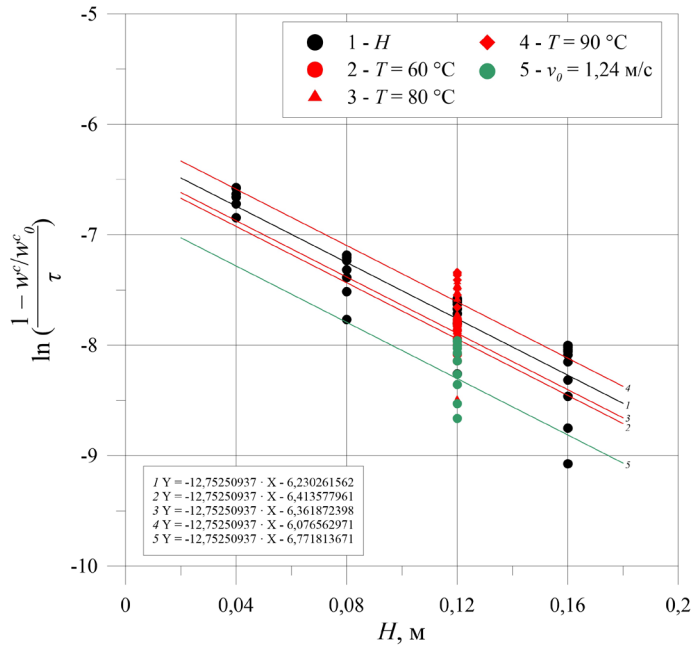


Рис. 4.50. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння бурякового жому

Таблиця 4.11

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння бурякового жому

№ лінії рис. 4.50	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с
1	40	70	1,76	12,753	- 6,230261562	0,001968937
	80					
	120					
	160					
2	120	60	1,24	12,753	- 6,413577961	0,001639149
3		80				
4		90				
5		70				

Було виконано побудову графічних залежностей у системі координат $\ln((w^c - w^e)/(w^{c_{cr}} - w^e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ для значень вологовмісту бурякового жому у межах $w^e < w^c < w^{c_{cr}}$, для визначення коефіцієнтів швидкості сушіння K (рис. 4.51–4.53).

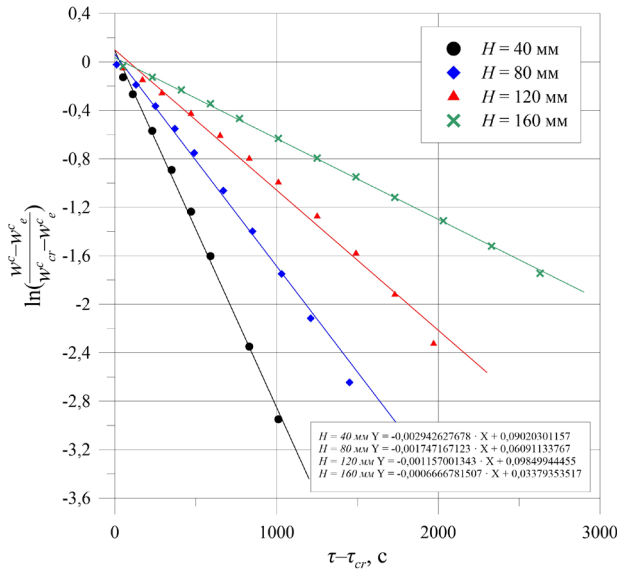


Рис. 4.51. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної висоти шару матеріалу H

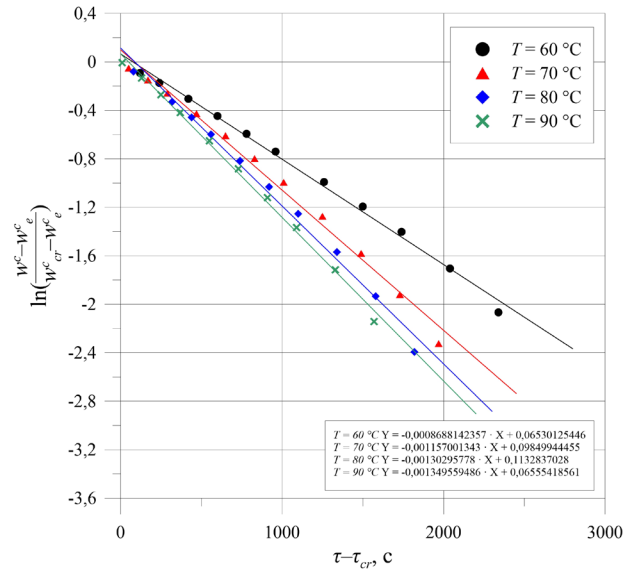


Рис. 4.52. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної температури теплового агенту T

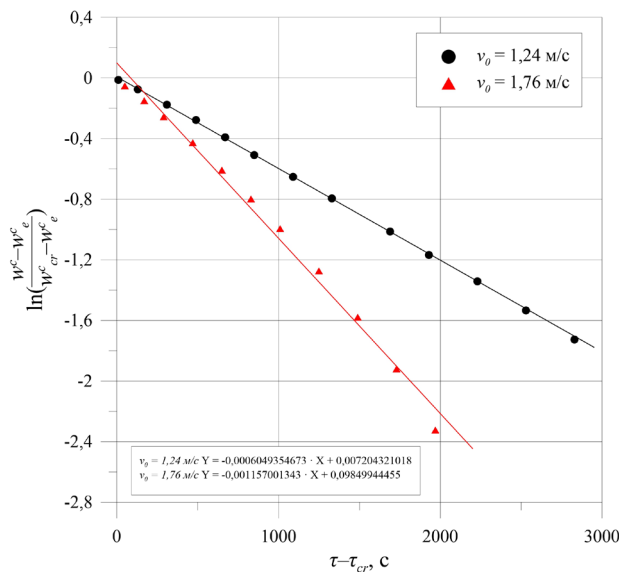


Рис. 4.53. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної швидкості руху теплового агенту v_0

Визначені значення K згідно рис. 4.51–4.53 та розраховані, згідно рівняння (2.13) відповідні значення N наведено у табл. 4.12.

Таблиця 4.12

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння бурякового жому

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с
40	70	1,76	0,002942627678	0,010026422
80			0,001747167123	0,005694835
120			0,001157001343	0,003698370
160			0,0006666781507	0,002418176
120	60	1,24	0,0008688142357	0,003033987
	80		0,00130295778	0,004392905
	90		0,001349559486	0,004947946
	70		0,0006049354673	0,002528948

Було побудовано графічну залежність $K = f(N)$, використовуючи дані, наведені у табл. 4.12, на основі якої визначали значення відносного коефіцієнта сушіння χ для бурякового жому: $\chi = 0,303$ кг сухого матеріалу / кг H₂O (рис. 4.54).

Як результат, отримуємо вираз, що описує зміну вологовмісту бурякового жому під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агента вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,303 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.18)$$

Для перевірки точності отриманих математичних узагальнень (4.17) та (4.18) було проведено аналіз графічного розподілу відхилень між експериментальними та теоретично розрахованими значеннями (рис. 4.55). Максимальне відхилення розрахункових значень від експериментальних склало 36,54 %, а середнє відхилення становить 8,46 %.

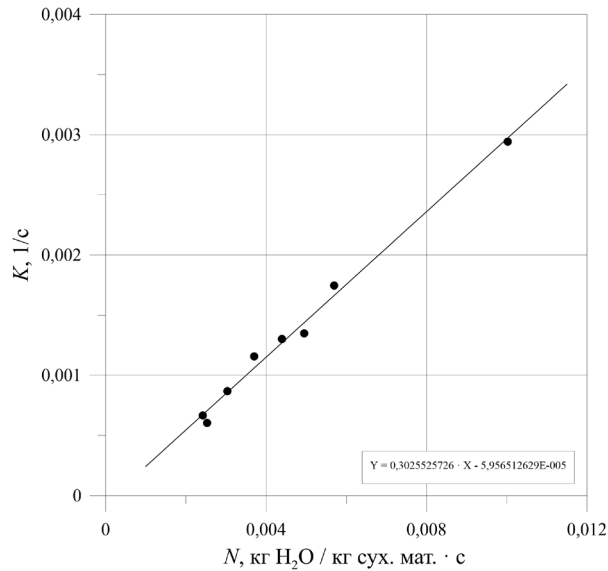


Рис. 4.54. Графічна залежність

для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння бурякового жому

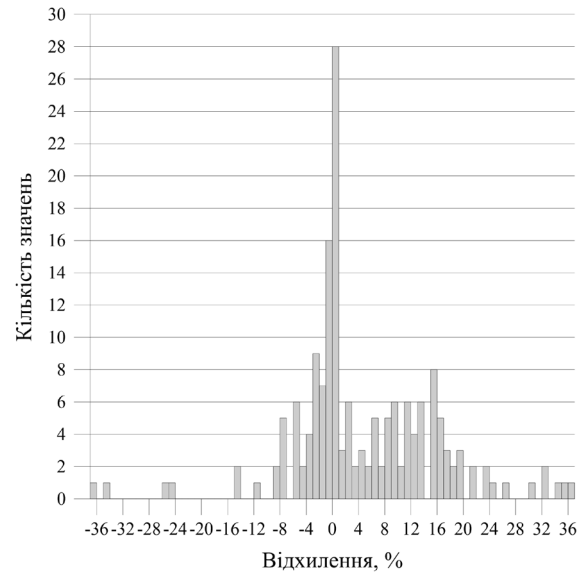


Рис. 4.55. Графічна залежність

розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень змін вологовмісту бурякового жому під час фільтраційного сушіння

Час фільтраційного сушіння бурякового жому τ_I у періоді повного насичення теплового агента вологою у межах $w_{cr}^c \leq w^c < w_0^c$, згідно рівняння (2.15), (4.17):

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{6,159 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,61} \cdot \nu_0^{1,547} \cdot e^{-12,753 \cdot H}} \quad (4.19)$$

Час фільтраційного сушіння бурякового жому τ_{II} у періоді часткового насичення теплового агента вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$, згідно рівняння (2.16), (4.18):

$$\tau_{II} = \frac{0,303 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{0,303 \cdot N} \quad (4.20)$$

Загальний час фільтраційного сушіння бурякового жому від початкового до кінцевого вологовмісту розраховується як сума часів τ_I та τ_{II} . Для значень вологовмісту $w^c < 0,5$ кг H₂O / кг сухого матеріалу додатково слід враховувати

додаткові витрати теплоти випаровування зв'язаної вологи за допомогою уточнюючого коефіцієнта $K\tau_{II} = 0,7 \div 0,9$ для врахування затрат теплоти на випаровування зв'язаної вологи та нагрівання вологого матеріалу, як було описано у розділі 2.3.4.

Яблучні вичавки

За допомогою аналізу графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w^e) = f(\tau)$ було визначено значення критичного вологовмісту яблучних вичавок w^c_{cr} та часу їх досягнення за різних параметрів фільтраційного сушіння (рис. 4.56–4.58). Додатково було встановлено значення рівноважного вологовмісту яблучних вичавок w^e , який умовно приймали як найнижче досягнуте значення вологовмісту досліджуваного матеріалу за певної температури теплового агента: для 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С значення w^e становили 0,221, 0,201, 0,151, 0,099 кг H₂O/кг сухого матеріалу відповідно (рис. 4.13–4.15).

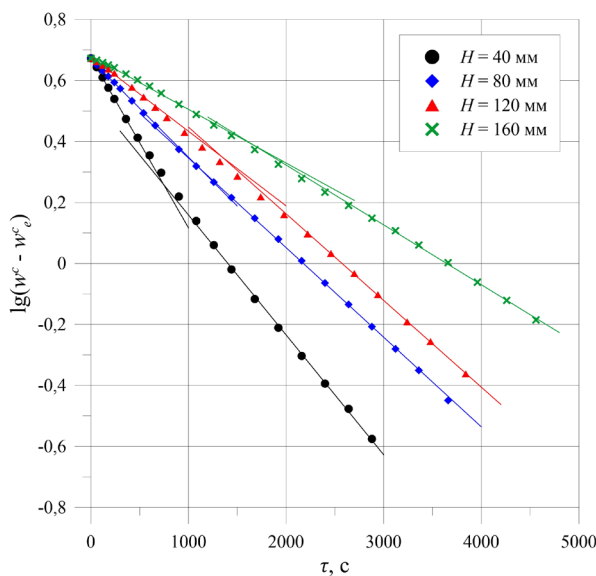


Рис. 4.56. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару матеріалу H

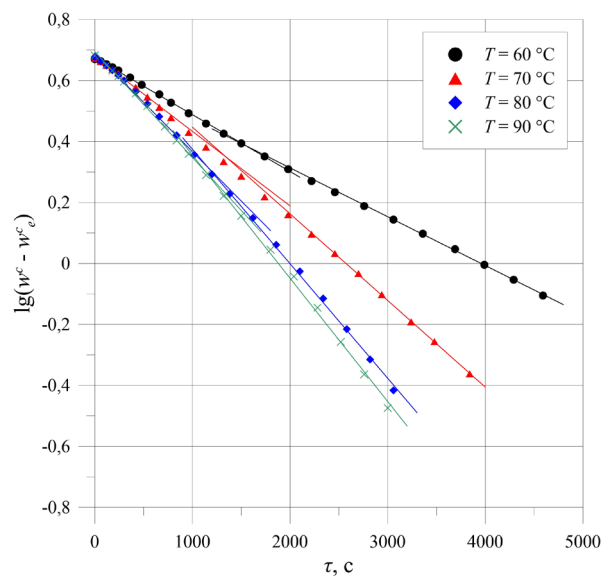


Рис. 4.57. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w^c_{cr} та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної температури теплового агента T

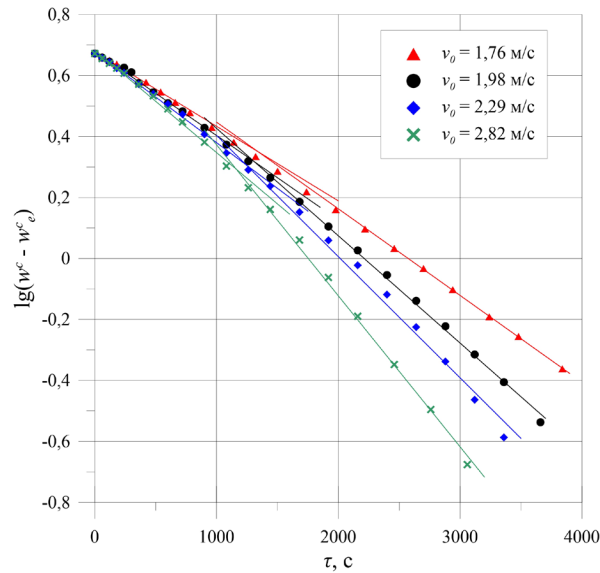


Рис. 4.58. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Результати визначених за допомогою графоаналітичного методу значень критичного вологовмісту w_{cr}^c і часу його досягнення τ_{cr} для яблучних вичавок наведено у табл. 4.13.

Таблиця 4.13

Значення критичного вологовмісту w_{cr}^c та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w^e)$	w_{cr}^c , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,76	0,258	2,012	740	
80			0,321	2,295	1070	
120			0,348	2,429	1260	
160			0,387	2,639	1640	
120	60		0,385	2,648	1550	
	80		0,316	2,221	1140	
	90		0,299	2,090	1100	
	70		1,98	0,317	2,276	1310
			2,29	0,306	2,224	1250
			2,82	0,293	2,164	1160

Наступним кроком була побудова графічних залежностей у системі координат $\ln((1 - w^c/w^c_0)/\tau) = f(H)$ для значень вологовмісту яблучних вичавок у періоді повного насичення теплового агенту вологою (рис. 4.59). Результати графічного визначення кінетичних коефіцієнтів a та η наведено у табл. 4.14.

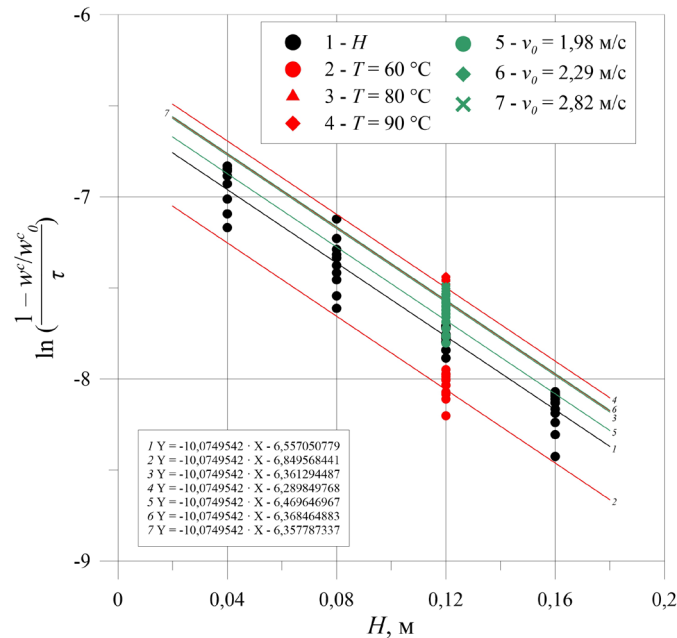


Рис. 4.59. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок

За даними табл. 4.14 (лінії 1, 4, 7) було складено систему рівнянь (4.2), з розв'язку якої одержуємо наступні значення:

$$A = 1,237 \cdot 10^{-5}, m = 1,06, n = 0,422$$

Визначивши коефіцієнти A , m та n , записуємо вираз на основі рівняння (2.8), що описує зміну вологовмісту яблучних вичавок під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w^c_{cr} \leq w^c < w^c_0$:

$$w^c = w^c_0 \cdot (1 - 1,237 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,06} \cdot v_0^{0,422} \cdot \tau \cdot e^{-10,075 \cdot H}) \quad (4.21)$$

Для опису закономірностей процесу фільтраційного сушіння яблучних вичавок у періоді часткового насичення теплового агенту вологою, було побудовано графічні залежності у системі координат $\ln((w^c - w^c_e)/(w^c_{cr} - w^c_e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ (рис. 4.60–4.62) для подальшого визначення коефіцієнту сушіння K .

Таблиця 4.14

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок

№ лінії рис. 4.59	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с	
1	40	70	1,76	10,075	- 6,557050779	0,001420068	
	80						
	120						
	160						
2	120	60	1,98	10,075	- 6,849568441	0,001059913	
3		80			- 6,361294487	0,00172713	
4		90			- 6,289849768	0,001855039	
5		70			1,98	- 6,469646967	0,001549773
6					2,29	- 6,368464883	0,00171479
7					2,82	- 6,357787337	0,001733197

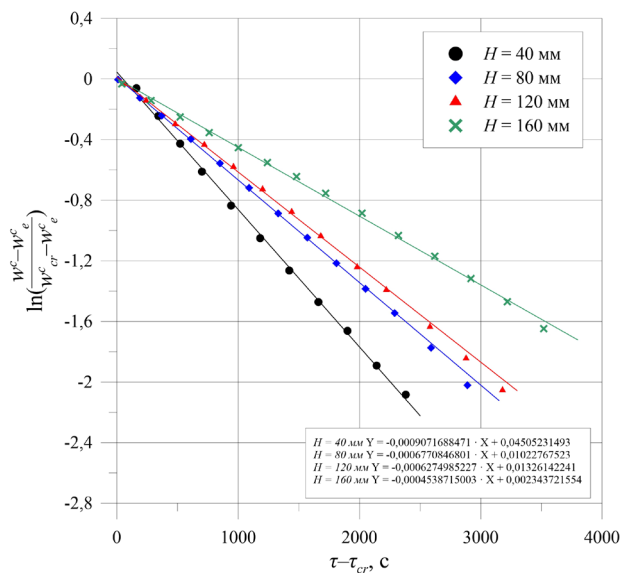


Рис. 4.60. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару матеріалу H

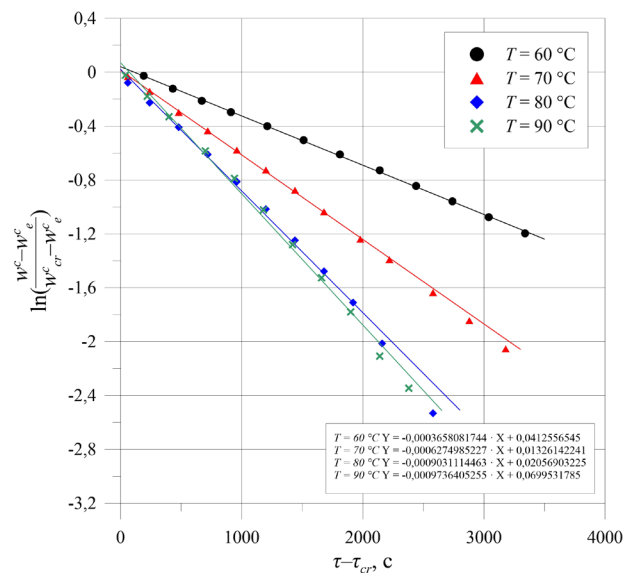


Рис. 4.61. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної температури теплового агенту T

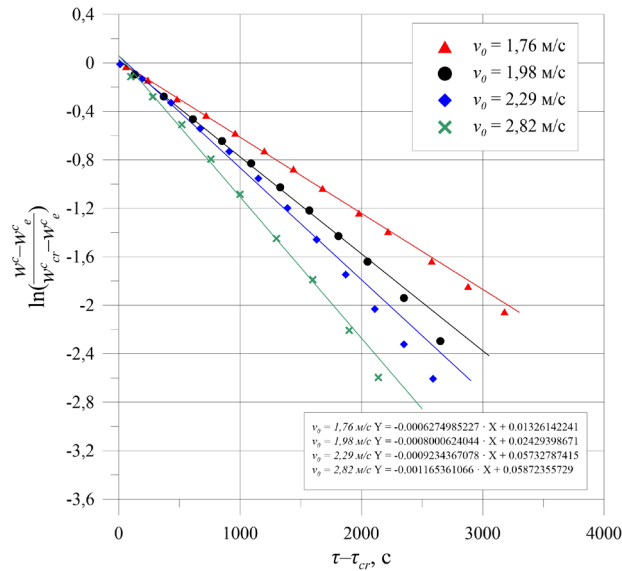


Рис. 4.62. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної швидкості руху теплового агента v_0

Результати графічного аналізу та розраховані, згідно рівняння (2.13), відповідні значення швидкостей сушіння N наведено у табл. 4.15.

Таблиця 4.15

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с	
40	70	1,76	0,0009071688471	0,003910464	
80			0,0006770846801	0,002439947	
120			0,0006274985227	0,001964300	
160			0,0004538715003	0,001382160	
120	60		0,0003658081744	0,001455495	
	80		0,0009031114463	0,002353524	
	90		0,0009736405255	0,002558198	
	70		1,98	0,0008000624044	0,002006120
			2,29	0,0009234367078	0,002144014
			2,82	0,001165361066	0,002362084

Аналіз графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.63) свідчить про те, що для яблучних вичавок відносний коефіцієнт сушіння $\chi = 0,211$ кг сухого матеріалу / кг H_2O .

Отже, узагальнююче рівняння, що описує зміну вологовмісту яблучних вичавок під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-0,211 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.22)$$

Для оцінки коректності виведених математичних залежностей (4.21) та (4.22) було проаналізовано розподіл одержаних відхилень теоретично розрахованих значень від експериментально отриманих. Необхідно відмітити, що аналіз характеру кінетичних кривих та одержаного масиву експериментальних даних свідчить про зростання відхилення теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних після досягнення певного значення вологовмісту.

Це пов'язано із характером та типом сировини – затратами теплоти на випаровування зв'язаної води та нагрівання вологого матеріалу, які зростають із зменшенням тангенсу нахилу кінетичної кривої сушіння до осі абсцис і вимагає уточнюючого коефіцієнту для періоду часткового насичення теплового агенту вологою. Таким чином, рекомендовано використання залежностей (4.21) та (4.22) для діапазону вологовмістів, наведеного у табл. 4.16, де похибка відповідності експериментальних даних до теоретично розрахованих є прийнятною для розрахунків сушильного обладнання і не перевищує ~32 %.

Для рекомендованих значень вологовмісту яблучних вичавок у табл. 4.16, найбільше абсолютне значення відхилення теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних становить 32,29 %, середнє значення даного відхилення становить 7,60 %. Графічне зображення розподілу відхилень теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних зображено на рис. 4.64.

Таблиця 4.16

Рекомендовані значення вологовмістів яблучних вичавок w^c для застосування узагальнюючих залежностей опису зміни вологовмісту яблучних вичавок у часі для процесу фільтраційного сушіння

$H, \text{ мм}$	$T, \text{ }^\circ\text{C}$	$v_0, \text{ м/с}$	$w^c_{\text{рекоменд}}, \text{ кг H}_2\text{O} / \text{ кг сухого матеріалу}$
40	70	1,76	< 0,21
80			< 0,64
120			< 0,99
160			< 1,21
120	60		< 0,63
	80		< 1,09
	90		< 1,21
	70		1,98
2,29			< 1,34
2,82			< 1,35

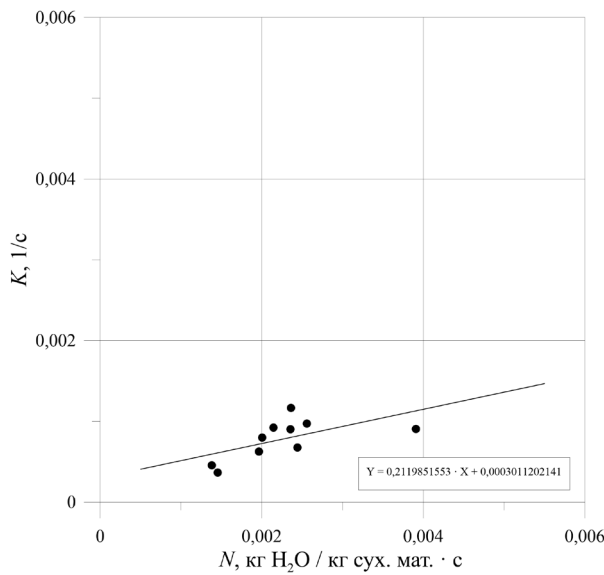


Рис. 4.63. Графічна залежність для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок

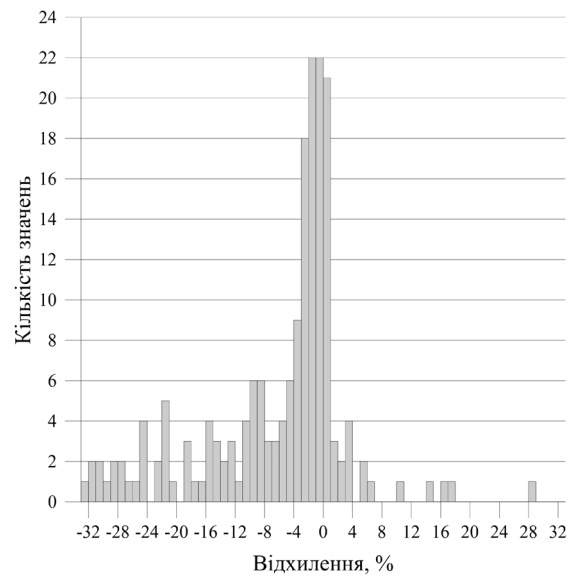


Рис. 4.64. Графічна залежність розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміни вологовмісту яблучних вичавок під час фільтраційного сушіння

Залежності (4.21) та (4.22) дозволяють записати рівняння для визначення тривалості процесу у періоді повного τ_I та періоді часткового τ_{II} насичення теплового агенту вологою:

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{1,237 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,06} \cdot \nu^{0,422} \cdot e^{-10,075 \cdot H}} \quad (4.23)$$

$$\tau_{II} = \frac{0,211 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{0,211 \cdot N} \quad (4.24)$$

Жолуді

За допомогою аналізу графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$ було визначено значення критичного вологовмісту жолудів дубу звичайного w_{cr}^c та часу їх досягнення за різних параметрів фільтраційного сушіння (рис. 4.65–4.67). Додатково було встановлено значення рівноважного вологовмісту жолудів w_e^c : для 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С значення w_e^c становили 0,06, 0,052, 0,044, 0,036 кг Н₂О/кг сухого матеріалу відповідно (рис. 4.16–4.18).

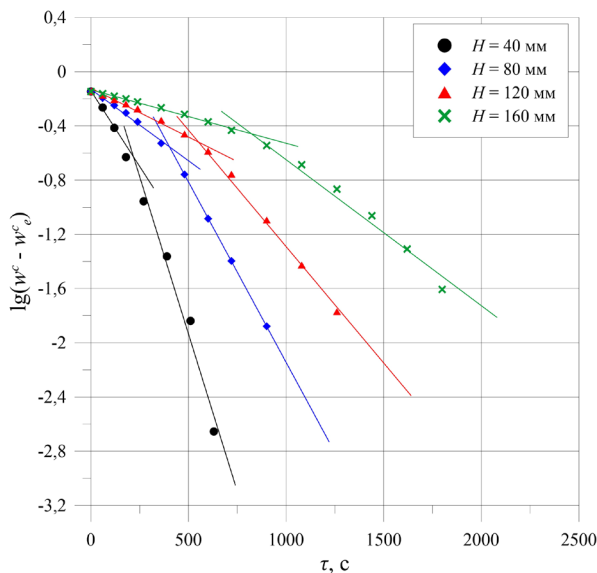


Рис. 4.65. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння жолудів за різної висоти шару матеріалу H

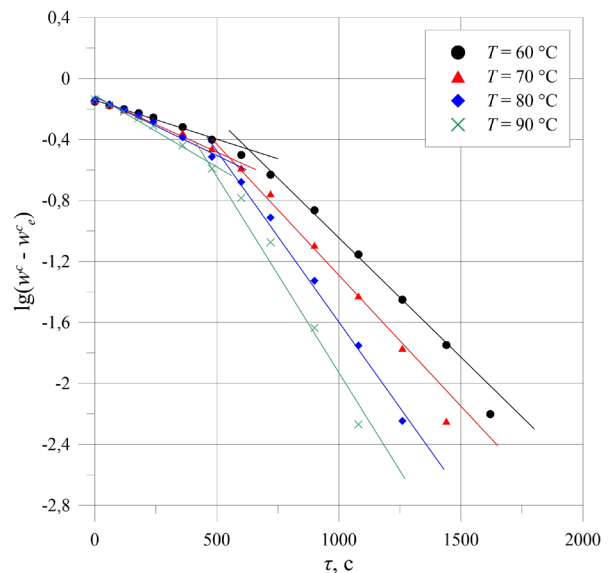


Рис. 4.66. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння жолудів за різної температури теплового агенту T

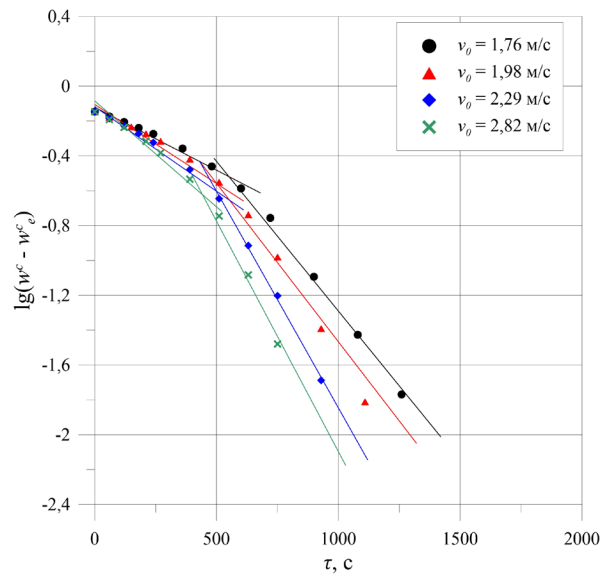


Рис. 4.67. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння жолудів за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Результати визначених за допомогою графоаналітичного методу значень критичного вологовмісту w_{cr}^c і часу його досягнення τ_{cr} для жолудів наведено у табл. 4.17.

Таблиця 4.17

Значення критичного вологовмісту w_{cr}^c та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння жолудів за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w^e)$	w_{cr}^c , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,76	-0,645	0,278	215	
80			-0,56	0,327	400	
120			-0,52	0,354	550	
160			-0,47	0,391	820	
120	60		-0,46	0,407	570	
	80		-0,52	0,346	510	
	90		-0,54	0,324	470	
	70		1,98	-0,57	0,321	530
			2,29	-0,62	0,292	490
			2,82	-0,64	0,281	460

Побудовано графічні залежності у системі координат $\ln((1 - w^c/w^c_0)/\tau) = f(H)$ для значень вологовмісту жолудів у періоді повного насичення теплового агенту вологою (рис. 4.68). Результати графічного визначення кінетичних коефіцієнтів a та η наведено у табл. 4.18.

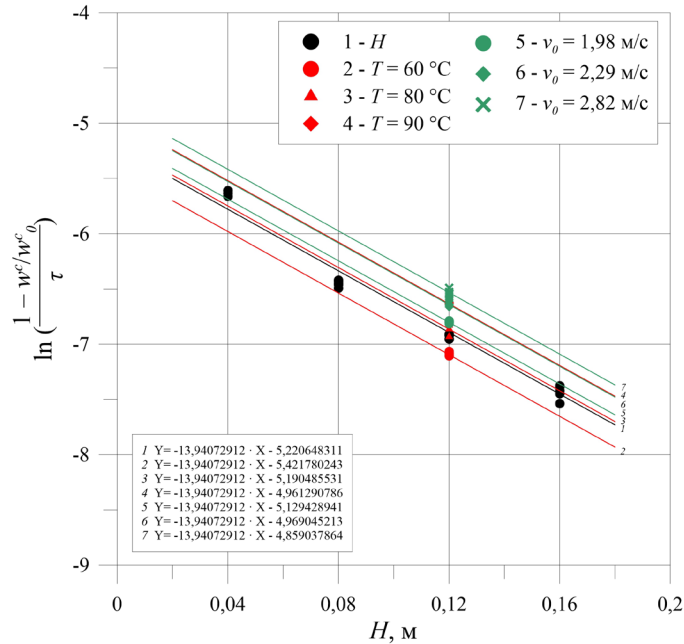


Рис. 4.68. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння жолудів

За даними табл. 4.18 (лінії 1, 4, 7) було складено систему рівнянь (4.2), з розв'язку якої одержуємо наступні значення:

$$A = 4,423 \cdot 10^{-5}, m = 1,029, n = 0,766$$

Визначивши коефіцієнти A , m та n , запишемо вираз на основі рівняння (2.8), що описує зміну вологовмісту жолудів під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою у межах $w^c_{cr} < w^c < w^c_0$:

$$w^c = w^c_0 \cdot (1 - 4,423 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,029} \cdot v_0^{0,766} \cdot \tau \cdot e^{-13,941 \cdot H}) \quad (4.25)$$

Для опису закономірностей процесу фільтраційного сушіння жолудів у періоді часткового насичення теплового агенту вологою, було побудовано графічні залежності у системі координат $\ln((w^c - w^c_e)/(w^c_{cr} - w^c_e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ (рис. 4.69–4.71) для подальшого визначення коефіцієнту сушіння K .

Таблиця 4.18

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння жолудів

№ лінії	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с
1	40	70	1,76	13,941	-5,220648311	0,005403825
	80					
	120					
	160					
2	120	60	1,98	13,941	-5,421780243	0,004419272
3		80			-5,190485531	0,005569302
4		90			-4,961290786	0,007003881
5		70			2,29	-5,129428941
6	120	70	2,29	13,941	-4,969045213	0,006949780
7			2,82		-4,859037864	0,007757944

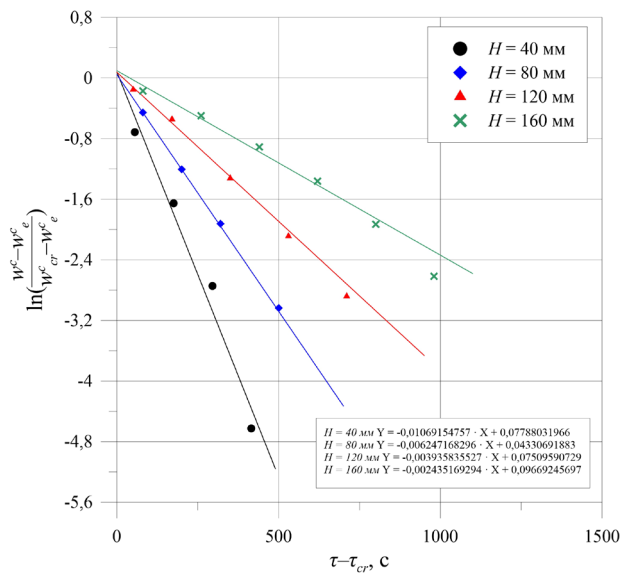


Рис. 4.69. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння жолудів за різної висоти шару матеріалу H

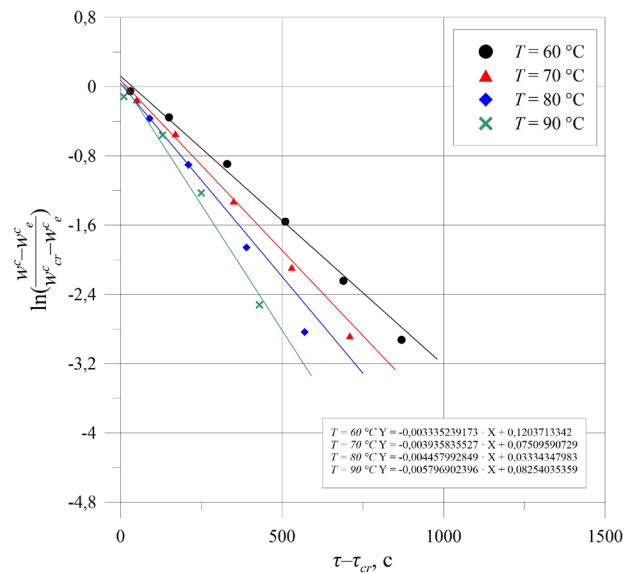


Рис. 4.70. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння жолудів за різної температури теплового агенту T

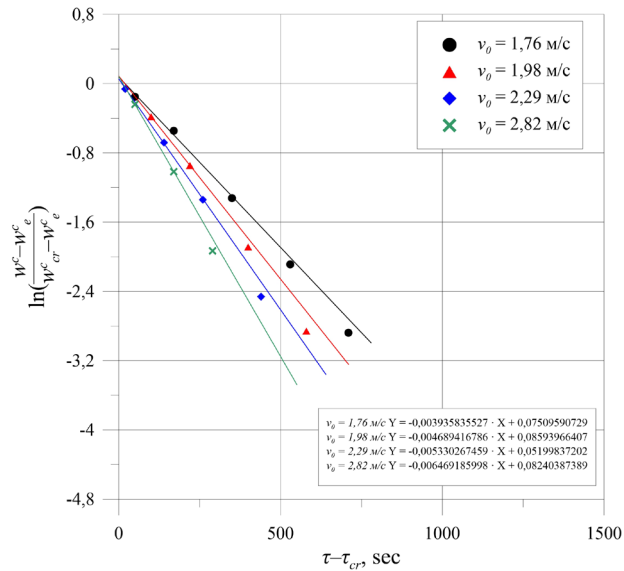


Рис. 4.71. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння жолудів за різної швидкості руху теплового агенту v_0

Результати графічного аналізу та розраховані, згідно рівняння (2.13), відповідні значення швидкостей сушіння N наведено у табл. 4.19.

Таблиця 4.19

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння жолудів

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с	
40	70	1,76	0,01069154757	0,002269383	
80			0,006247168296	0,001097293	
120			0,003935835527	0,000748941	
160			0,002435169294	0,000457216	
120	60		0,003335239173	0,000654241	
	80		0,004457992849	0,000823367	
	90		0,005796902396	0,000940250	
	70		1,98	0,004689416786	0,000839467
			2,29	0,005330267459	0,000967178
2,82			0,006469185998	0,001054168	

Аналіз графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.72) свідчить про те, що для жолудів дуба звичайного відносний коефіцієнт сушіння $\chi = 4,535$ кг сухого матеріалу / кг H_2O .

Отже, узагальнююче рівняння, що описує зміну вологовмісту яблучних вичавок під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-4,535 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.26)$$

Найбільше абсолютне значення відхилення теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних становить 19,77 %, середнє значення даного відхилення становить 4,94 %. Графічне зображення розподілу відхилень теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних зображено на рис. 4.73.

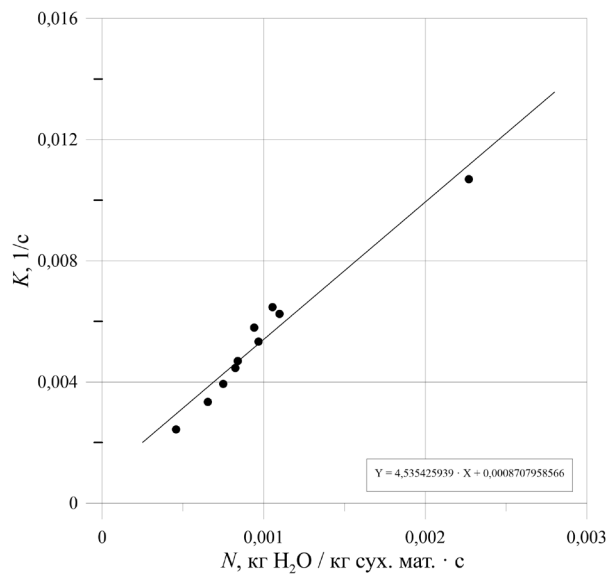


Рис. 4.72. Графічна залежність для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння жолудів

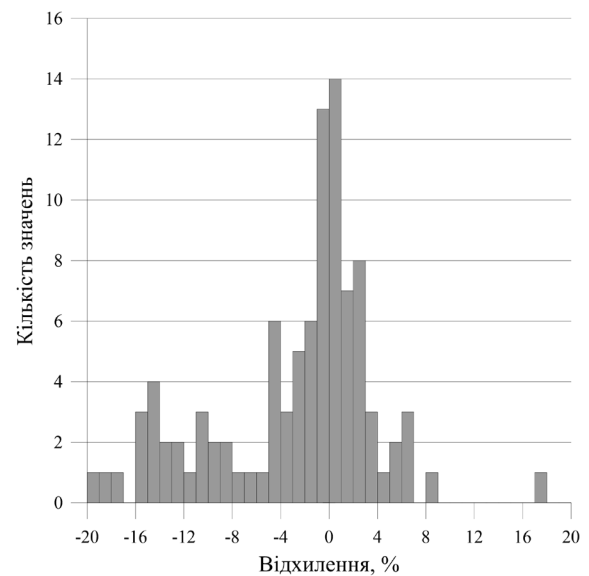


Рис. 4.73. Графічна залежність розподілу відносного відхилення експериментальних даних та теоретично розрахованих значень зміни вологовмісту жолудів під час фільтраційного сушіння

Залежності (4.21) та (4.22) дозволяють записати рівняння для визначення тривалості процесу у періоді повного τ_I та періоді часткового τ_{II} насичення теплового агенту вологою:

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{4,423 \cdot 10^{-5} \cdot T^{1,029} \cdot v_0^{0,766} \cdot e^{-13,941 \cdot H}} \quad (4.27)$$

$$\tau_{II} = \frac{4,535 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{4,535 \cdot N} \quad (4.28)$$

Каштани

За допомогою аналізу графічних залежностей у системі координат $\lg(w^c - w_e^c) = f(\tau)$ було визначено значення критичного вологовмісту каштанів гіркокаштану звичайного w_{cr}^c та часу їх досягнення за різних параметрів фільтраційного сушіння (рис. 4.74–4.76). Було встановлено значення рівноважного вологовмісту каштанів w_e^c : для 60 °С, 70 °С, 80 °С, 90 °С значення w_e^c становили 0,122, 0,103, 0,084, 0,065 кг Н₂О / кг сухого матеріалу відповідно (рис. 4.19–4.21).

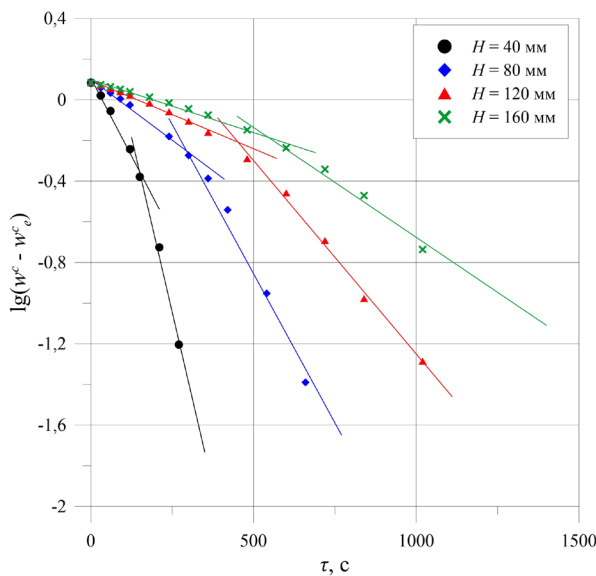


Рис. 4.74. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння каштанів за різної висоти шару матеріалу H

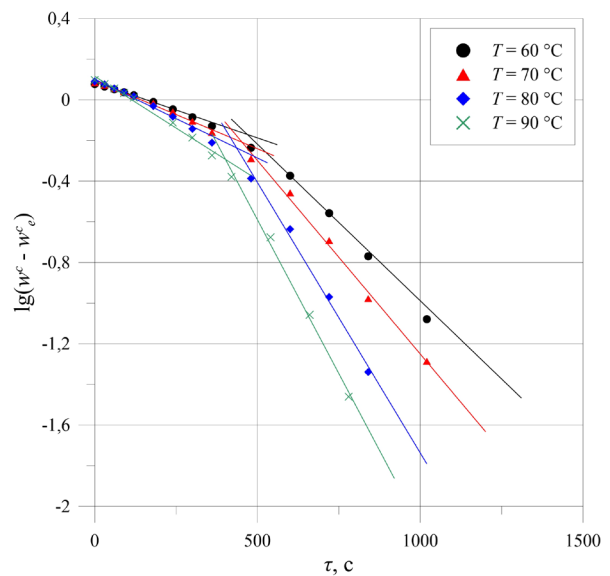


Рис. 4.75. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння каштанів за різної температури теплового агенту T

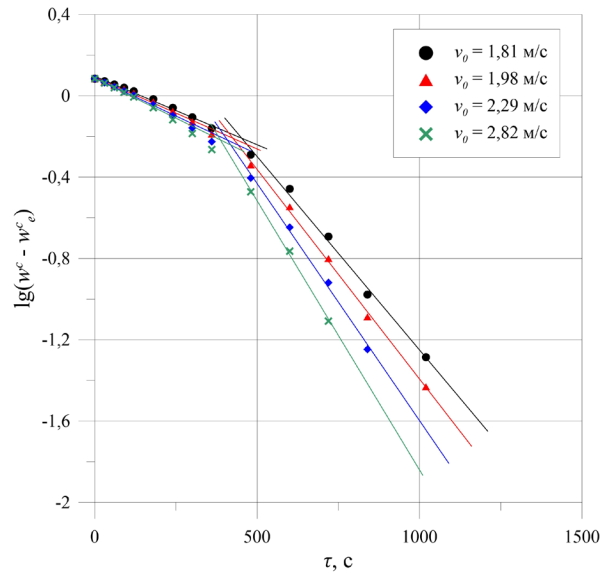


Рис. 4.76. Графічна залежність для визначення значень критичного вологовмісту w_{cr}^c та часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння каштанів за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Результати визначених за допомогою графоаналітичного методу значень критичного вологовмісту w_{cr}^c і часу його досягнення τ_{cr} для каштанів наведено у табл. 4.20.

Таблиця 4.20

Значення критичного вологовмісту w_{cr}^c та критичного часу τ_{cr} під час фільтраційного сушіння каштанів за різних параметрів процесу

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	$lg(w^c - w^e)$	w_{cr}^c , кг H ₂ O / кг сухого матеріалу	τ_{cr} , с	
40	70	1,81	-0,28	0,628	140	
80			-0,245	0,672	298	
120			-0,21	0,720	445	
160			-0,195	0,741	540	
120	60		-0,17	0,798	445	
	80		-0,24	0,659	420	
	90		-0,3	0,566	405	
	70		1,98	-0,212	0,717	425
			2,29	-0,215	0,713	405
			2,82	-0,222	0,703	390

Наступним кроком була побудова графічних залежностей у системі координат $\ln((1 - w^c/w^c_0)/\tau) = f(H)$ для значень вологовмісту каштанів у періоді повного насичення теплового агента вологою (рис. 4.77).

Результати графічного визначення кінетичних коефіцієнтів a та η наведено у табл. 4.21.

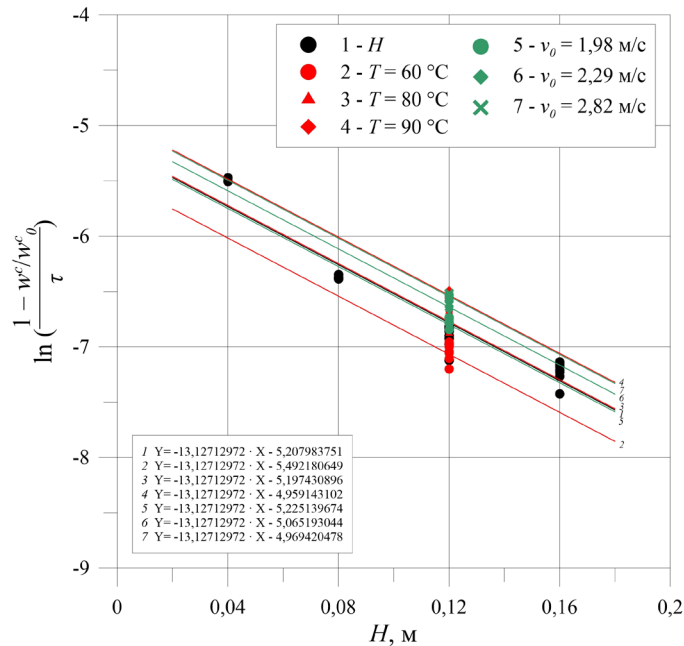


Рис. 4.77. Графічна залежність для визначення значень кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агента вологою під час фільтраційного сушіння каштанів

За даними табл. 4.21 (лінії 1, 4, 7) було складено систему рівнянь (4.2), з розв'язку якої одержуємо наступні значення:

$$A = 6,001 \cdot 10^{-5}, m = 0,987, n = 0,537$$

Визначивши коефіцієнти A , m та n , записуємо вираз на основі рівняння (2.8), що описує зміну вологовмісту каштанів під час фільтраційного сушіння у періоді повного насичення теплового агента вологою у межах $w^c_{cr} < w^c < w^c_0$:

$$w^c = w^c_0 \cdot (1 - 6,001 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,987} \cdot v_0^{0,537} \cdot \tau \cdot e^{-13,127 \cdot H}) \quad (4.29)$$

Для опису закономірностей процесу фільтраційного сушіння каштанів у періоді часткового насичення теплового агента вологою, було побудовано графічні залежності у системі координат $\ln((w^c - w^c_e)/(w^c_{cr} - w^c_e)) = f(\tau - \tau_{cr})$ (рис. 4.78–4.80) для подальшого визначення коефіцієнту сушіння K .

Таблиця 4.21

Значення кінетичних коефіцієнтів a та η у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння каштанів

№ лінії	H , мм	T , °C	v_0 , м/с	a , 1/м	$\ln(\eta)$	η , 1/с
1	40	70	1,81	13,127	-5,207983751	0,005472697
	80					
	120					
	160					
2	120	60	1,98	13,127	-5,492180649	0,004118853
3		80			-5,197430896	0,005530755
4		90			-4,959143102	0,007018940
5		70			2,29	-5,225139674
6	120	70	2,29	-5,065193044	0,006312692	
7			2,82	-4,969420478	0,006947173	

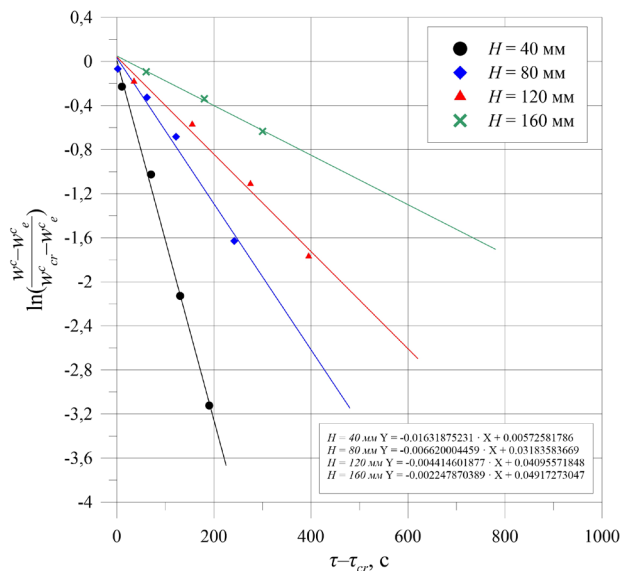


Рис. 4.78. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння каштанів за різної висоти шару матеріалу H

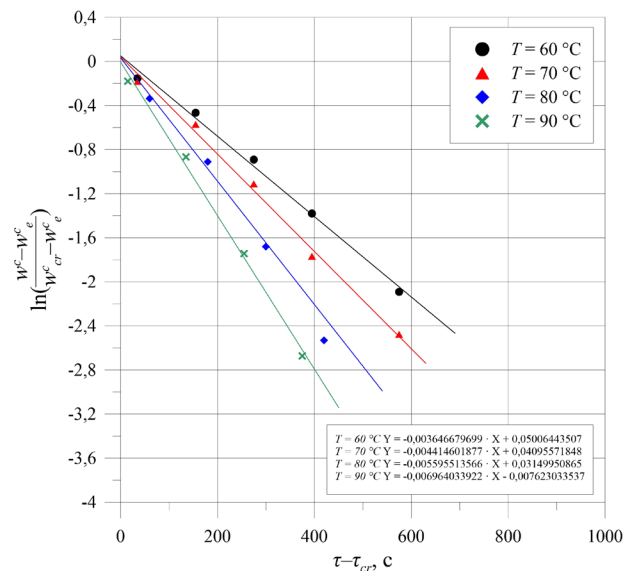


Рис. 4.79. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння каштанів за різної температури теплового агенту T

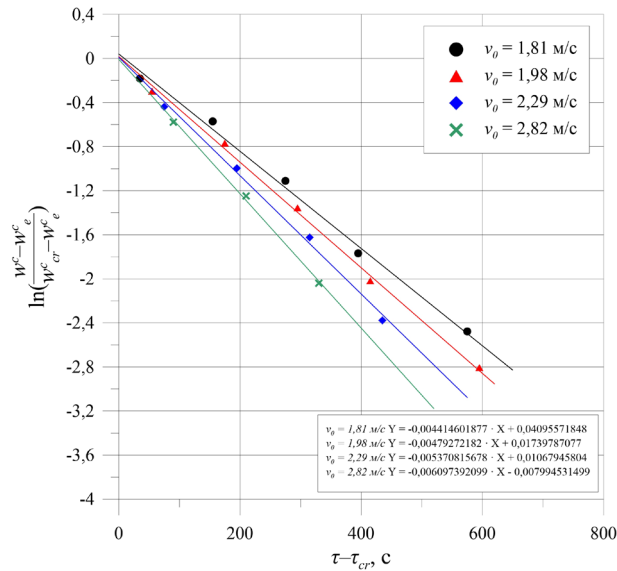


Рис. 4.80. Графічна залежність для визначення значень коефіцієнтів швидкості сушіння K під час фільтраційного сушіння каштанів за різної швидкості руху теплового агенту v_0

Результати графічного аналізу та розраховані, згідно рівняння (2.13), відповідні значення швидкостей сушіння N наведено у табл. 4.22.

Таблиця 4.22

Значення коефіцієнтів швидкості сушіння K і швидкостей сушіння N у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння каштанів

H , мм	T , °C	v_0 , м/с	K , 1/с	N , (кг H ₂ O / кг сух. мат.) · с
40	70	1,81	0,01631875231	0,004907143
80			0,006620004459	0,002157718
120			0,004414601877	0,001337079
160			0,002247870389	0,001062963
120	60		0,003646679699	0,001161798
	80		0,005595513566	0,001561905
	90		0,006964033922	0,001849383
	70		1,98	0,00479272182
2,29			0,005370815678	0,001486420
2,82			0,006097392099	0,001569231

Аналіз графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.81) свідчить про те, що для каштанів відносний коефіцієнт сушіння $\chi = 3,364$ кг сухого матеріалу / кг H_2O .

Узагальнююче рівняння, що описує зміну вологовмісту каштанів під час фільтраційного сушіння у періоді часткового насичення теплового агенту вологою у межах $w_e^c < w^c < w_{cr}^c$:

$$w^c = (w_{cr}^c - w_e^c) \cdot e^{-3,364 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{cr})} + w_e^c \quad (4.30)$$

Для оцінки коректності виведених математичних залежностей (4.29) та (4.30) було проаналізовано розподіл одержаних відхилень теоретично розрахованих значень від експериментально отриманих.

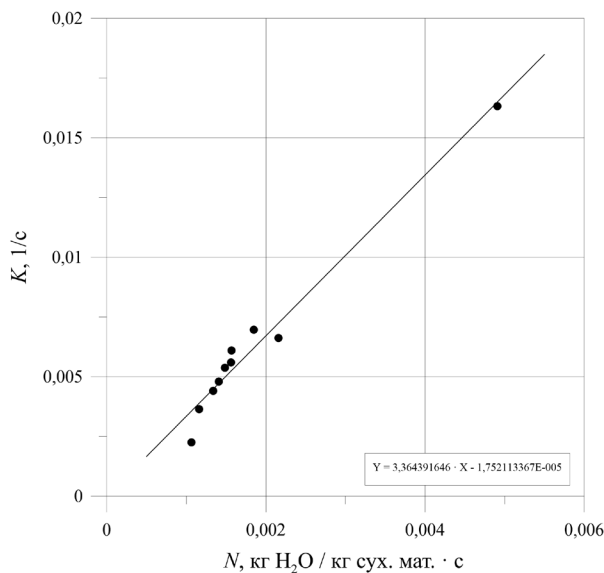


Рис. 4.81. Графічна залежність

для визначення значення відносного коефіцієнта сушіння χ у періоді часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння каштанів

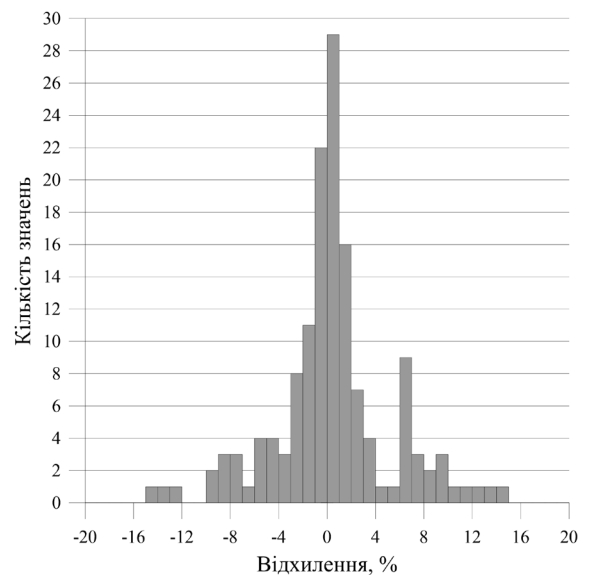


Рис. 4.82. Графічна залежність

розподілу відносного відхилення теоретично розрахованих значень від експериментальних даних та часткового насичення теплового агенту вологою під час фільтраційного сушіння каштанів

Найбільше абсолютне значення відхилення теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних становить 14,97 %, середнє значення даного відхилення становить 3,32 %. Графічне зображення розподілу відхилень

теоретично розрахованих значень відносно експериментальних даних зображено на рис. 4.82.

Залежності (4.29) та (4.30) дозволяють записати рівняння для визначення тривалості процесу у періоді повного τ_I та періоді часткового τ_{II} насичення теплового агенту вологою:

$$\tau_I = \frac{1 - \frac{w^c}{w_0^c}}{6,001 \cdot 10^{-5} \cdot T^{0,987} \cdot v_0^{0,537} \cdot e^{-13,127 \cdot H}} \quad (4.31)$$

$$\tau_{II} = \frac{3,364 \cdot (w_0^c - w_{cr}^c) - \ln\left(\frac{w^c - w_e^c}{w_{cr}^c - w_e^c}\right)}{3,364 \cdot N} \quad (4.32)$$

4.3. Дослідження динаміки фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Інтенсивність видалення вологи з матеріалу є одним з ключових факторів, що визначають енергоспоживання процесу сушіння та продуктивність сушильного обладнання. Метою дослідження динаміки фільтраційного сушіння є встановлення залежності між інтенсивністю сушіння матеріалу та зміною його вологовмісту для визначення основних закономірностей процесу.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Попередньо отримані експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди (рис. 4.1–4.3) зображаємо у вигляді залежностей зміни кількості випаруваної вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу (рис. 4.83–4.85).

Як свідчить рис. 4.83, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Дане твердження підтверджується паралельністю прямолінійних відрізків кривих інтенсивності сушіння (рис. 4.83).

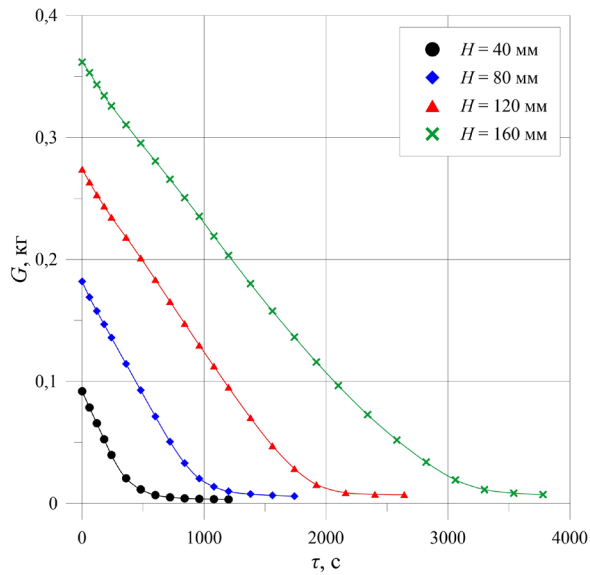


Рис. 4.83. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного
сушіння кукурудзяної післяспиртової
барди за різної висоти шару матеріалу
 H

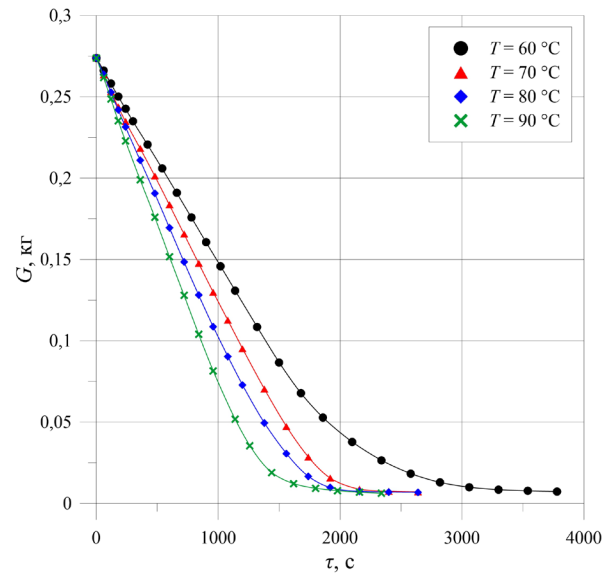


Рис. 4.84. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного
сушіння кукурудзяної післяспиртової
барди за різної температури теплового
агенту T

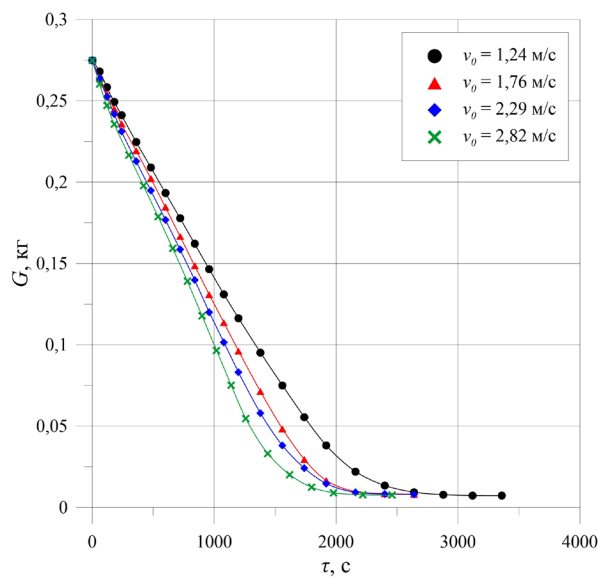


Рис. 4.85. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного сушіння
кукурудзяної післяспиртової барди за
різної швидкості руху потоку теплового
агенту v_0

Таким чином, можемо зробити висновок про однаковий сушильний потенціал теплового агенту під час фільтраційного сушіння, який характеризує швидкість видалення води з досліджуваного матеріалу, для різних висот

вологого матеріалу, що підтверджує існуючі уявлення про механізм процесу [146].

Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди пропорційно зростає із збільшенням температури теплового агенту (рис. 4.84) та підвищенням швидкості руху теплового агенту (рис. 4.85). З огляду на рис. 4.83–4.85 можна зробити висновок, що сушильний потенціал теплового агенту для фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди можливо збільшити за рахунок підвищення температури або швидкості теплового агенту.

Графіки залежності швидкості фільтраційного сушіння від зміни вологовмісту матеріалу є цінним інструментом для оцінки характеру зв'язку вологи з матеріалом та прогнозування енергетичних витрат. Дані залежності для фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди наведені на рис. 4.86–4.88.

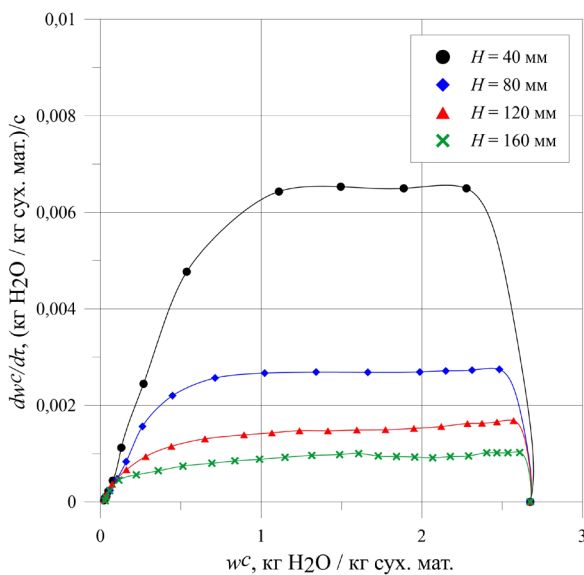


Рис. 4.86. Швидкість

фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної висоти шару матеріалу H

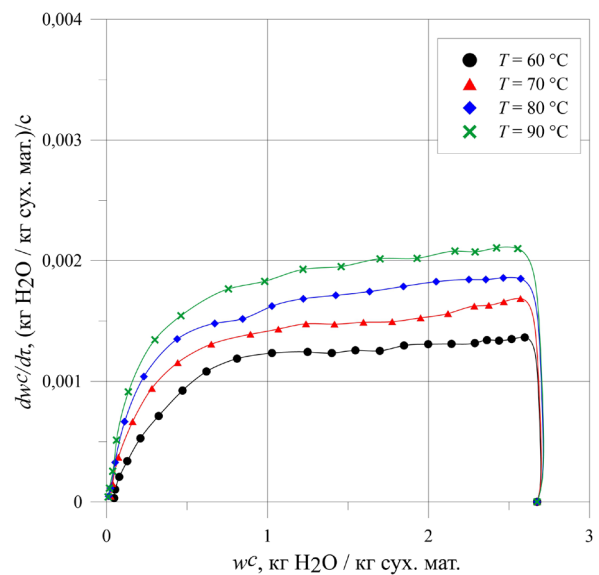


Рис. 4.87. Швидкість

фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної температури теплового агенту T

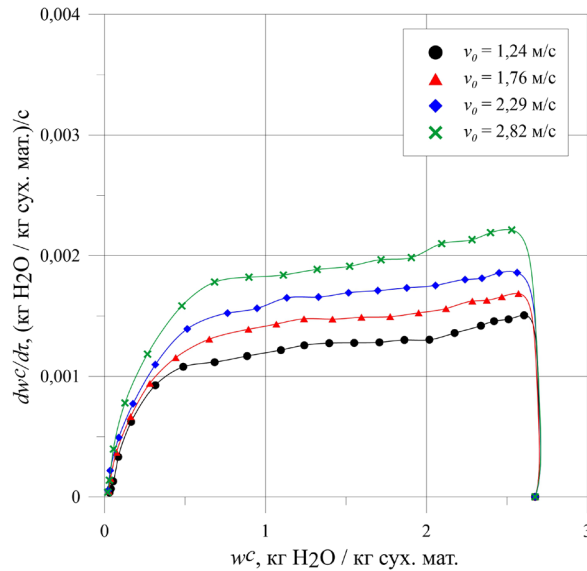


Рис. 4.88. Швидкість фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Аналіз рис. 4.86–4.88 показує, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агента, та збільшенням швидкості руху теплового агента.

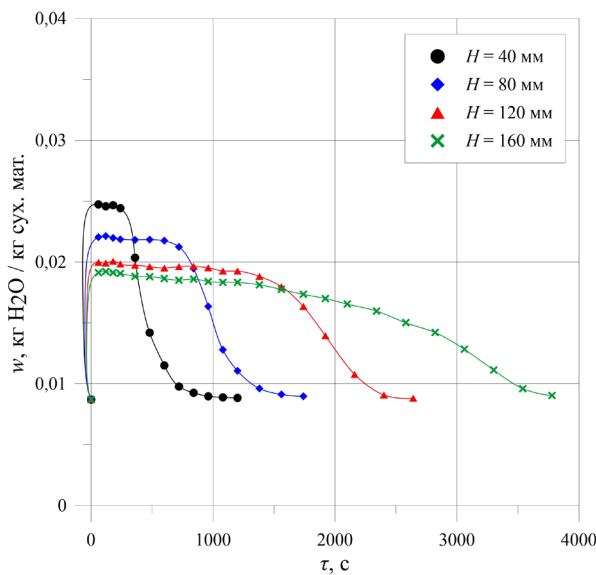


Рис. 4.89. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної висоти шару матеріалу H

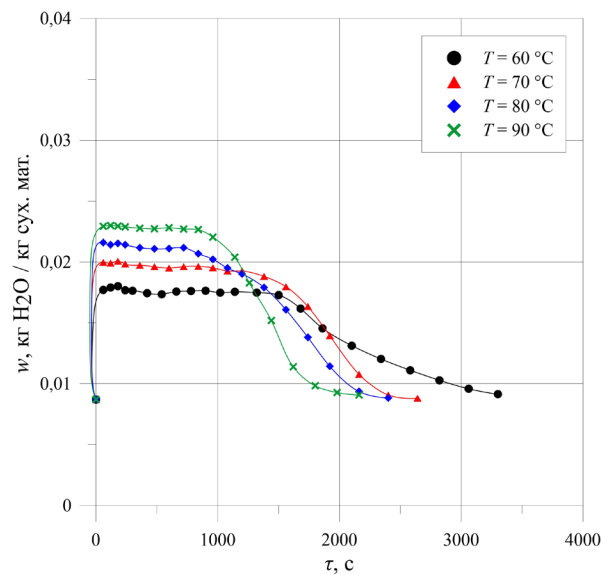


Рис. 4.90. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної температури теплового агента T

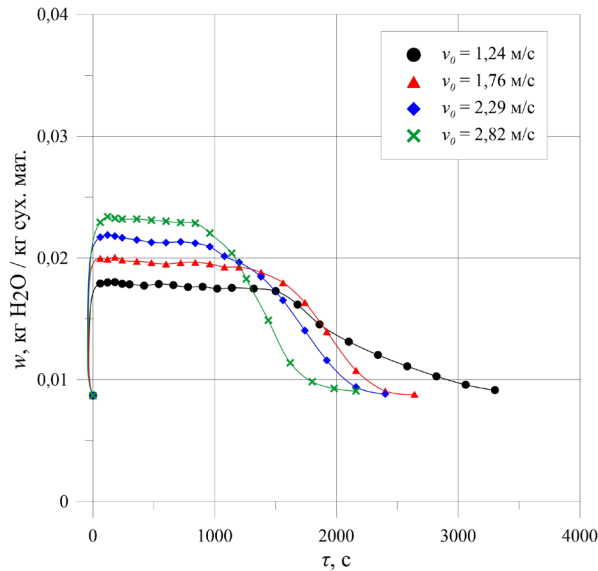


Рис. 4.91. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Із збільшенням температури зростає сушильний потенціал теплового агента (рис. 4.87), а вплив швидкості руху теплового агента пояснюється збільшенням його об'ємної витрати та, відповідно, кількості вологи, що видаляється з шару за одиницю часу, а також збільшенням коефіцієнтів тепло-масовіддачі (рис. 4.88).

Для підтвердження одержаних висновків було побудовано залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу на основі отриманих результатів (рис. 4.89–4.91), аналіз яких свідчить про те, що насичення теплового агента вологою з часом зменшується. Цей факт вказує на наявність двох періодів сушіння: повного та часткового насичення теплового агента вологою. Перехід між періодами сушіння можна чітко прослідкувати на графічних залежностях рис. 4.89–4.91.

Ячмінна пивна дробина

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини (рис. 4.4–4.6) подаємо як залежності зміни кількості випаруваної вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу – висоти вологого матеріалу H ,

температури теплового агента T , швидкості руху теплового агента v_0 (рис. 4.92–4.94).

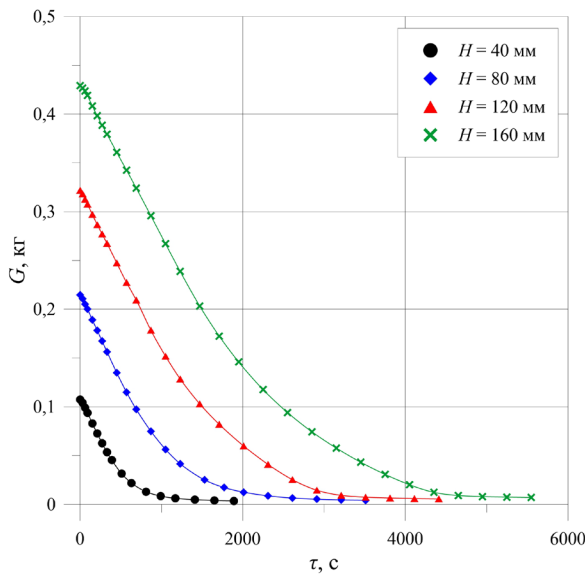


Рис. 4.92. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного
сушіння ячмінної пивної дробини за
різної висоти шару матеріалу H

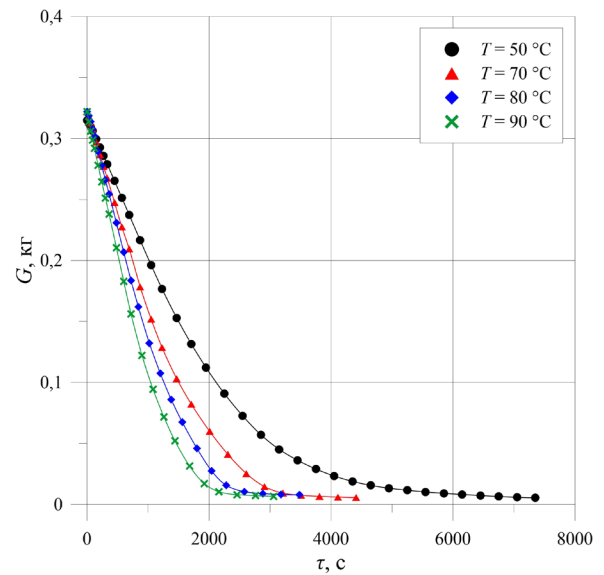


Рис. 4.93. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного
сушіння ячмінної пивної дробини за
різної температури теплового агента T

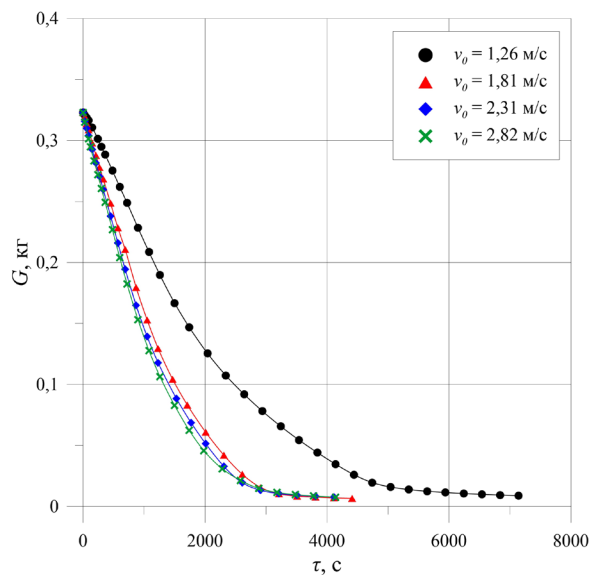


Рис. 4.94. Динаміка видалення
вологи під час фільтраційного
сушіння ячмінної пивної дробини за
різної швидкості руху потоку
теплового агента v_0

Аналіз рис. 4.92–4.94 підтверджує попередні висновки, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи (рис. 4.92), а також, що швидкість видалення вологи збільшується із ростом температури теплового агента (рис. 4.93).

Щодо інтенсивності видалення вологи – спостерігаємо наявність критичних значень швидкостей руху теплового агента (рис. 4.94), коли збільшення швидкості руху не інтенсифікує процес сушіння значною мірою. Це пов'язано із внутрішньодифузійним перенесенням вологи всередині структури матеріалу, яке лімітує швидкість сушіння.

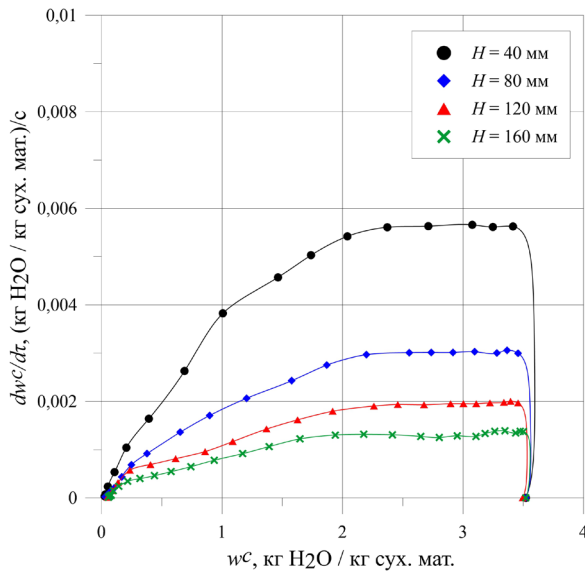


Рис. 4.95. Швидкість фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної висоти шару матеріалу H

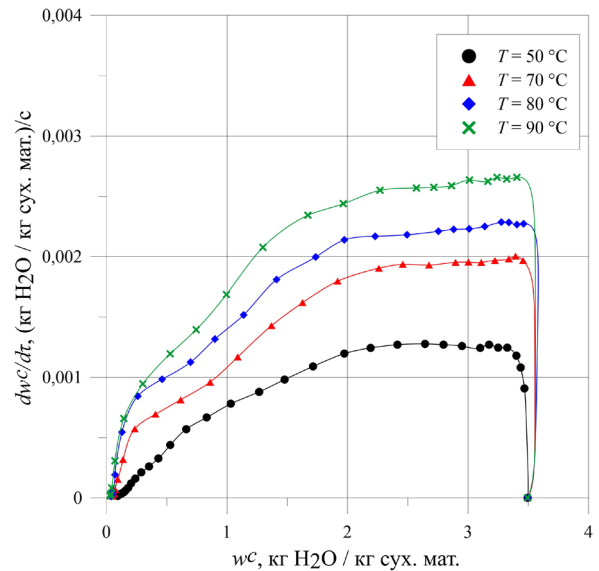


Рис. 4.96. Швидкість фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної температури теплового агента T

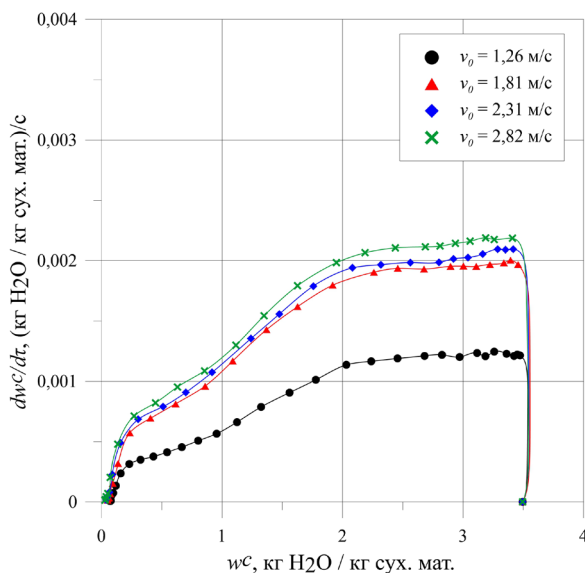


Рис. 4.97. Швидкість фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Графічні залежності швидкості сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини наведені на рис. 4.95–4.97, які підтверджують висновки про те, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури та збільшенням швидкості руху теплового агента.

Графічні залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу (рис. 4.98–4.100) свідчать про те, що насичення теплового агента воло-

гою з часом зменшується та вказує на наявність двох періодів сушіння.

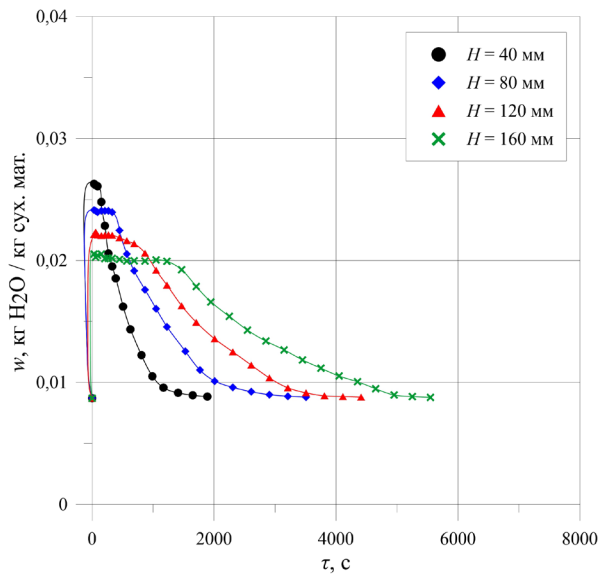


Рис. 4.98. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної висоти шару матеріалу H

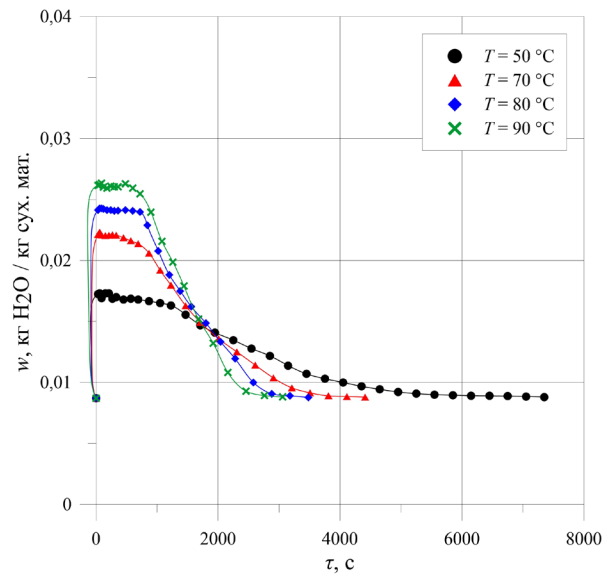


Рис. 4.99. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної температури теплового агенту T

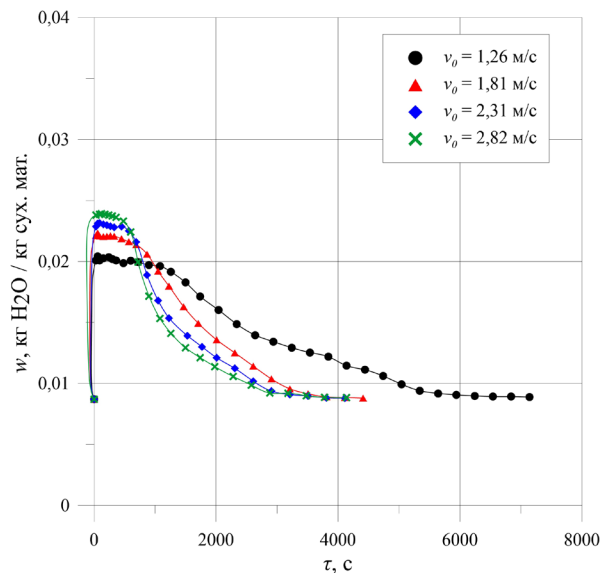


Рис. 4.100. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Відходи виробництва кави

Попередньо отримані експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння відходів виробництва кави (рис. 4.7–4.9) зображаємо у вигляді залежностей зміни кількості випаруваної вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу – змінних H , T , v_0 (рис. 4.101–4.103).

Криві на рис. 4.101, зважаючи на паралельність їх прямолінійних відрізків, підтверджують одержані раніше висновки про те, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави зростає із збільшенням температури та, відповідно, сушильного потенціалу теплового агенту (рис. 4.102). Також ріст динаміки сушіння спостерігаємо із підвищенням швидкості руху теплового агенту (рис. 4.103), проте, як і у випадку ячмінної пивної дробини, бачимо критичне значення v_0 , після досягнення якого вплив даного фактору не є значним – очевидно, зважаючи на лімітуючу складову внутрішньо дифузійного перенесення вологи у досліджуваному матеріалі.

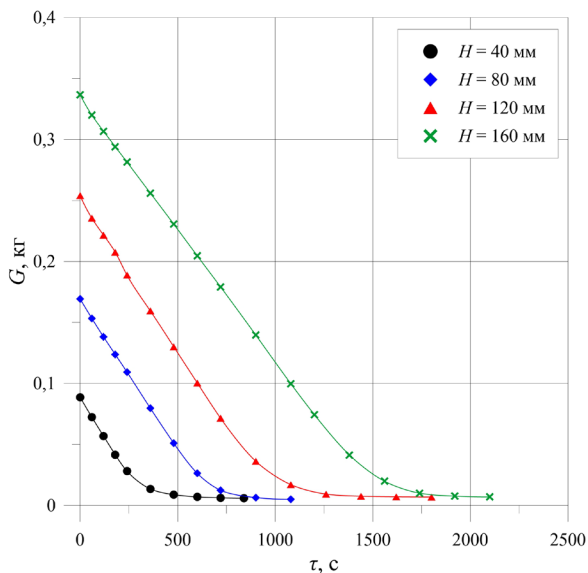


Рис. 4.101. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної висоти шару матеріалу H

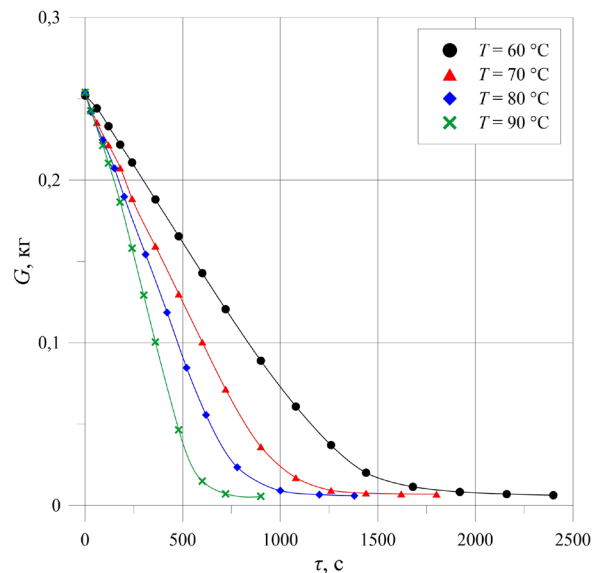


Рис. 4.102. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної температури теплового агенту T

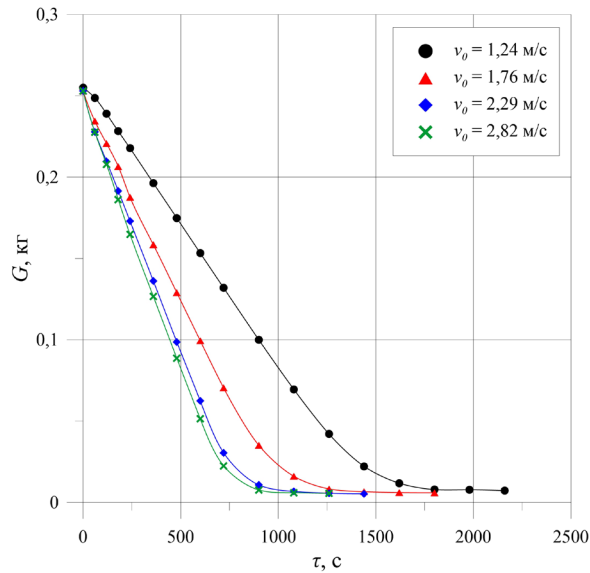


Рис. 4.103. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності швидкості сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави наведені на рис. 4.104–4.106.

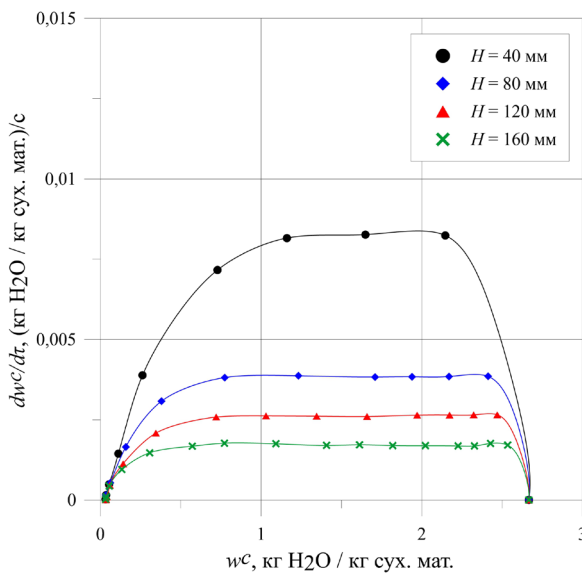


Рис. 4.104. Швидкість

фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної висоти шару матеріалу H

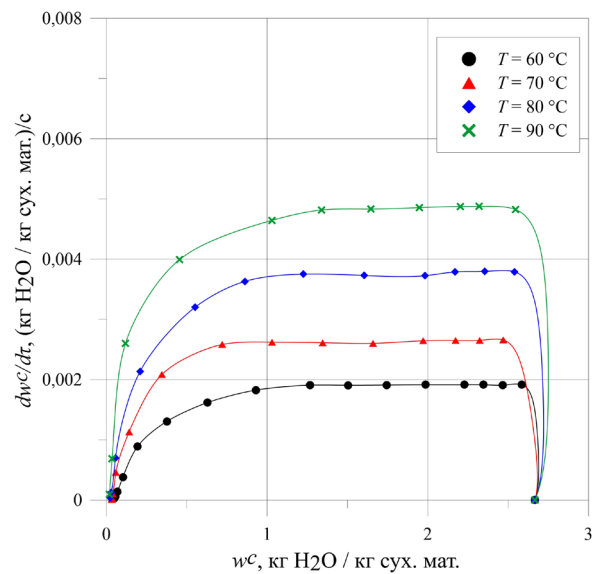


Рис. 4.105. Швидкість

фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної температури теплового агенту T

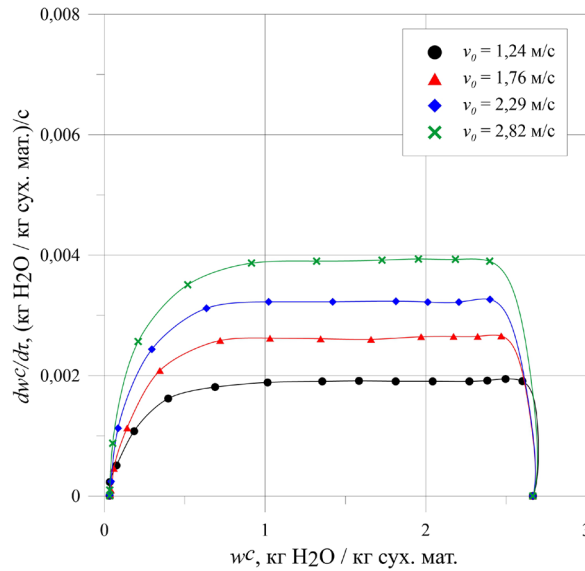


Рис. 4.106. Швидкість фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності на рис. 4.104–4.106 підтверджують висновки про те, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту та збільшенням швидкості його руху теплового агенту.

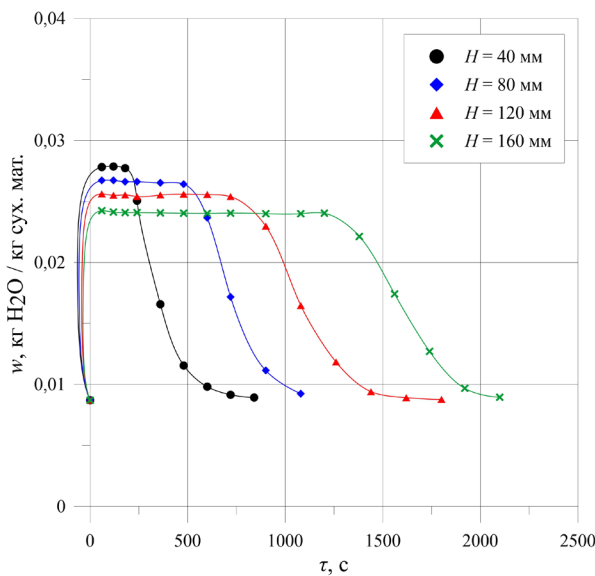


Рис. 4.107. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної висоти шару матеріалу H

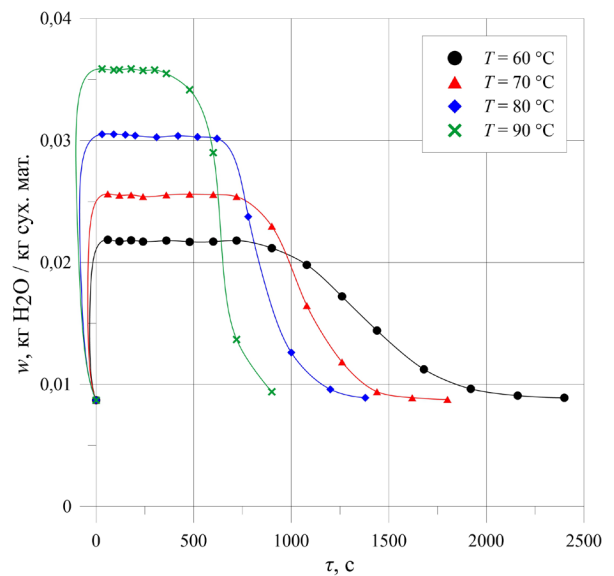


Рис. 4.108. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної температури теплового агенту T

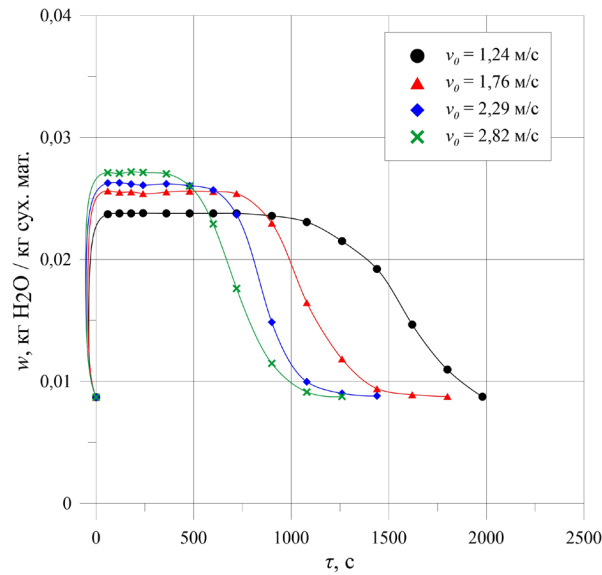


Рис. 4.109. Залежність зміни вологовмісту теплого агента від часу під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різної швидкості руху потоку теплого агента v_0

Графічні залежності зміни вологовмісту теплого агента від часу під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави (рис. 4.107–4.109), як і у попередньо розглянутих випадках, вказують на те, що насичення теплого агента вологою з часом зменшується та наявність двох періодів сушіння.

Буряковий жом

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння бурякового жому (рис. 4.10–4.12) представляємо як залежності зміни кількості випаруваної вологи G у часі (рис. 4.110–4.112).

Одержані криві на рис. 4.110 підтверджують попередні висновки про відсутність впливу висоти шару вологого матеріалу на інтенсивність видалення вологи. Аналіз рис. 4.111 підтверджує висновки, що швидкість видалення вологи збільшується із ростом температури теплого агента, проте бачимо, що вплив не так яскраво виражений як для попередньо досліджених матеріалів. Те ж стосується і впливу швидкості руху теплого агента (рис. 4.112). Очевидно, це пов'язано із особливостями видалення вологи із структури бурякового жому.

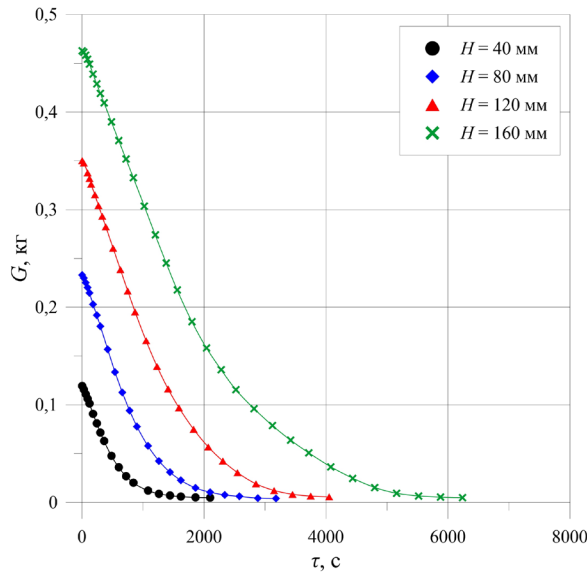


Рис. 4.110. Динаміка

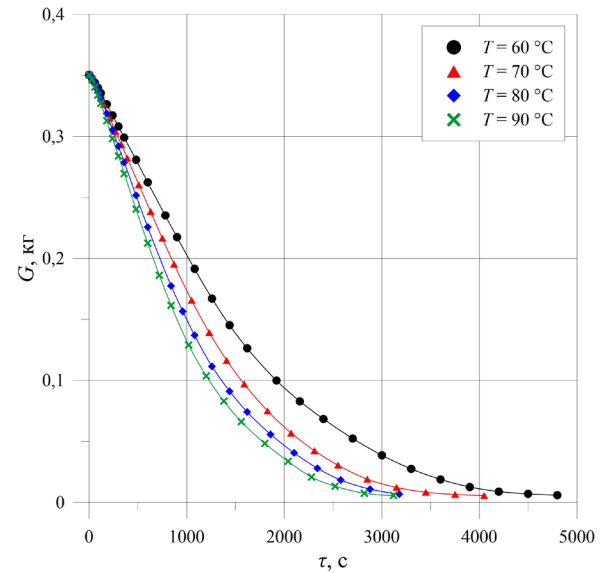


Рис. 4.111. Динаміка

видалення вологи під час видалення вологи під час
 фільтраційного сушіння бурякового фільтраційного сушіння бурякового
 жому за різної висоти шару матеріалу жому за різної температури теплового
 H агенту T

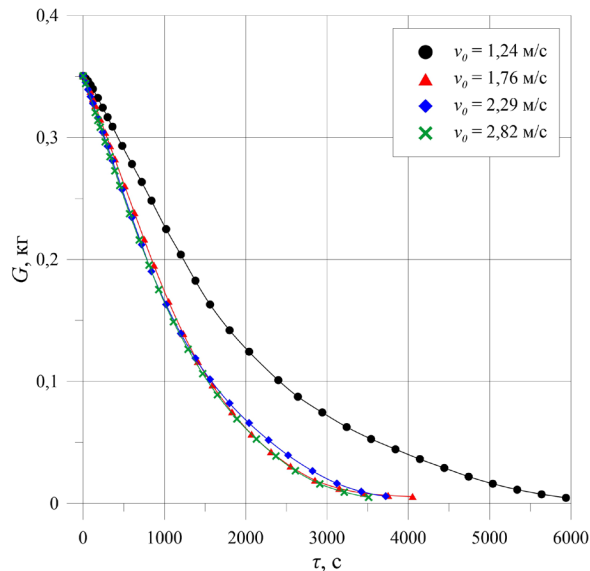


Рис. 4.112. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності швидкості сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння бурякового жому, що наведені на рис. 4.113–4.115, підтверджують попередні висновки про те, щодо впливу параметрів фільтраційного сушіння на швидкість процесу.

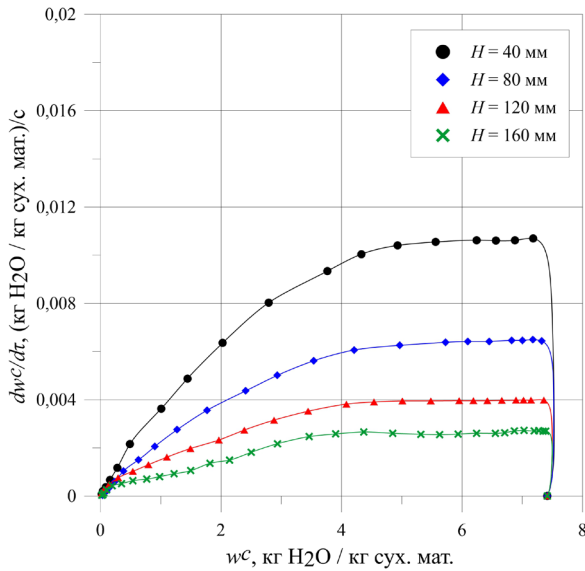


Рис. 4.113. Швидкість

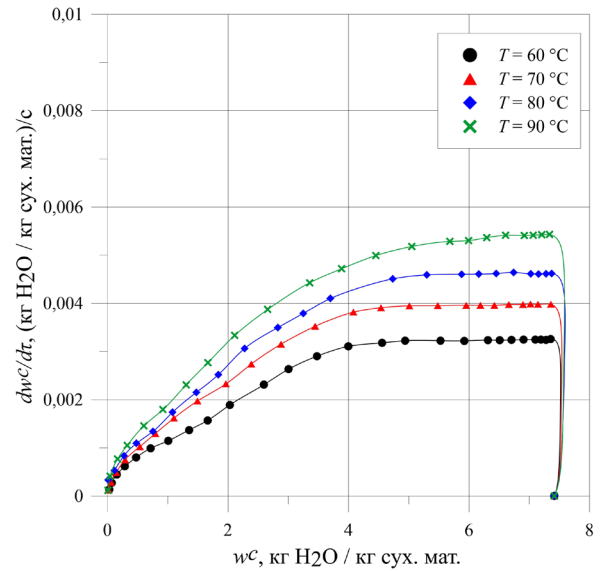


Рис. 4.114. Швидкість

фільтраційного сушіння бурякового
жому за різної висоти шару матеріалу
 H

фільтраційного сушіння бурякового
жому за різної температури теплового
агенту T

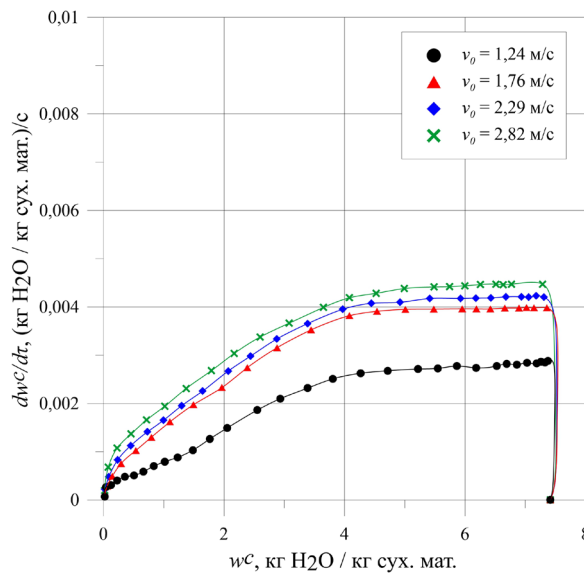


Рис. 4.115. Швидкість фільтраційного сушіння бурякового жому за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Графічні залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння бурякового жому (рис. 4.116–4.118) свідчать про зменшення насичення теплового агента вологою з часом та на наявність двох періодів сушіння.

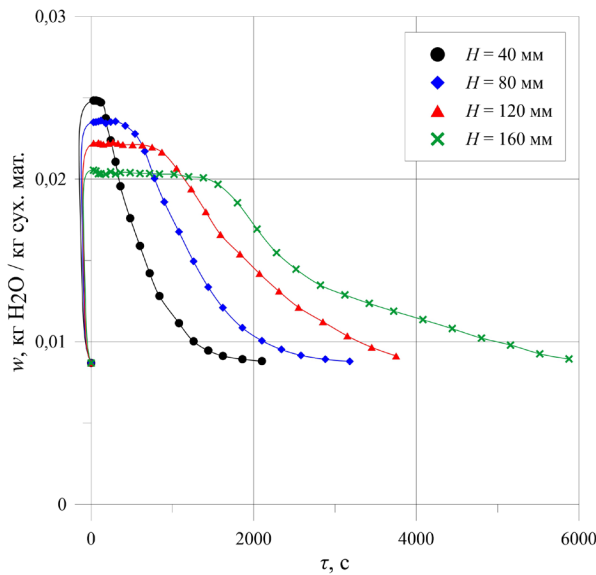


Рис. 4.116. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної висоти шару матеріалу H

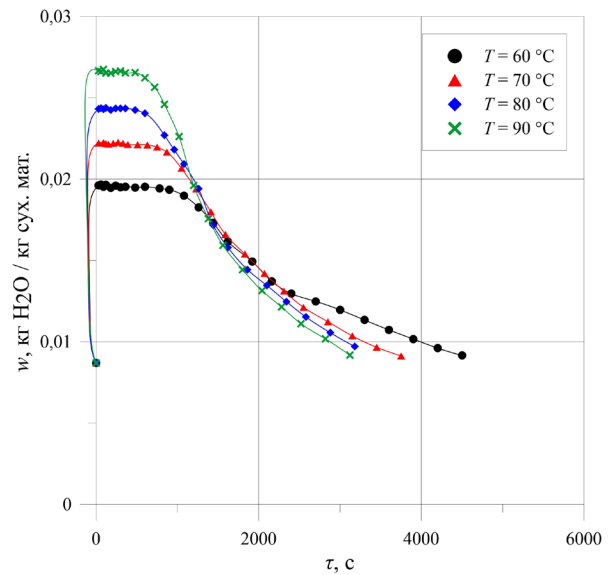


Рис. 4.117. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної температури теплового агенту T

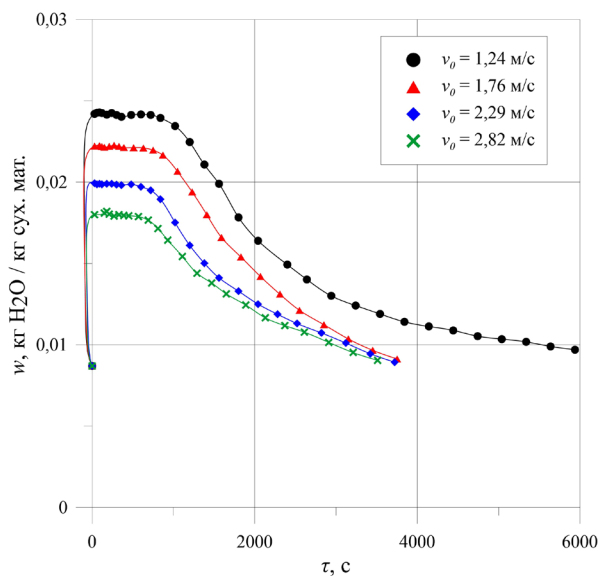


Рис. 4.118. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння бурякового жому за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Водночас, спостерігаємо нетипову картину для попередніх досліджених матеріалів зміни вологовмісту теплового агенту за різної v_0 , що, вочевидь

пов'язано із особливостями видалення вологи із структури бурякового жому (рис. 4.118).

Яблучні вичавки

Попередньо отримані експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння яблучних вичавок (рис. 4.13–4.15) подаємо у вигляді залежностей зміни кількості випаруваної вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу – змінних H , T , v_0 (рис. 4.119–4.120).

Одержані залежності на рис. 4.119 підтверджують висновки про відсутність впливу висоти шару вологого матеріалу на інтенсивність видалення вологи. Також, як і у випадку бурякового жому, вплив температури теплового агенту не так яскраво виражений як для попередньо досліджених матеріалів (рис. 4.120). Аналіз залежностей для впливу швидкості руху теплового агенту (рис. 4.121) вказує на наявність критичного значення v_0 , після якого збільшення швидкості руху теплового агенту не впливає значно на інтенсивність сушіння.

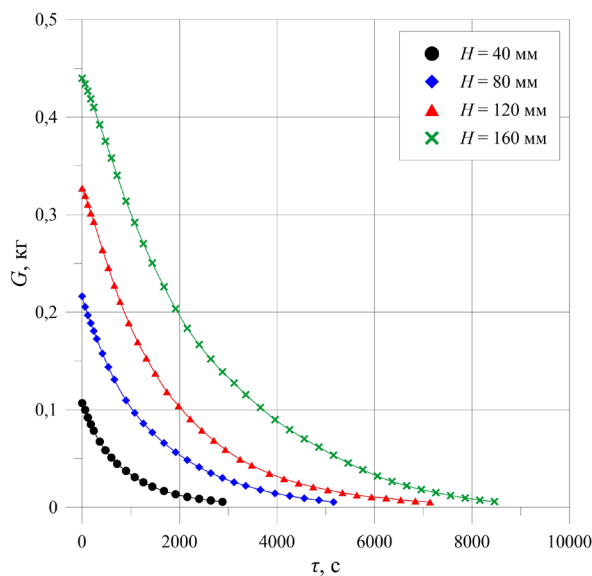


Рис. 4.119. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару матеріалу H

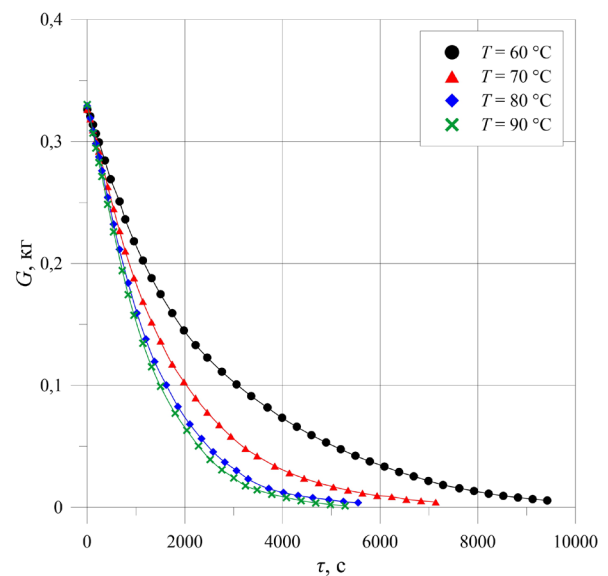


Рис. 4.120. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної температури теплового агенту T

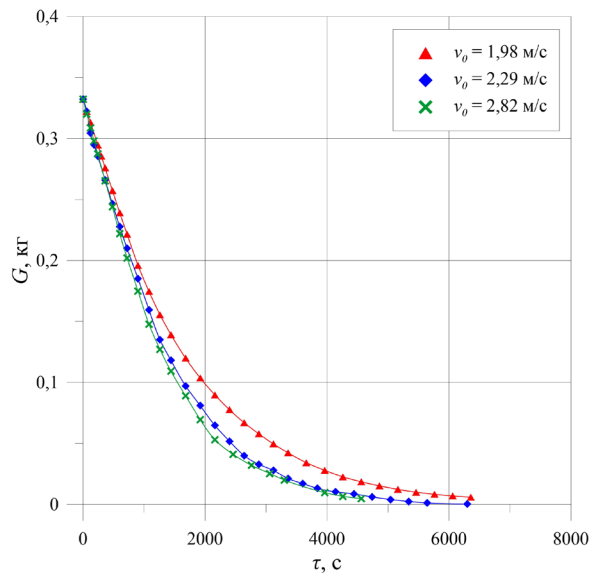


Рис. 4.121. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Графічні залежності швидкості сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок, що наведені на рис. 4.122–4.124, підтверджують попередні висновки про те, щодо впливу параметрів фільтраційного сушіння на швидкість процесу.

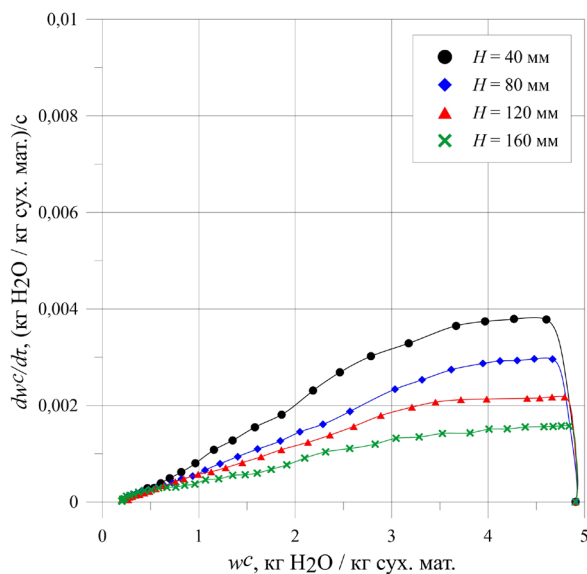


Рис. 4.122. Швидкість

фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару матеріалу H

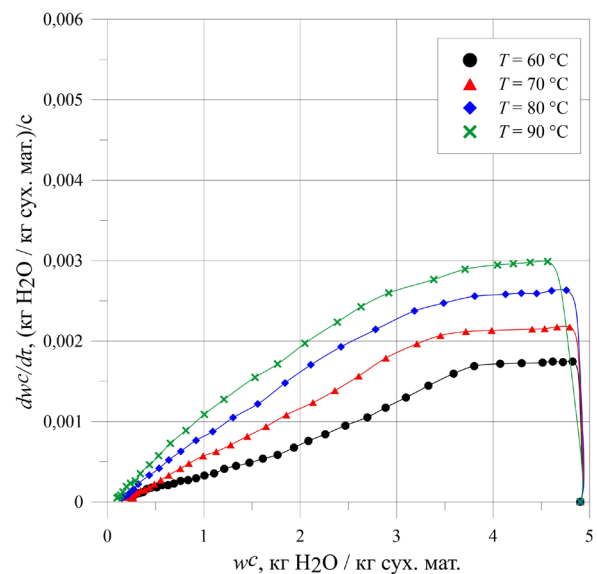


Рис. 4.123. Швидкість

фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної температури теплового агента T

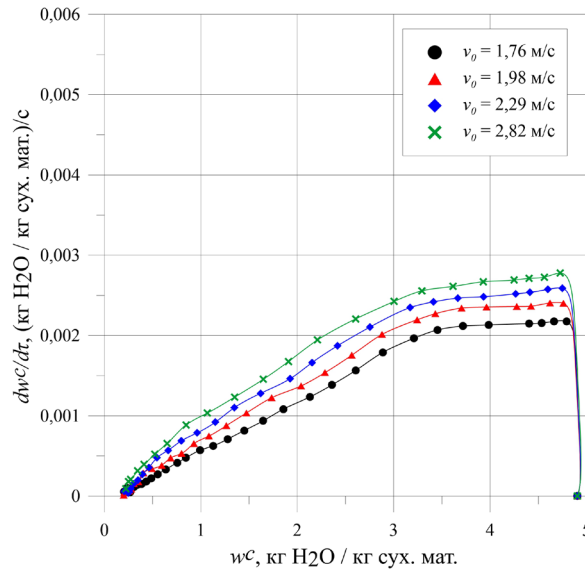


Рис. 4.124. Швидкість фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності зміни вологовмісту теплового агенту від часу (рис. 4.98–4.100) свідчить про те, що насичення теплового агенту вологою з часом зменшується та вказує на наявність двох періодів сушіння.

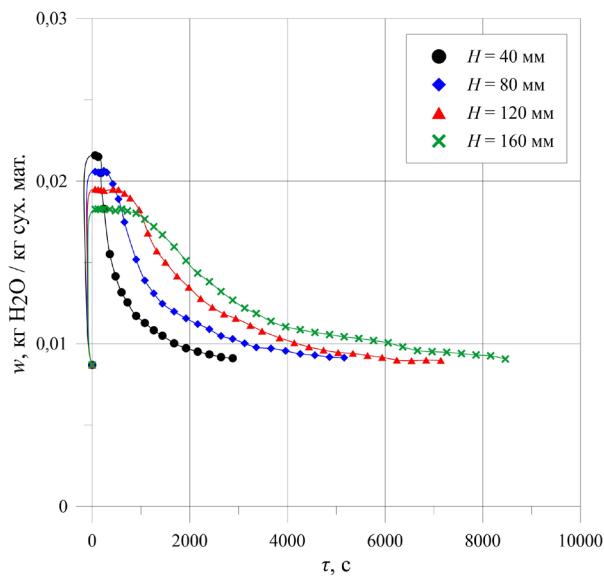


Рис. 4.125. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної висоти шару матеріалу H

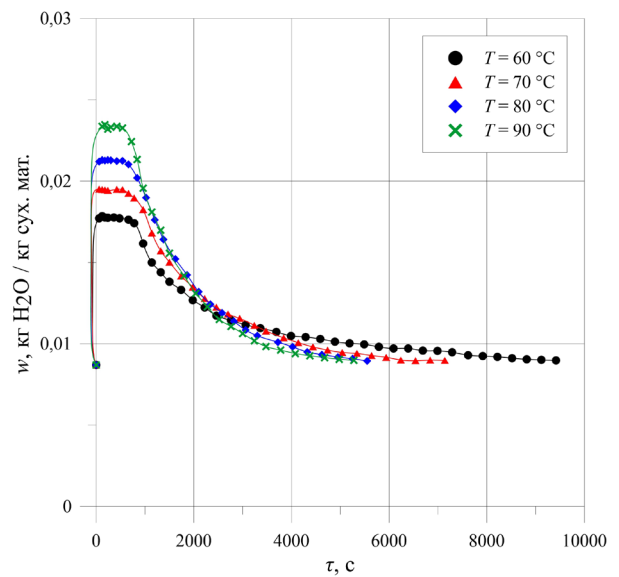


Рис. 4.126. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної температури теплового агенту T

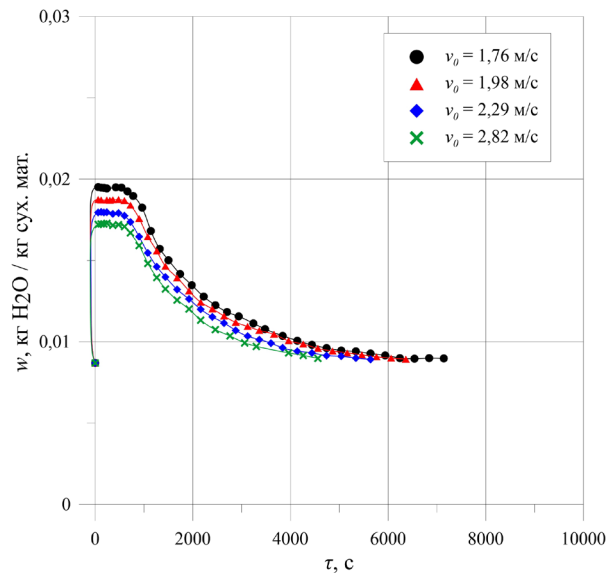


Рис. 4.127. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Як і у випадку бурякового жому, спостерігаємо нетипову картину для попередніх досліджених матеріалів зміни вологовмісту теплового агента за різної v_0 (рис. 4.127).

Жолуді

Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння жолудів дубу звичайного (рис. 4.16–4.18) подаємо як залежності зміни кількості випаруваної вологи G у часі для досліджуваних параметрів процесу (рис. 4.128–4.130).

Аналіз графічних залежностей на рис. 4.128 підтверджує попередні висновки про те, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи.

Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння жолудів зростає із збільшенням температури теплового агента та його сушильного потенціалу (рис. 4.129). Аналогічно бачимо чіткий позитивний вплив підвищення швидкості руху теплового агента (рис. 4.130) на інтенсивність процесу фільтраційного сушіння даного матеріалу.

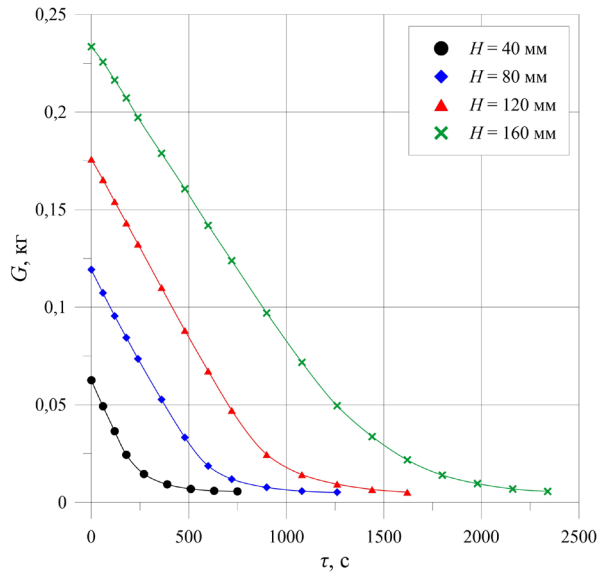


Рис. 4.128. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння жолудів за різної висоти шару матеріалу H

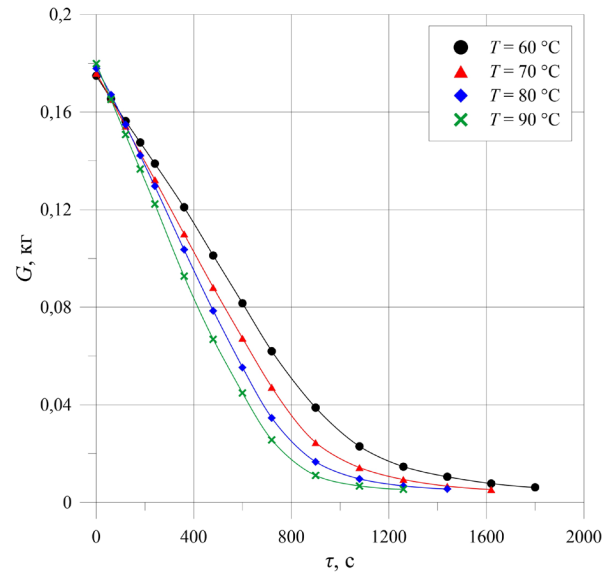


Рис. 4.129. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння жолудів за різної температури теплового агенту T

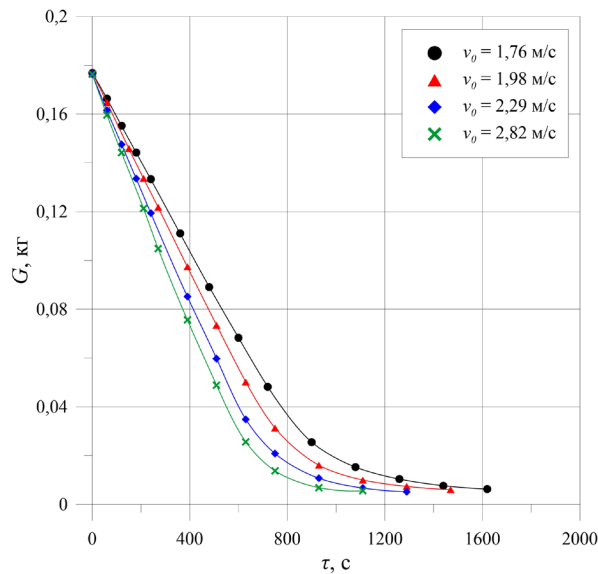


Рис. 4.130. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння жолудів за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності швидкості сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння жолудів наведені на рис. 4.131–4.133.

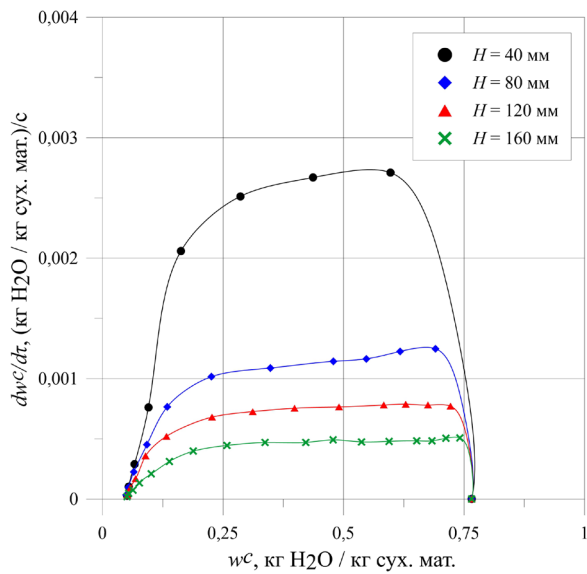


Рис. 4.131. Швидкість

фільтраційного сушіння жолудів за різної висоти шару матеріалу H

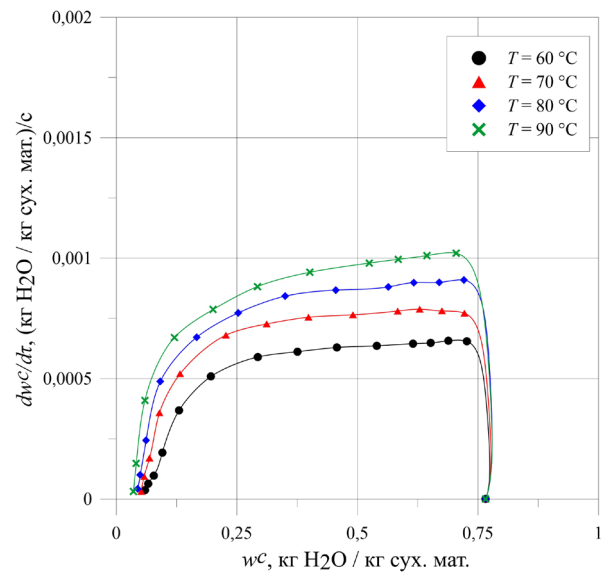


Рис. 4.132. Швидкість

фільтраційного сушіння жолудів за різної температури теплового агенту T

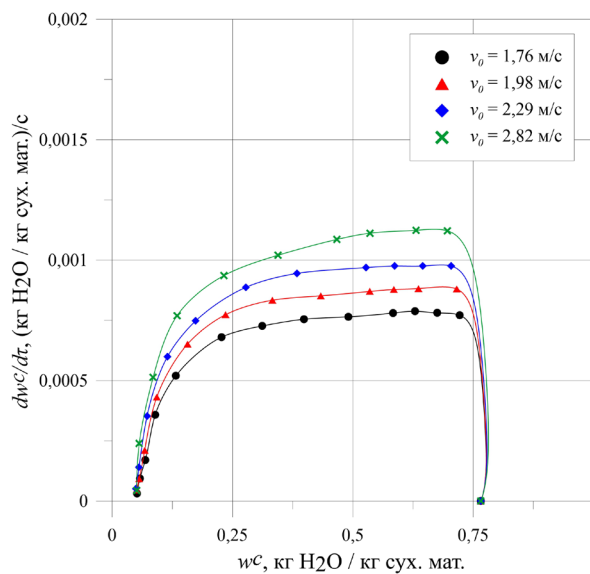


Рис. 4.133. Швидкість фільтраційного сушіння жолудів за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності на рис. 4.131–4.133, як і для попередньо розглянутих досліджених матеріалів, теж підтверджують висновки про те, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту та збільшенням його швидкості.

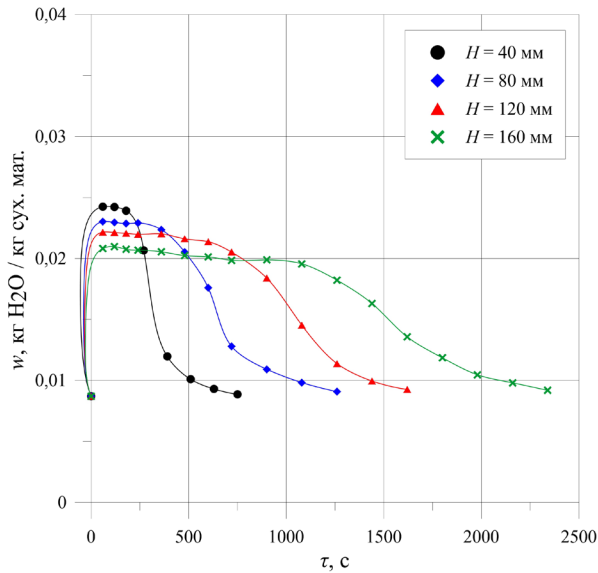


Рис. 4.134. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння жолудів за різної висоти шару матеріалу H

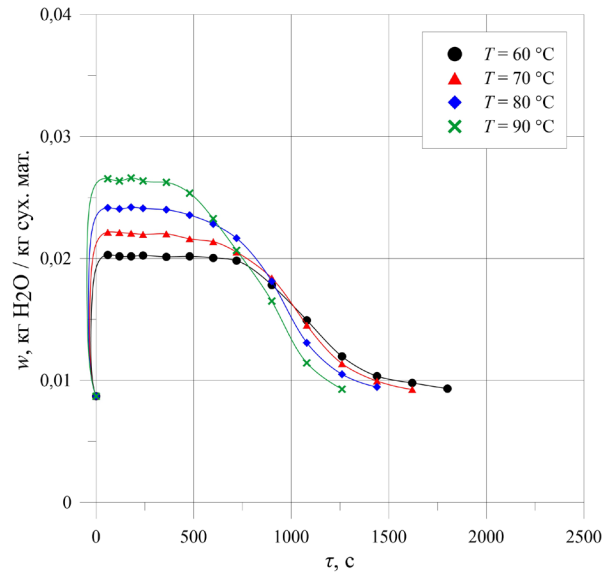


Рис. 4.135. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння жолудів за різної температури теплового агента T

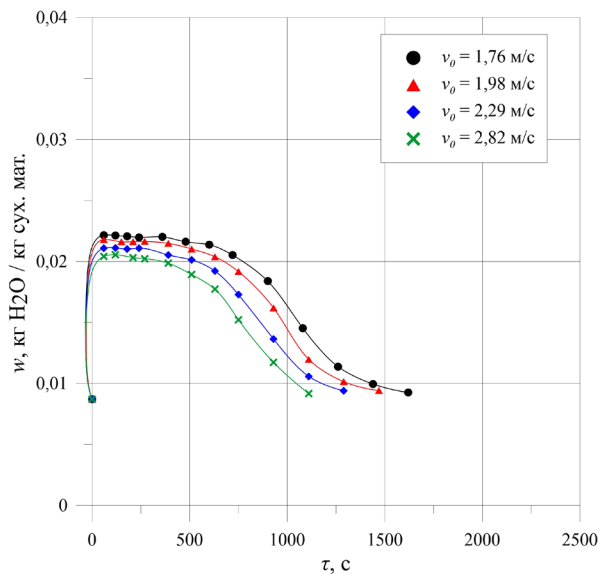


Рис. 4.136. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння жолудів за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Графічні залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння жолудів (рис. 4.134–4.136), вказують на те, що

насичення теплового агенту вологою з часом зменшується та наявність двох періодів сушіння.

Каштани

Попередньо отримані експериментальні результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння каштанів гіркокаштану звичайного (рис. 4.19–4.21) зображаємо у вигляді залежностей зміни кількості випаруваної води G у часі для досліджуваних параметрів процесу (рис. 4.137–4.139).

Одержані криві на рис. 4.137 підтверджують попередні висновки про відсутність впливу висоти шару вологого матеріалу на інтенсивність видалення води. Динаміка видалення води під час фільтраційного сушіння відходів виробництва кави зростає із збільшенням температури теплового агенту (рис. 4.138).

Аналіз рис. 4.139 підтверджує висновки, що швидкість видалення води збільшується із ростом швидкості руху теплового агенту, проте бачимо, що вплив v_0 не так яскраво виражений, що, очевидно, це пов'язано із особливостями видалення води із структури даного матеріалу.

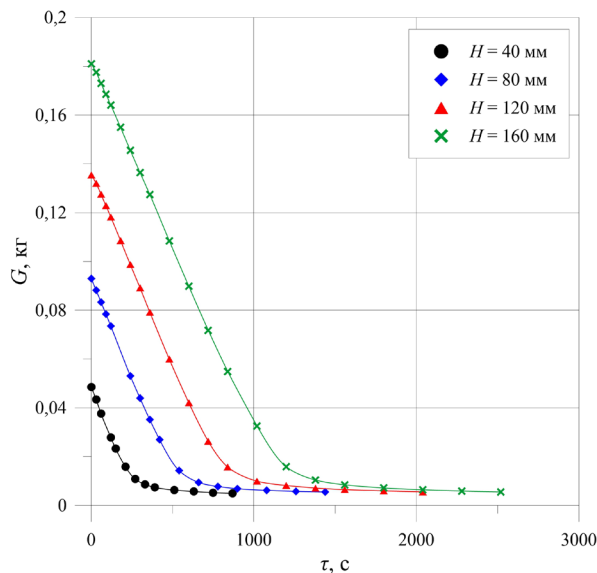


Рис. 4.137. Динаміка видалення води під час фільтраційного сушіння каштанів за різної висоти шару матеріалу H

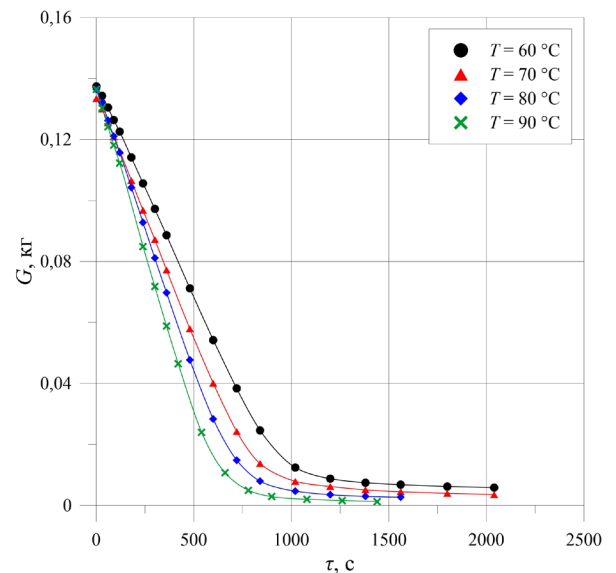


Рис. 4.138. Динаміка видалення води під час фільтраційного сушіння каштанів за різної температури теплового агенту T

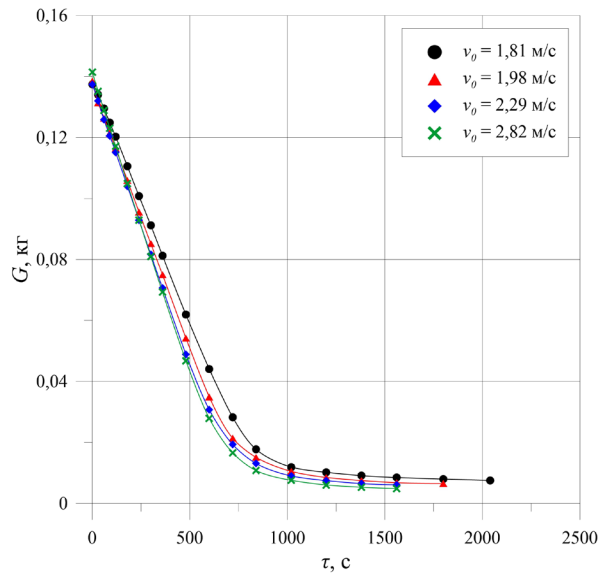


Рис. 4.139. Динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння каштанів за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Графічні залежності швидкості фільтраційного сушіння від зміни вологовмісту під час фільтраційного сушіння каштанів наведені на рис. 4.140–4.142.

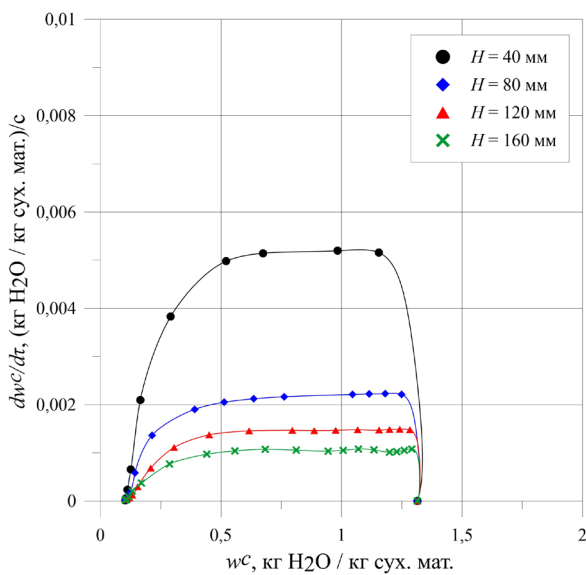


Рис. 4.140. Швидкість фільтраційного сушіння каштанів за різної висоти шару матеріалу H

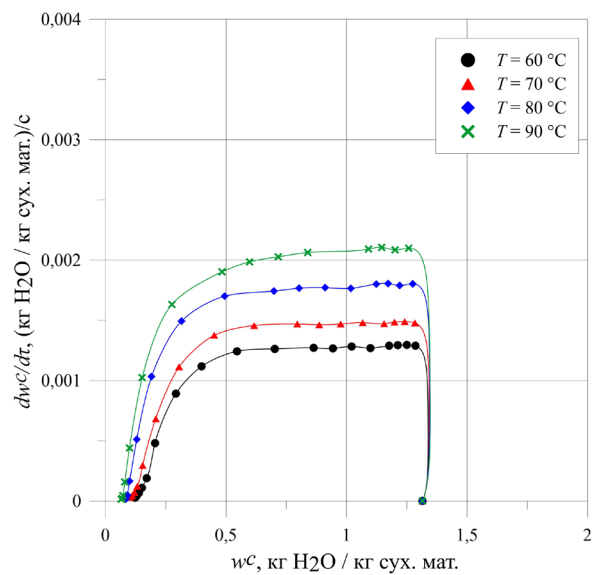


Рис. 4.141. Швидкість фільтраційного сушіння каштанів за різної температури теплового агенту T

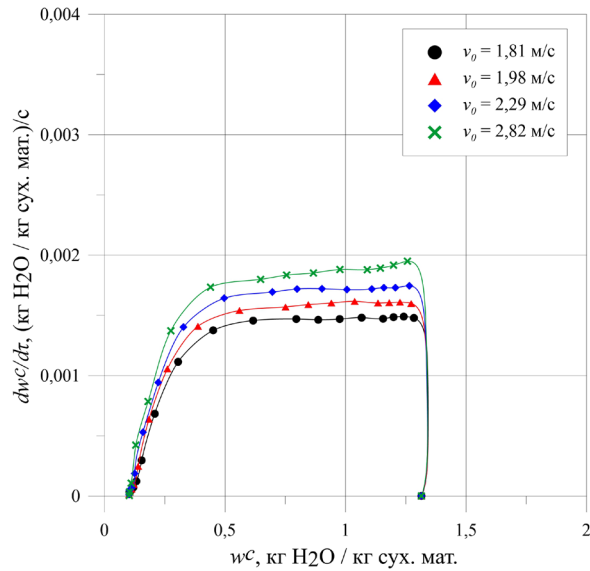


Рис. 4.142. Швидкість фільтраційного сушіння каштанів за різної швидкості руху потоку теплового агенту v_0

Аналіз рис. 4.140–4.142 підтверджує висновки про те, що швидкість фільтраційного сушіння каштанів зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту та збільшенням швидкості його руху теплового агенту.

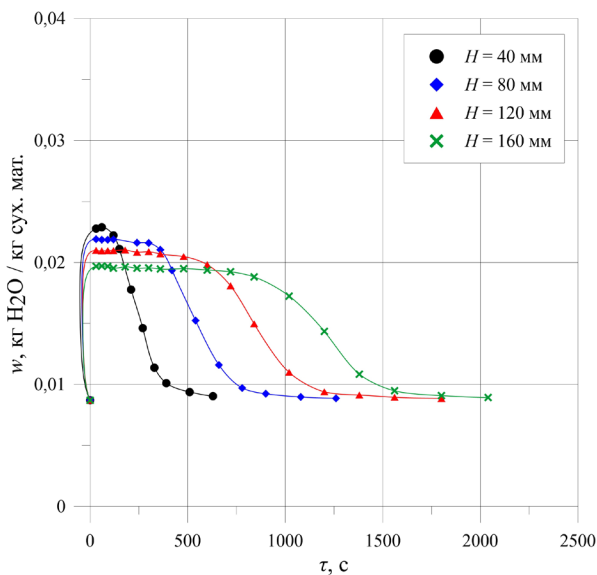


Рис. 4.143. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння каштанів за різної висоти шару сушіння матеріалу H

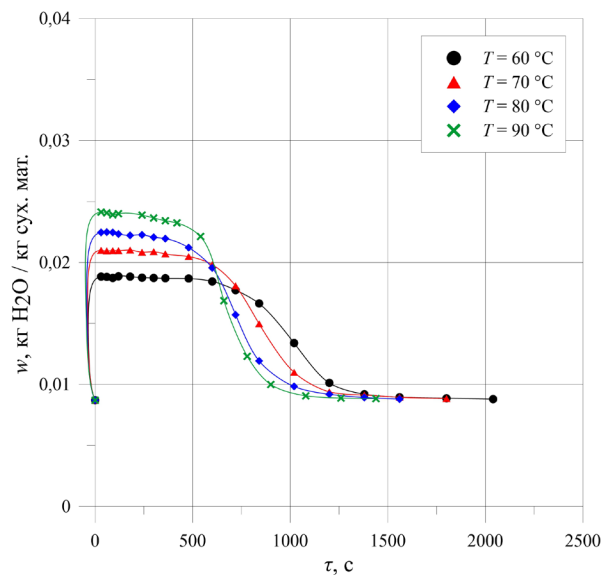


Рис. 4.144. Залежність зміни вологовмісту теплового агенту від часу під час фільтраційного сушіння каштанів за різної температури теплового агенту T

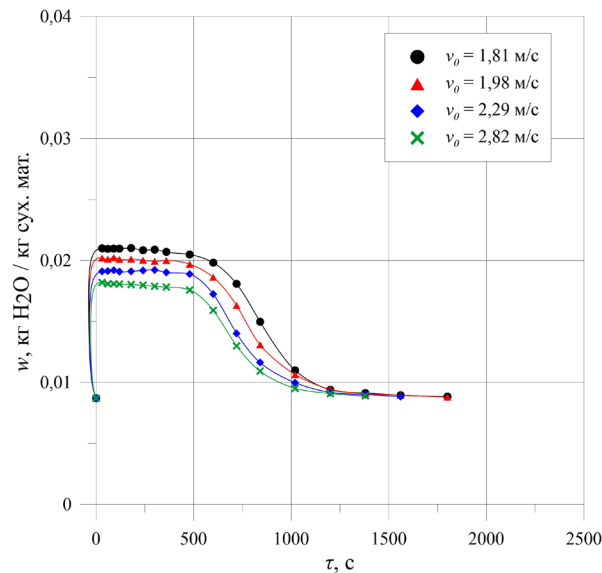


Рис. 4.145. Залежність зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння каштанів за різної швидкості руху потоку теплового агента v_0

Графічні залежності зміни вологовмісту теплового агента від часу під час фільтраційного сушіння каштанів (рис. 4.143–4.145), як і у попередньо розглянутих випадках, вказують на те, що насичення теплового агента вологою з часом зменшується та наявність двох періодів сушіння.

Висновки до четвертого розділу

1. Виконано експериментальні дослідження для встановлення впливу основних параметрів процесу фільтраційного сушіння (висоти вологого матеріалу H , температури теплового агента T , швидкості руху теплового агента v_0) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі.
2. Визначено узагальнюючі залежності зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі для періодів повного насичення теплового агента вологою та часткового насичення теплового агента вологою для кукурудзяної післяспиртової барди (4.5), (4.6), ячмінної пивної дробини (4.9), (4.10), відходів виробництва кави (4.13), (4.14), бурякового жому (4.17), (4.18), яблучних вичавок (4.21), (4.22), жолудів (4.25), (4.26) та каштанів (4.29), (4.30).

3. На основі запропонованих узагальнюючих залежностей для визначення зміни вологовмісту досліджуваного матеріалу, визначено залежності тривалості процесу фільтраційного сушіння для періодів повного насичення теплового агенту вологою та часткового насичення теплового агенту вологою для кукурудзяної післяспиртової барди (4.7), (4.8), ячмінної пивної дробини (4.11), (4.12), відходів виробництва кави (4.15), (4.16), бурякового жому (4.19), (4.20), яблучних вичавок (4.23), (4.24), жолудів (4.27), (4.28) та каштанів (4.31), (4.32).
4. Визначено відносні відхилення відповідності експериментальних даних до теоретично розрахованих згідно запропонованих узагальнюючих залежностей. Показано, що розраховані відносні відхилення є допустимими для практичних розрахунків сушильного обладнання.
5. Визначено динаміку видалення вологи під час фільтраційного сушіння досліджених матеріалів, швидкість фільтраційного сушіння та зміну вологовмісту теплового агенту від часу за різних параметрів процесу (висоти вологого матеріалу H , температури теплового агенту T , швидкості руху теплового агенту v_0). Показано, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Показано, що інтенсивність видалення вологи під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження пропорційно зростає із збільшенням температури теплового агенту та підвищенням швидкості руху теплового агенту. Визначено, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту, та збільшенням швидкості руху теплового агенту. Встановлено, що насичення теплового агенту вологою з часом зменшується.
6. Основні результати досліджень опубліковані в роботах [6, 182, 183, 203–210].

РОЗДІЛ 5

ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ТЕПЛОМАСООБМІННИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ДЛЯ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Визначення основних тепло- та масообмінних коефіцієнтів для фільтраційного сушіння має важливе значення для універсалізації отриманих результатів експериментальних досліджень. Метою розділу було визначити коефіцієнти теплообміну, масообміну та дифузії для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження під час фільтраційного сушіння досліджуваної вторинної сировини рослинного походження.

5.1. Визначення коефіцієнтів тепломасообміну для процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Ефективність фільтраційного сушіння безпосередньо залежить від кількості тепла, що передається від теплового агенту до частинки. Ця передача тепла визначається швидкістю потоку теплового агенту, різницею температур між поверхнею твердої частинки і газовим потоком, а також площею контакту між ними. Оскільки за процесу сушіння в шарі присутні одночасно і сухі, і вологі частинки – коефіцієнти теплообміну було визначено для сухого і для вологого шару досліджуваних матеріалів.

Експериментальні дослідження виконано на установці, яка зображена на рис. 2.10. Методики визначення коефіцієнтів тепломасообміну для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, наведено у розділі 2.3.11.

Для визначення усереднених коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до шару сухих частинок через шар дисперсного матеріалу, тепловий агент фільтрували із заданою швидкістю і температурою.

Зафіксовані значення температури теплового агента на виході із шару досліджуваних сухих матеріалів наведені на рис. 5.1–5.7.

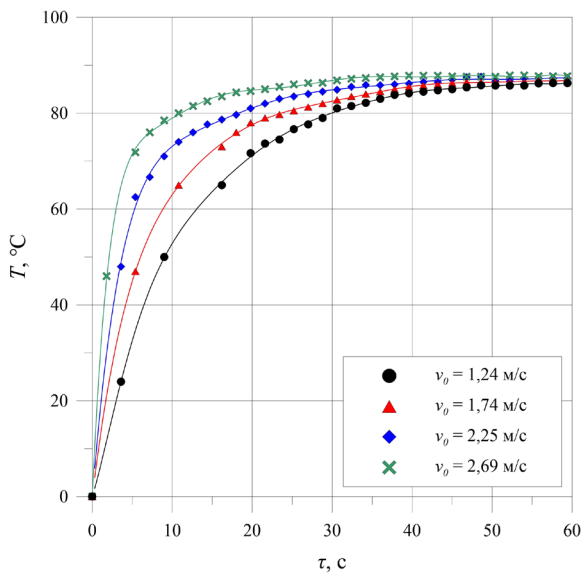


Рис. 5.1. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару кукурудзяної післяспиртової барди

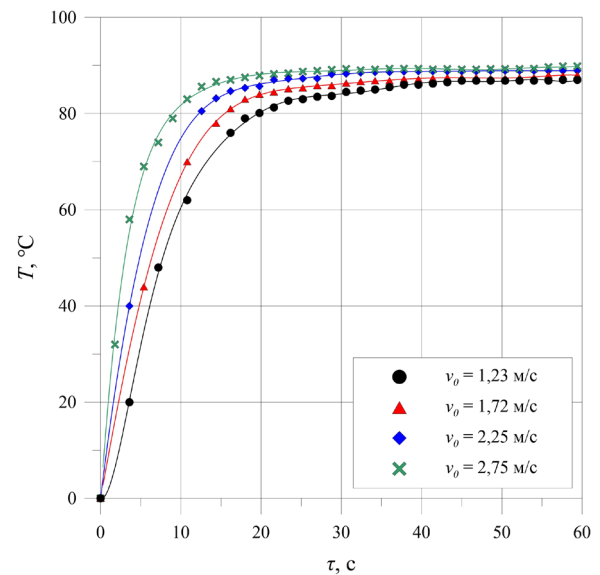


Рис. 5.2. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару ячмінної пивної дробини

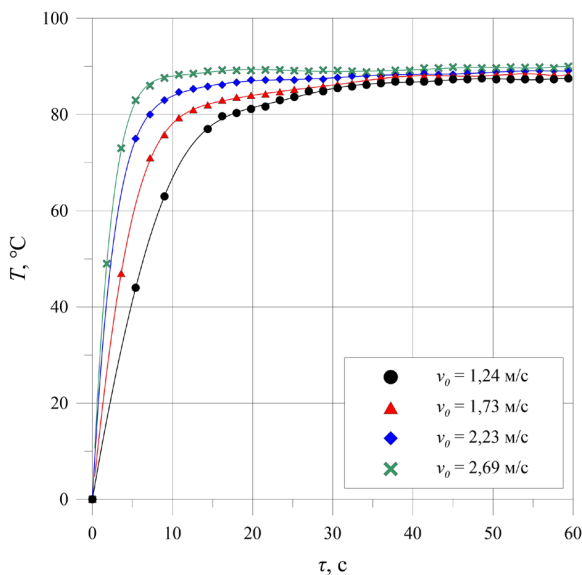


Рис. 5.3. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару відходів виробництва кави

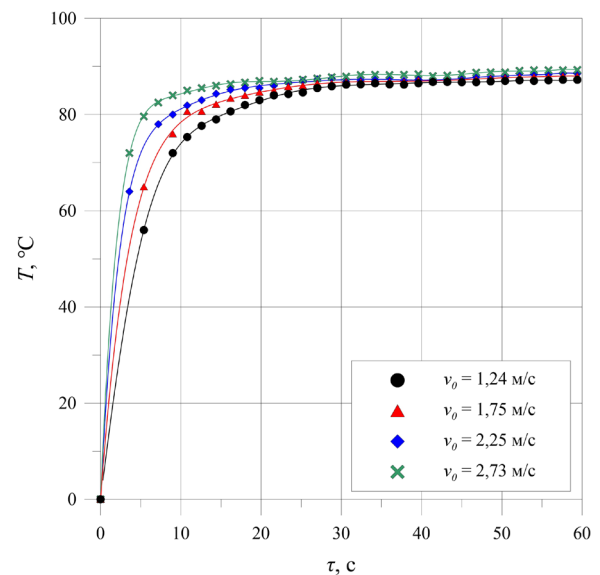


Рис. 5.4. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару бурякового жому

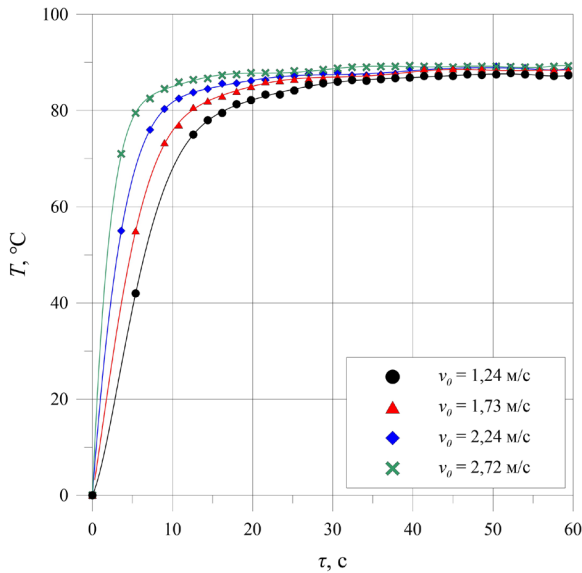


Рис. 5.5. Зміна температури теплового агента на виході із шару яблучних вичавок

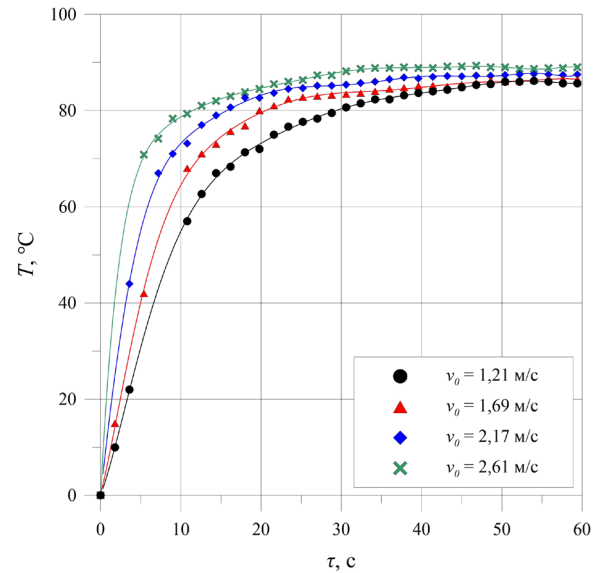


Рис. 5.6. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару жолудів

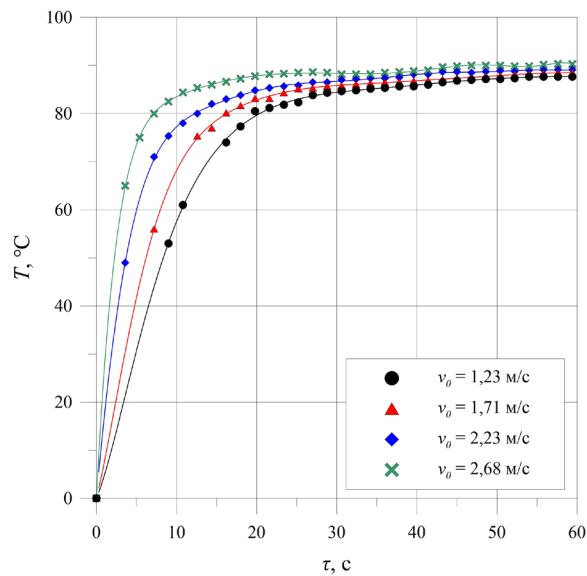


Рис. 5.7. Зміна температури теплового агента на виході із сухого шару каштанів

На основі експериментальних значень наведених на рис. 5.1–5.7 розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α згідно з рівнянням тепловіддачі [211]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (t - T_n) \cdot \Delta \tau}, \quad (5.1)$$

де ΔQ – кількість переданої теплоти, кДж;

t – середньоарифметична температура теплового агенту на вході і виході з шару згідно із замірами (рис. 5.1–5.7), °С;

T_n – середня температура поверхні твердих частинок, °С.

ΔQ розраховували за рівнянням теплового балансу для теплового агенту, \bar{t} приймалося як середньоарифметична температура теплового агенту на вході і виході з шару згідно проведених вимірювань. Середня температура поверхні твердих частинок T_n оцінювалась наступним чином. З рівнянь теплового балансу визначалась середня температура частинок T :

$$\Delta Q = m_{t.a.} \cdot c_{t.a.} \cdot (t - T_0^*) \quad (5.2)$$

де $m_{t.a.}$ – маса теплового агенту, кг;

$c_{t.a.}$ – питома теплоємність теплового агенту, кДж/кг·°С;

T_0^* – початкова температура поверхні твердих частинок, °С.

Згідно з теоретичними уявленнями, температура поверхні твердих частинок перевищує їхню середню температуру. Проте, експериментальне визначення температури поверхні частинок досліджуваних матеріалів є завданням високої складності. Тому для оцінки температури поверхні використовували аналітичні моделі, розроблені для частинок, наближених за формою до кулястої [146].

Для спрощення розрахунків припускали, що тепловий агент нагріває частинку рівномірно з усіх сторін. Розподіл температури всередині частинки описується параболічною залежністю, тобто температура плавно зростає від центру до поверхні. Температуру поверхні визначали за допомогою рівняння:

$$T_n = t - (t - T_0^* \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo}) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot e^{-\mu_1^2 \cdot Fo} \quad (5.3)$$

де R , r – радіус частинки і біжучий радіус відповідно ($0 < r \leq R$), м;

μ_1 – корінь характеристичного рівняння;

Fo – критерій Фур'є.

Зважаючи на криволінійну форму каналів між частинками та їхню змінну площу поперечного перерізу, швидкість теплового агенту відносно поверхні частинок є неоднорідною. Це спричиняє багаторазові зміни локальних коефіцієнтів тепловіддачі, внаслідок чого отримані значення є усередненими по всьому шару матеріалу. Коефіцієнти тепловіддачі α для сухого шару досліджених матеріалів розраховано за рівнянням (5.1) і представлено на рис. 5.8.

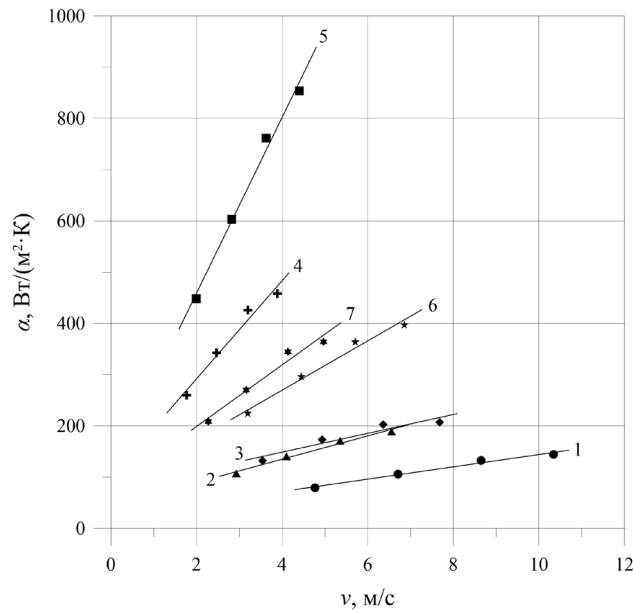


Рис. 5.8. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості для сухого шару досліджених матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Як видно з рис. 5.8, отримані експериментальні результати демонструють лінійну кореляцію між коефіцієнтом тепловіддачі та дійсною швидкістю фільтрування теплового агенту.

Спостерігаємо залежність посилення інтенсивності процесу теплообміну – ріст коефіцієнта тепловіддачі α із збільшенням дійсної швидкості руху теплового агенту (рис. 5.8). Таким чином, за однакової дійсної швидкості через канали між частинками більшого розміру профільтровується більша кількість теплового агенту і в шар вноситься більша кількість теплоти.

Узагальнення експериментальних результатів, наведених на рис. 5.8, проводили за рівнянням [146]:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m, \quad (5.4)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерій Нусельта;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, м²/с;

a – коефіцієнт температуропровідності, м²/с;

A, n – коефіцієнти, що визначаються експериментальним шляхом.

Під час узагальнення гідродинаміки за основний лінійний розмір нами прийнято еквівалентний діаметр d_e каналів, крізь які фільтрується тепловий агент. Враховуючи, те, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, приймаємо $Nu \sim Pr^{0,33}$ згідно рекомендацій [146].

Для визначення невідомих коефіцієнтів A та n експериментальні значення представлялись залежністю $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ у логарифмічній системі координат. На рис. 5.9 представлена вищезгадана залежність для сухих досліджених матеріалів.

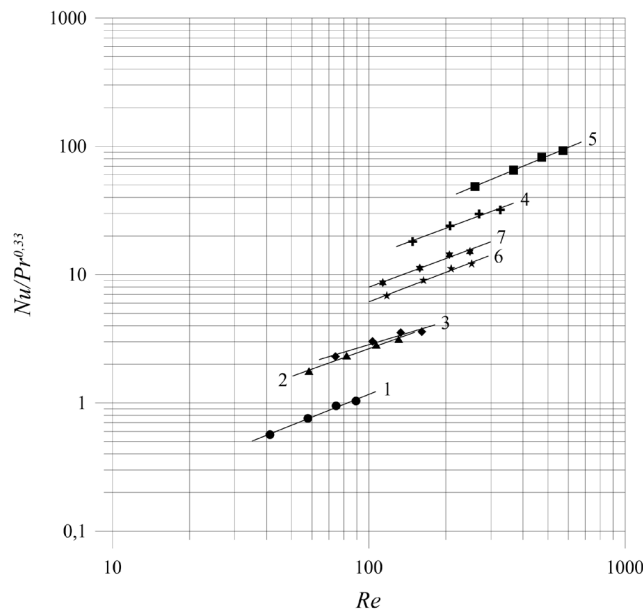


Рис. 5.9. Узагальнення результатів експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі α у сухому шарі матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Визначені коефіцієнти A та n рівняння (5.4) для сухого шару вторинної сировини рослинного походження наведено у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1

Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (5.4) для сухого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,03	0,798	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,098	0,716	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,18	0,6	
Яблучні вичавки	148÷327	0,454	0,741	
Буряковий жом	259÷574	0,486	0,83	
Жолуді	117÷253	0,18	0,766	
Каштани	113÷279	0,261	0,743	

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі для вологого шару досліджуваної вторинної сировини рослинного походження експериментальні дослідження було виконано на установці, яка зображена на рис. 2.10. Методики визначення коефіцієнтів тепломасообміну для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, наведено у розділі 2.3.11.

Температуру теплового агенту підтримували стабільною на рівні $90 \pm 0,4$ °C за допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S і ХК-термопари, яка була розміщена посередині циліндричного контейнера (рис. 2.10). Процес сушіння відбувався протягом 15 секунд, циліндричний контейнер закривали для запобігання втратам вологи під час подальшого зважування. Вважали, що вся тепла енергія, яку отримував досліджуваний матеріал від теплового агенту, була витрачена на видалення вологи.

Коефіцієнт тепловіддачі для вологого шару матеріалу під час фільтраційного сушіння визначали із кінетичного рівняння:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot r = \alpha \cdot F \cdot \left(\frac{t_{ex.} + t_{eux.}}{2} - t_{m.m.} \right), \quad (5.5)$$

де ΔW – маса випареної води за певний проміжок часу, кг;

F – ефективна поверхня тепло- і масообміну, m^2 ;

$t_{ex.}$, $t_{вих.}$, $t_{m.m.}$ – відповідно, температура теплового агента на вході у шар матеріалу, на виході із шару матеріалу, температура мокрого термометра, $^{\circ}C$.

Коефіцієнти тепловіддачі α для вологого шару досліджених матеріалів було розраховано за рівнянням (5.5) і представлено на рис. 5.10.

Із графічних залежностей (рис. 5.10) очевидно, що підвищення швидкості призводить до інтенсифікації процесу теплообміну, оскільки значення коефіцієнтів тепловіддачі α теж зростають.

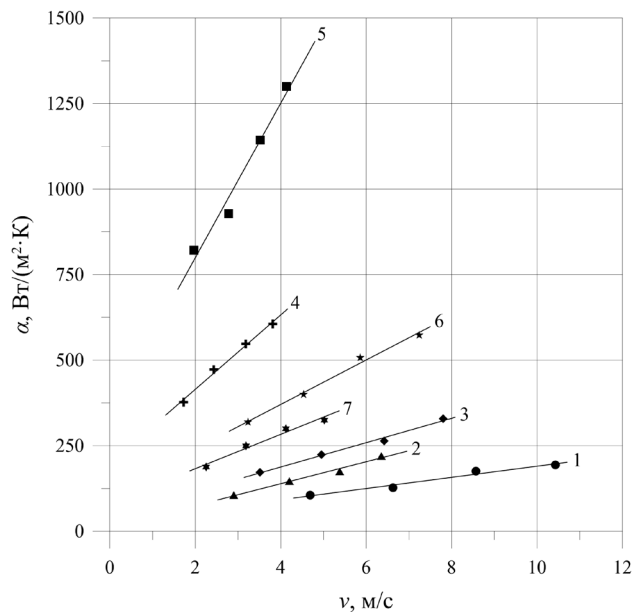


Рис. 5.10. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості для вологого шару досліджених матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Узагальнення експериментальних результатів, наведених на рис. 5.10, проводили за рівнянням (5.4). Для визначення невідомих коефіцієнтів A та n експериментальні значення, аналогічно як і для даних для сухого шару досліджуваних матеріалів, представлялись залежністю $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ у логарифмічній системі координат. На рис. 5.11 представлена вищезгадана

залежність для вологого шару досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження.

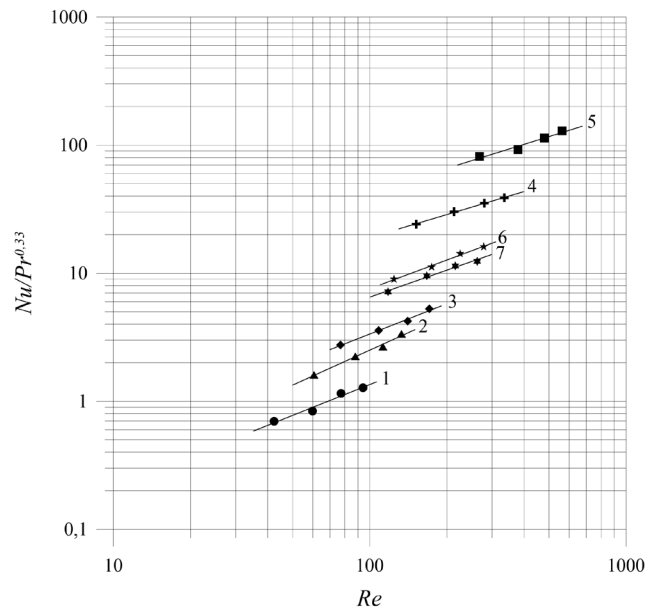


Рис. 5.11. Узагальнення результатів експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі α у вологому шарі матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Визначені коефіцієнти A та n рівняння (5.4) для вологого шару вторинної сировини рослинного походження на основі рис. 5.11 наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (5.4) для вологого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,034	0,8	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,038	0,907	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,09	0,786	
Яблучні вичавки	148÷327	1,217	0,597	
Буряковий жом	259÷574	2,432	0,623	
Жолуді	117÷253	0,246	0,744	
Каштани	113÷279	0,259	0,7	

Експериментальні дослідження масообміну під час фільтраційного сушіння було виконано на установці, зображеній на рис. 2.10. Методики визначення коефіцієнтів тепломасообміну для фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження, наведено у розділі 2.3.11.

Коефіцієнт масовіддачі β визначали із кінетичного рівняння:

$$\frac{\Delta W}{\Delta \tau} = \beta \cdot F \cdot \left(d_{нас.} - \frac{d_{нас.} + d_1}{2} \right) \cdot \rho, \quad (5.6)$$

де $d_{нас.}$, d_1 – відповідно, вологовміст теплового агента насичений та початковий, кг H_2O / кг сух. повітря.

Розраховані значення коефіцієнтів масовіддачі β для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження представляли як залежність від дійсної швидкості руху теплового агента v крізь шар матеріалів (рис. 5.12).

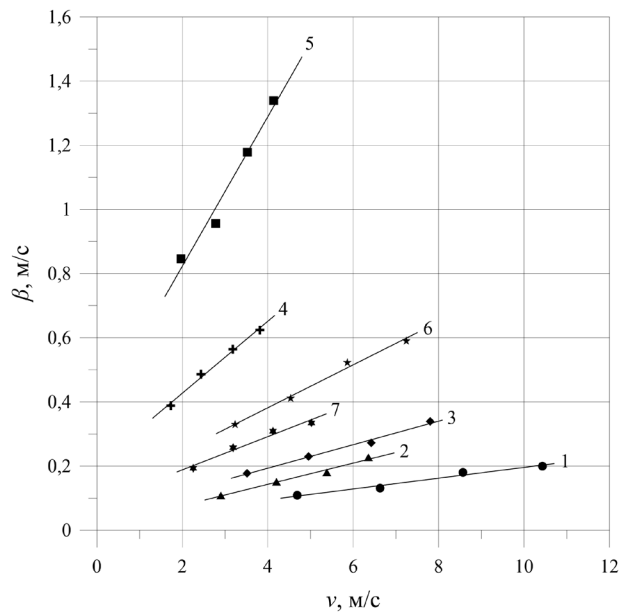


Рис. 5.12. Залежність коефіцієнту масовіддачі β від дійсної швидкості для вологого шару досліджених матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Для узагальнення отриманих результатів одержані коефіцієнти масовіддачі β виражали як безрозмірні комплекси Sh , Sc залежно від числа Re :

$$Sh = A \cdot Re^n \cdot Sc^m \quad (5.7)$$

де $Sh = \frac{\beta \cdot d_e}{D}$ – критерій Шервуда;

$Sc = \frac{\nu}{D}$ – критерій Шмідта;

D – коефіцієнт дифузії водяної пари у повітря.

Враховуючи, те, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, приймаємо $Sh \sim Sc^{0,33}$ згідно рекомендацій [146]. Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (5.7) визначали із графічної залежності $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$, що була побудована на основі експериментальних даних (рис. 5.13).

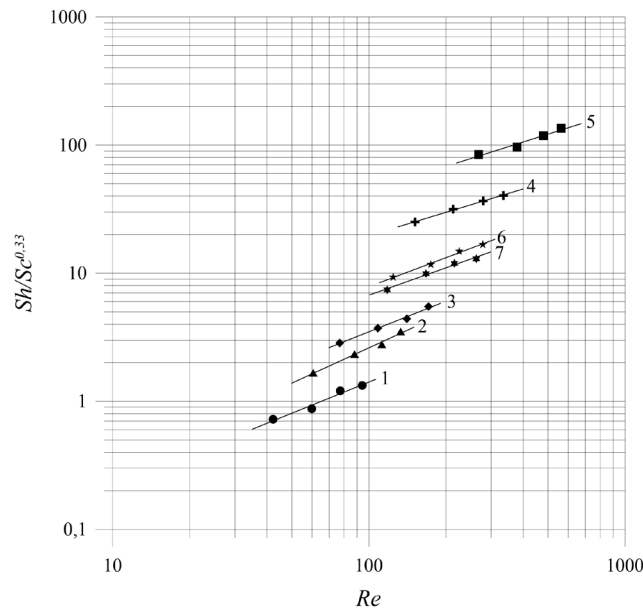


Рис. 5.13. Узагальнення результатів експериментального визначення коефіцієнтів масовіддачі β у вологому шарі матеріалів: 1 – післяспиртова барда; 2 – пивна дробина; 3 – відходи виробництва кави; 4 – яблучні вичавки; 5 – буряковий жом; 6 – жолуді; 7 – каштани

Визначені коефіцієнти A , n та m рівняння (5.4) для вологого шару вторинної сировини рослинного походження на основі рис. 5.11 наведено у табл. 5.3. Максимальне відносне відхилення між експериментальними та розрахованими за рівняннями (5.4) та (5.7) значеннями не перевищує 7,5 % (табл. 5.4).

У періоді повного насичення теплового агенту вологою тепловий агент передає тепло поверхні матеріалу і, відповідно, волога з поверхні випаровується та переноситься у тепловий агент. Обидва процеси є конвективними і залежать від гідродинаміки – інтенсивності руху теплового агента, що характеризується

числом Рейнольдса. Незважаючи на різну природу тепло- і масообмінних процесів, вони описуються подібними математичними моделями (5.4) і (5.7) – аналіз експериментальних даних свідчить про подібність критеріальних залежностей для коефіцієнтів тепловіддачі та масовіддачі, що вказує на ідентичний характер впливу гідродинаміки на ці процеси.

Таблиця 5.3

Значення коефіцієнтів A , n , m рівняння (5.7) для вологого шару матеріалів вторинної сировини рослинного походження

Дослідний матеріал	Re	A	n	m
Кукурудзяна післяспиртова барда	41÷90	0,034	0,809	0,33
Ячмінна пивна дробина	58÷132	0,038	0,916	
Відходи виробництва кави	74÷161	0,09	0,795	
Яблучні вичавки	148÷327	1,208	0,605	
Буряковий жом	259÷574	2,391	0,632	
Жолуді	117÷253	0,244	0,753	
Каштани	113÷279	0,257	0,709	

Таблиця 5.4

Значення максимального відхилення між експериментальними та теоретично розрахованими за рівняннями (5.4) та (5.7) значеннями, %

Дослідний матеріал	сухий шар	вологий шар	вологий шар
	Nu	Nu	Sh
Кукурудзяна післяспиртова барда	2,74	7,22	6,55
Ячмінна пивна дробина	2,54	4,51	4,42
Відходи виробництва кави	5,49	4,18	4,33
Яблучні вичавки	3,55	1,01	1,75
Буряковий жом	2,42	6,54	5,84
Жолуді	2,75	2,57	2,81
Каштани	4,26	3,14	3,06

Для узагальнення подібності тепло- та масообміну наведемо на спільному графіку комплекси $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ та $\frac{Sh}{Sc^{0,33}} = f(Re)$ (рис. 5.14). Аналіз рис. 5.14 свідчить про близькість визначених комплексів для процесів тепло- та масообміну.

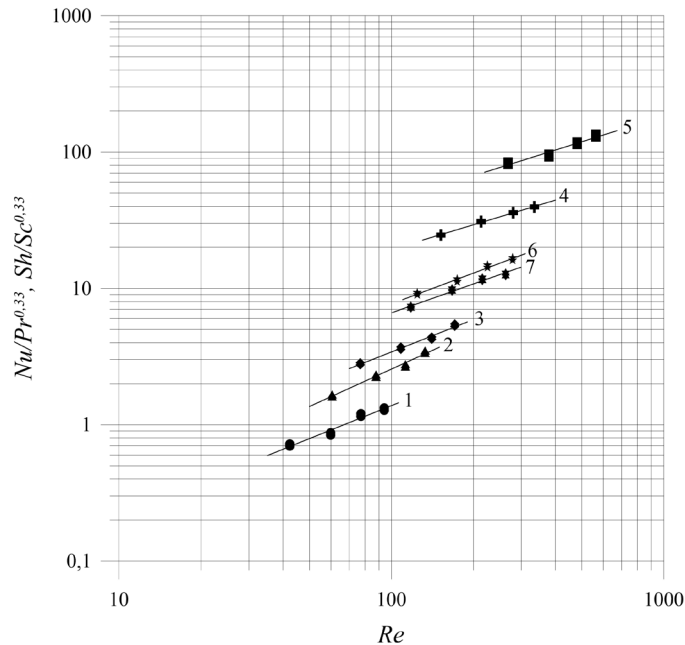


Рис. 5.14. Узагальнення подібності тепло- та масообміну у періоді повного насичення теплового агента вологою.

Для узагальнення визначеної подібності тепло- та масообмінних процесів, утотожнимо отримані комплекси:

$$\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = \frac{Sh}{Sc^{0,33}} \quad (5.8)$$

Підставивши складові у рівняння (5.8), отримуємо вираз:

$$\frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33}} = \frac{\beta \cdot d_e}{D \cdot \left(\frac{\nu}{D}\right)^{0,33}} \quad (5.9)$$

Виконавши математичні перетворення рівняння (5.9), приходимо до рівняння:

$$\frac{\alpha}{c \cdot \rho} = \beta \cdot \left(\frac{a}{D}\right)^{0,67} \quad (5.10)$$

Звідки отримуємо загальну залежність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі:

$$\beta = \frac{\alpha}{c \cdot \rho \cdot Le^{0,67}} \quad (5.11)$$

де $Le = \frac{a}{D}$ – число Л'юїса.

Отже, на основі одержаних експериментальних даних було визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару, а також коефіцієнти масовіддачі для вологого шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження. Експериментальні дані узагальнено визначеними залежностями критеріїв Нуссельта та Шервуда для усіх досліджених матеріалів. Показано подібність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі з використанням числа Льюїса у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час процесу фільтраційного сушіння.

5.2. Визначення коефіцієнтів дифузії для процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження

Методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для досліджуваних матеріалів вторинної сировини рослинного походження, наведено у розділі 2.3.13. Згідно класифікації частинок досліджуваної вторинної сировини рослинного походження, серед об'єктів досліджень присутні частинки кулястої форми (кукурудзяна післяспиртова барда, відходи виробництва кави, жолуді дубу звичайного), циліндричної форми (ячмінна пивна дробина, буряковий жом) та призматичні (яблучні вичавки, каштани гіркокаштану звичайного).

Кулясті частинки

Кукурудзяна післяспиртова барда

Згідно методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для частинок кулястої форми, що наведена у розділі 2.3.13, на рис. 5.15 наведено графічну залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від τ для кукурудзяної післяспиртової барди. Аналіз рис. 5.15 свідчить про лінійний характер графічних

залежностей, що дає змогу визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис.

В таблиці 5.5 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для кукурудзяної післяспиртової барди за різних температур.

Таблиця 5.5

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для кукурудзяної післяспиртової барди за різних температур

T, K	293	333	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-11}, m^2/c$	5,5	5,38	7,17	8,06	9,41

На рис. 5.16 наведено графічну залежність визначених значень коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури.

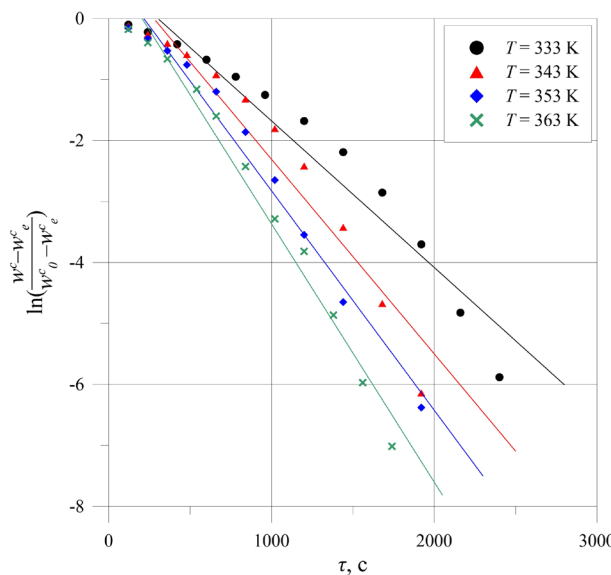


Рис. 5.15. Графічна залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від часу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди

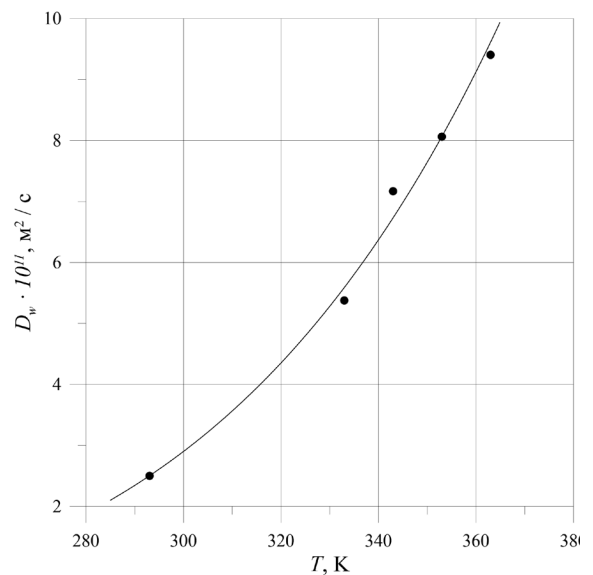


Рис. 5.16. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для кукурудзяної післяспиртової барди

Аналіз рис. 5.16 вказує на зростання коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w вологи для кукурудзяної післяспиртової барди у довілля із підвищенням температури теплового агенту. Дану залежність можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_w^t = D_w^{293} + 8,2 \cdot 10^{-14} \cdot (T - 293)^{1,6} \quad (5.12)$$

Коефіцієнт дифузії вологи в навколишнє середовище під час сушіння варіюється в широких межах від 10^{-6} до 10^{-12} м/с, залежно від пористості матеріалу [146], отримані дані підтверджують цю залежність.

Для перевірки адекватності залежності (5.12) було побудовано графік відношення експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії до теоретично розрахованих (рис. В1, додаток В), який свідчить про кореляцію даних значень. Максимальне відносне відхилення складає не більше 5,3 %.

Відходи виробництва кави

На рис. 5.17 наведено графічну залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від τ для відходів виробництва для відходів виробництва кави.

В таблиці 5.6 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для відходів виробництва кави за різних температур, на рис. 5.18 наведено графічну залежність визначених значень коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури.

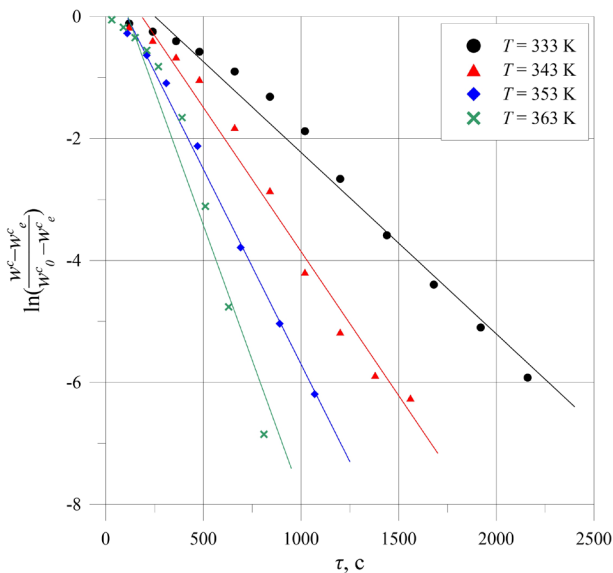


Рис. 5.17. Графічна залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від часу сушіння відходів виробництва кави

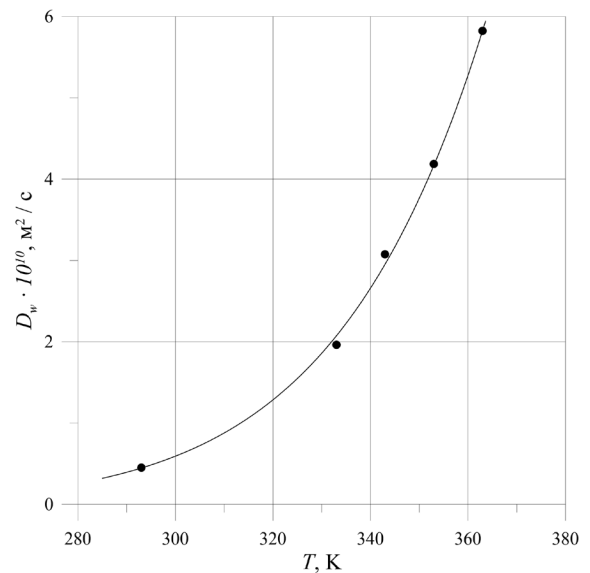


Рис. 5.18. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для відходів виробництва кави

Таблиця 5.6

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для відходів виробництва кави за різних температур

T, K	293	333	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-10}, m^2/c$	0,45	1,96	3,08	4,19	5,82

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.18 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 10,2 \cdot 10^{-14} (T - 293)^2 \quad (5.13)$$

Рис. В2, додаток В свідчить про кореляцію значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії, одержаних експериментально, до теоретично розрахованих. Максимальне відносне відхилення складає не більше 6,4 %.

Жолуді

На рис. 5.19 наведено графічну залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від τ для жолудів дубу звичайного. В таблиці 5.7 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для жолудів за різних температур.

Таблиця 5.7

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для жолудів за різних температур

T, K	293	333	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-10}, m^2/c$	1,93	3,32	4,28	4,71	5,03

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.20 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 4 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293) \quad (5.14)$$

Аналіз рис. В3, наведеного у додатку В, свідчить про кореляцію значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії, одержаних експериментально, до теоретично розрахованих. Максимальне відносне відхилення складає не більше 4,8 %.

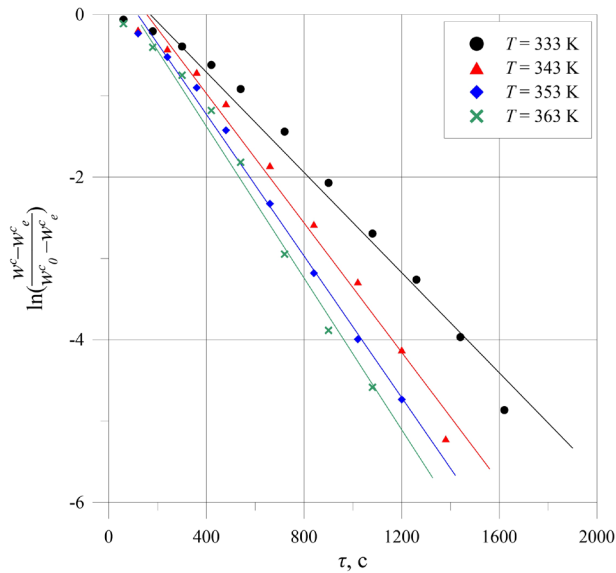


Рис. 5.19. Графічна залежність $\ln[(w^c - w_e^c)/(w_0^c - w_e^c)]$ від часу сушіння жолудів

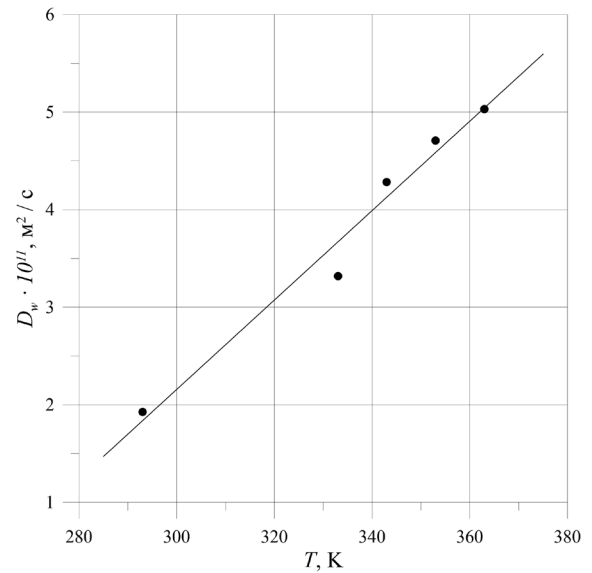


Рис. 5.20. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для жолудів

Циліндричні частинки

Ячмінна пивна дробина

Згідно методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для частинок циліндричної форми, що наведена у розділі 2.3.13, на рис. 5.21 наведено графічну залежність A від τ для ячмінної пивної дробини, де, відповідно:

$$\frac{\ln\left(\frac{\Delta w^c}{(B_n \cdot B_m)}\right)}{\mu_n^2 + \mu_m^2 \cdot K_l^2} = A,$$

$$\frac{w^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \Delta w^c$$

Аналіз рис. 5.21 вказує про лінійний характер графічних залежностей, що дає змогу визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії ячмінної пивної дробини D_w^* як тангенс кута нахилу прямих.

В таблиці 5.8 представлено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для ячмінної пивної дробини за різних температур.

Таблиця 5.8

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для ячмінної пивної дробини за різних температур

T, K	293	323	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-9}, m^2/c$	0,568	1,33	2,6	3,41	4,22

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.22 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^{1,8} \quad (5.15)$$

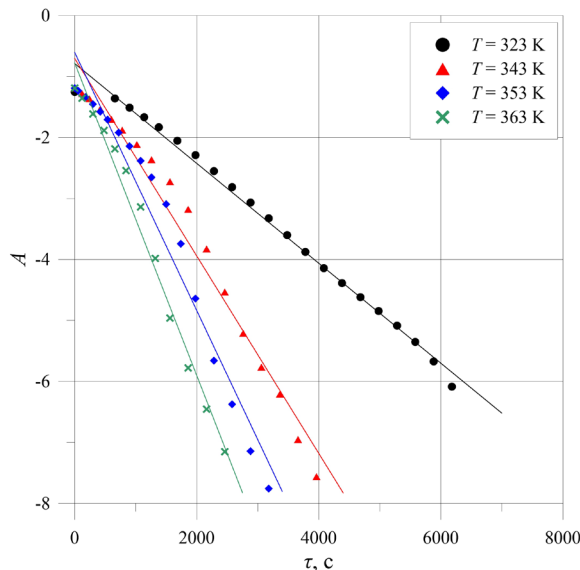


Рис. 5.21. Графічна залежність A від часу сушіння ячмінної пивної дробини

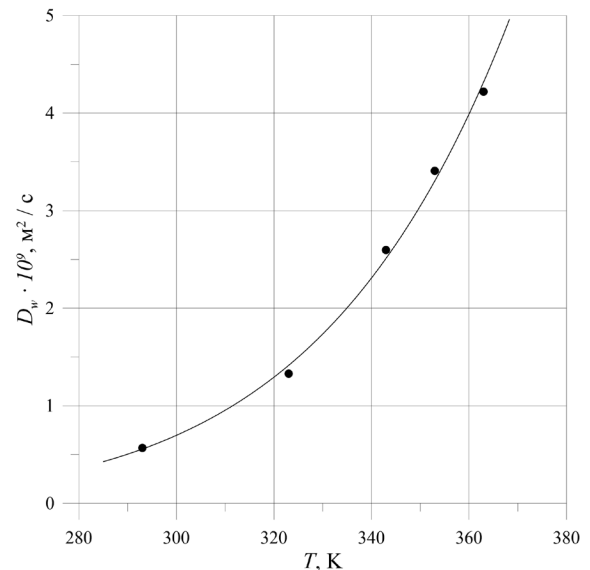


Рис. 5.22. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для ячмінної пивної дробини

Кореляція значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії, одержаних експериментально, до теоретично розрахованих наведена на рис. В4, додаток В. Максимальне відносне відхилення складає не більше 2,7 %.

Буряковий жом

На рис. 5.23 наведено графічну залежність A від τ для бурякового жому. В

таблиці 5.9 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для бурякового жому за різних температур.

Таблиця 5.9

Значення коефіцієнту внутрішньої дифузії для бурякового жому за різних температур

T, K	293	323	343	353	333
$D_w \cdot 10^{14}, m^2/c$	0,47	8,91	1,13	1,33	1,43

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.24 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 6,3 \cdot 10^{-17} \cdot (T - 293)^{1,2} \quad (5.16)$$

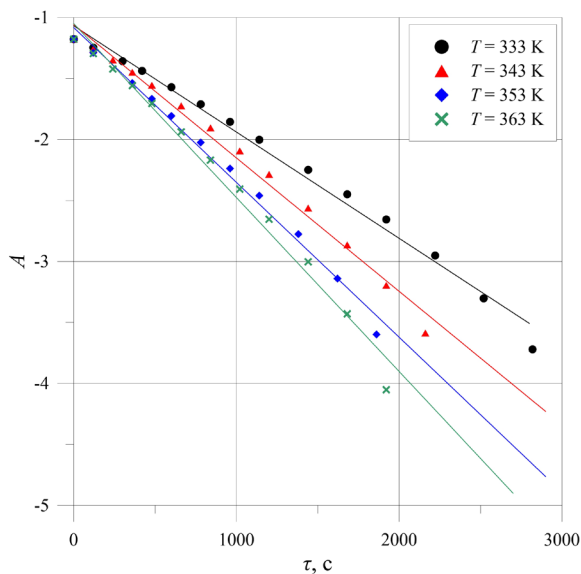


Рис. 5.23. Графічна залежність A від часу сушіння бурякового жому

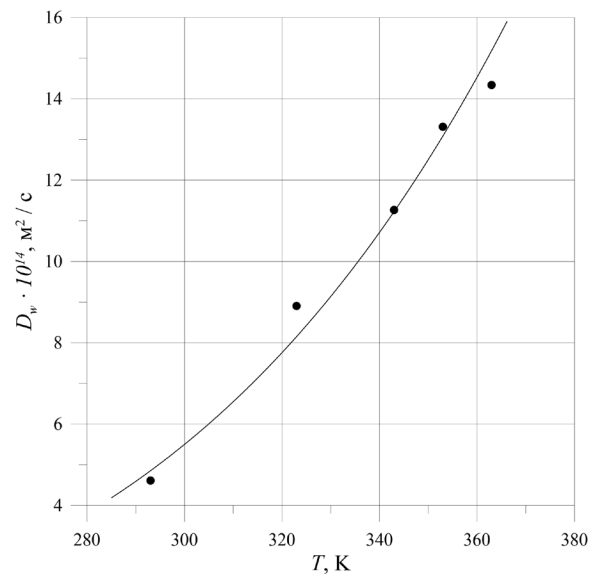


Рис. 5.24. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для бурякового жому

Аналіз наведеного у додатку В рис. В5 свідчить про кореляцію значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії, одержаних експериментально, до теоретично розрахованих.

Максимальне відносне відхилення складає не більше 5,7 %.

Призматичні частинки

Яблучні вичавки

Згідно методики визначення коефіцієнтів внутрішньої дифузії для частинок призматичної форми, що наведена у розділі 2.3.13, на рис. 5.25 наведено графічну залежність A від τ для яблучних вичавок. Аналіз рис. 5.25 свідчить про лінійний характер графічних залежностей, що дає змогу визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії яблучних вичавок D_w як тангенс кута нахилу прямих.

В таблиці 5.10 представлено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для яблучних вичавок за різних температур.

Таблиця 5.10

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для яблучних вичавок за різних температур

T, K	293	323	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-10}, m^2/c$	1,68	6,04	9,07	13,43	15,78

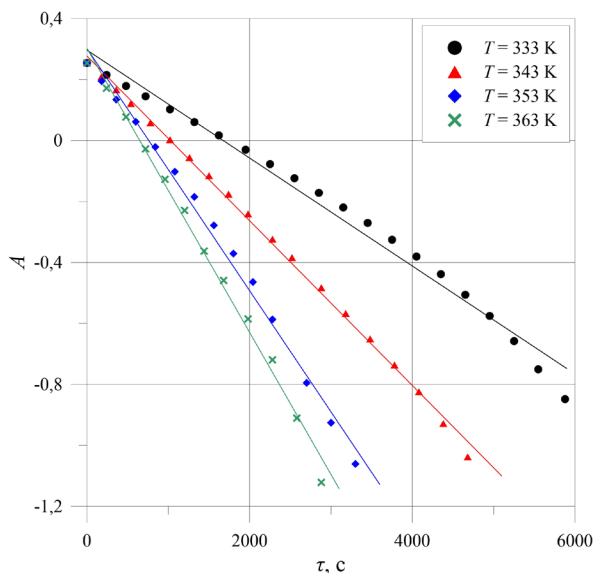


Рис. 5.25. Графічна залежність A від часу сушіння яблучних вичавок

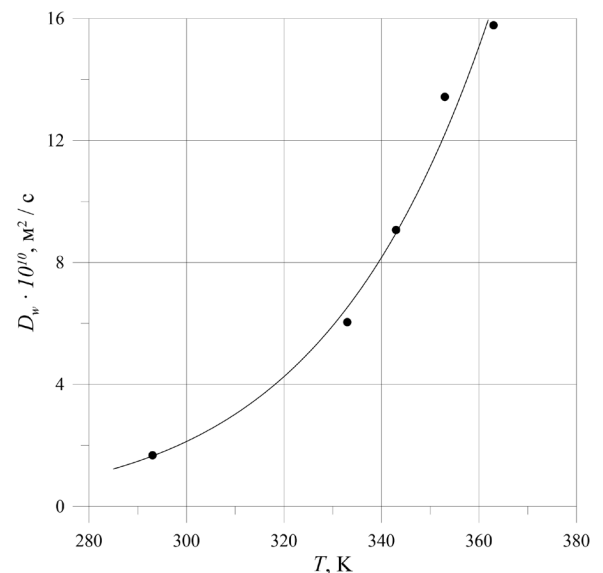


Рис. 5.26. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для яблучних вичавок

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.26 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 3 \cdot 10^{-13} \cdot (T - 293)^2 \quad (5.17)$$

Рис. В6, додаток В свідчить про кореляцію значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії для яблучних вичавок, одержаних експериментально, до теоретично розрахованих. Максимальне відносне відхилення складає не більше 7,2 %.

Каштани

На рис. 5.27 представлено графічну залежність A від τ для каштанів гіркокаштану звичайного. Лінійні залежності на рис. 5.27 дають змогу визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії каштанів D_W через тангенс кута нахилу прямих.

В таблиці 5.11 представлено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи для каштанів за різних температур.

Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури теплового агенту на рис. 5.34 можна виразити за допомогою рівняння:

$$D_W^t = D_W^{293} + 1,8 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^{1,8} \quad (5.18)$$

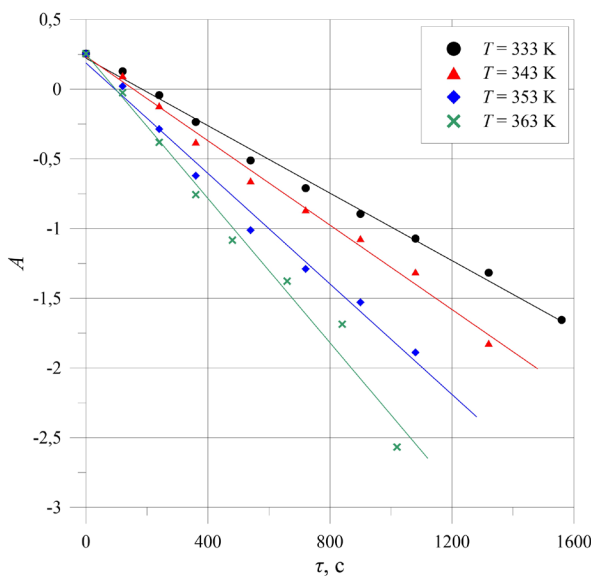


Рис. 5.27. Графічна залежність A від часу сушіння каштанів

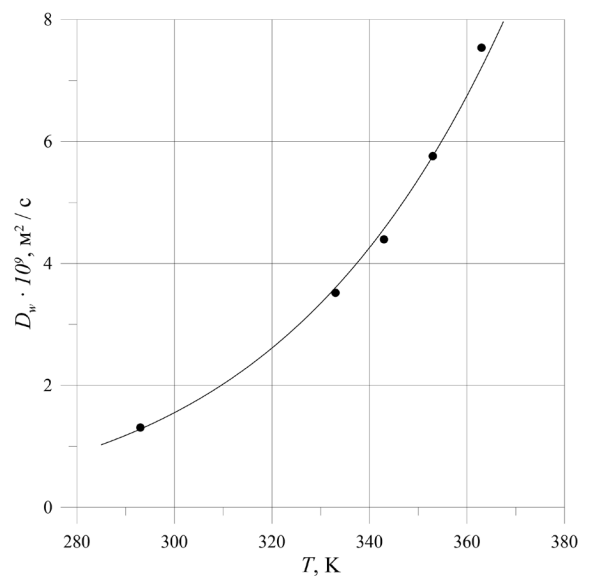


Рис. 5.28. Графічна залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для каштанів

Таблиця 5.11

Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії для каштанів за різних температур

T, K	293	323	343	353	333
$D_w \cdot 10^{-9}, m^2/c$	1,31	3,52	4,39	5,76	7,54

Рис. 5.35 свідчить про кореляцію значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії для каштанів, одержаних експериментально, до значень теоретично розрахованих. Максимальне відносне відхилення складає не більше 6,3 %.

Висновки до п'ятого розділу

1. Визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження.
2. Визначено коефіцієнти масовіддачі для вологого шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження.
3. Експериментальні дані узагальнено розрахунковими залежностями критеріїв Нуссельта та Шервуда для усіх досліджених матеріалів.
4. Показано подібність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі з використанням числа Льюїса у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час процесу фільтраційного сушіння.
5. Визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження. Залежності коефіцієнтів внутрішньої дифузії досліджених матеріалів від температури теплового агенту узагальнено за допомогою розрахункових залежностей для: кукурудзяної післяспиртової барди (5.12), ячмінної пивної дробини (5.15), відходів виробництва кави (5.13), бурякового жому (5.16), яблучних вичавок (5.17), жолудів (5.14) та каштанів (5.18).
6. Основні результати опубліковані в роботі [161].

РОЗДІЛ 6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА ІЗ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Як було описано в першому розділі, принципи раціонального природокористування, повторної переробки промислових відходів та біоциркулярної економіки є надзвичайно важливими, особливо на даний час, коли екологічна та енергетична ситуація у нашій країні погіршуються.

Вторинна сировина рослинного походження, обрана як об'єкти досліджень, має перспективи використання для енергетичних цілей, зважаючи на свої властивості.

Метою даного розділу було визначення основних енергетичних характеристик дослідженої вторинної сировини рослинного походження для використання її як альтернативного твердого палива.

6.1. Використання несформованої вторинної сировини рослинного походження як твердого палива

Тверде паливо повинно володіти рядом характеристик, що визначають його властивості. До таких властивостей належать насамперед теплотворна здатність, зольність та залишкова вологість. У країнах Європи та світу існують різні стандарти, що регламентують вимоги до твердого палива [212]. Виготовлене сформоване тверде паливо повинно володіти рядом певних властивостей для наступного їх використання і спалювання. Так наприклад, відповідно до німецького стандарту DIN 51731, пелети мають відповідати наступним параметрам: визначені геометричні розміри, густина ($< 1.2 \text{ кг/дм}^3$), вміст води ($< 12 \%$), вміст золи ($< 1.5 \%$), теплотворна здатність (3705 – 4661 ккал/кг), а також вміст певних хімічних елементів (N, S, Cl, тощо) [212]. Дотримання наявних вимог до твердого палива регулює ефективність та

безпеку його використання. В Україні, на жаль, наразі чіткого державного стандарту не затверджено.

Досліджувану сировину рослинного походження перевіряли на основні і найголовніші характеристики, що впливають на доцільність та можливість використання як альтернативного твердого палива. Методи проведення експериментальних досліджень наведено у розділі 2.3.8

Кукурудзяна післяспиртова барда

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик кукурудзяної післяспиртової барди наведено у табл. 6.1. Зважаючи на неоднорідність складу рослинної сировини, проводили кілька паралельних дослідів з метою визначення середнього значення.

Таблиця 6.1

Результати експериментального визначення теплотворної здатності кукурудзяної післяспиртової барди за даними калориметрії спалювання

№ дослідів	m, г	ΔT , В	$q_{тер}$ амп, Дж	q_u , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,320315	0,71478	1031,7	115,3	8,3	28,4	19573	4678
2	0,41836	0,92945	1364,4	109,5	11,8	32,8	19517	4665
<i>Середнє значення:</i>							19545	4672

Середнє значення теплотворної здатності кукурудзяної післяспиртової барди за даними калориметрії спалювання становить ≈ 19545 кДж/кг або ≈ 4672 ккал/кг (табл. 6.1).

Визначення зольності досліджуваних зразків проводили за температури 400°C згідно з методикою, вказаною у розділі 2.3.8. Зольність досліджуваних зразків кукурудзяної післяспиртової барди знаходилась в межах $1,6 \div 2,8$ % мас. Середнє значення зольності досліджуваних зразків кукурудзяної післяспиртової барди становило 2,1% мас.

Середнє значення вологості кукурудзяної післяспиртової барди на момент експерименту становило ≈ 3 % мас.

Для визначення перспективності використання кукурудзяної післяспиртової барди як твердого палива, одержані експериментальні дані було порівняно із показниками міскантусу та енергетичної верби (табл. 6.2), так як вони на даний час набули широкого використання для виробництва твердопаливних брикет [35].

Таблиця 6.2

Значення теплотворної здатності та зольності кукурудзяної післяспиртової барди та широко поширених рослин для виготовлення твердого палива

	Осушена кукурудзяна післяспиртова барда	Енергетична верба	Міскантус
Зольність, % мас.	$\approx 2,1$	≈ 1	$\approx 2,2$
Теплотворна здатність, КДж/кг	≈ 19545	≈ 17600	≈ 17500

Зольність кукурудзяної післяспиртової барди знаходиться в межах зольності існуючих аналогів, а отримане значення теплотворної здатності досліджуваного матеріалу дещо перевищує значення для існуючих аналогів (табл. 6.2), що свідчить про теоретично вищу ефективність сформованого твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди та перспективність подальших досліджень по виготовленню дослідних зразків.

Ячмінна пивна дробина

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик осушеної ячмінної пивної дробини наведено у табл. 6.3.

Як результат проведених досліджень, середнє значення теплотворної здатності ячмінної дробини, яке становить ≈ 20005 кДж/кг або ≈ 4781 ккал/кг (табл. 6.3).

Таблиця 6.3

Результати експериментального визначення теплотворної здатності ячмінної пивної дробини за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	$q_{тер}$ $амп$, Дж	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,36107	0,82688	1337,6	82,0	9,4	77,1	19953	4769
2	0,30740	0,71715	1324,2	86,9	9,1	70,5	19751	4720
3	0,36788	0,86662	1500,7	67,6	8,6	82,0	20313	4855
<i>Середнє значення:</i>							20005	4781

Зольність досліджуваних зразків ячмінної пивної дробини знаходилась в межах 1,6÷2,3 % мас. Середнє значення зольності досліджуваних зразків ячмінної пивної дробини становило 1,9 % мас.

Середнє значення вологості ячмінної пивної дробини на момент експерименту становило 6,5 % мас.

Варто зазначити, що значення теплотворної здатності ячмінної пивної дробини практично таке ж, як і в кукурудзяної післяспиртової барди. Отримані дані перевищують показники для існуючих аналогів, міскантуса та енергетичної верби (табл. 6.3).

Відходи кавового виробництва

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик відходів виробництва кави наведено у табл. 6.4. Як результат, одержано усереднене значення вищої теплотворної здатності відходів виробництва кави, яке становить ≈ 21583 кДж/кг або ≈ 5159 ккал/кг (табл. 6.4).

Зольність усіх досліджених зрізів становила < 1 % мас.

Середнє значення вологості відходів виробництва кави на момент експерименту становило 5,52% мас.

Отримані експериментальні дані теплотворної здатності відходів виробництва кави дещо вищі за показники кукурудзяної післяспиртової барди та

ячмінної пивної дробини, які були раніше нами досліджені; в той же час значення зольності є нижчими.

Таблиця 6.4

Результати експериментального визначення теплотворної здатності відходів виробництва кави за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	$q_{тер}$ амп, Дж	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,53160	1,28797	1861,6	107,8	26,6	62,0	21433	5123
2	0,32255	0,80133	1302,1	75,2	7,7	64,0	21613	5166
3	0,37701	0,96250	1714,7	92,0	6,8	36,1	21704	5187
Середнє значення:							21583	5159

Буряковий жом

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик бурякового жому наведено у табл. 6.5.

Внаслідок проведених досліджень, визначено усереднене значення вищої теплотворної здатності бурякового жому, яке становить ≈ 15900 кДж/кг або ≈ 3800 ккал/кг (табл. 6.5).

Таблиця 6.5

Результати експериментального визначення теплотворної здатності бурякового жому за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,38585	0,59024	76,3	4,7	111,5	15908	3802
2	0,19735	0,29960	79,2	3,0	132,8	15965	3816
3	0,21821	0,33620	75,2	1,2	50,0	15826	3782
Середнє значення:						15900	3800

Зольність досліджуваних зразків бурякового жому знаходилась в межах $3,8 \div 5,1$ % мас. Середнє значення зольності досліджуваних зразків бурякового жому становило 4,3 % мас.

Середнє значення вологості бурякового жому на момент експерименту становило 9,81 %.

Порівнюючи отримані експериментальні дані калориметрії спалювання дослідних взірців бурякового жому (табл. 6.5), помітно, що значення вищої теплотворної здатності дещо менші за показники рослинної сировини, дослідженої раніше (табл. 6.1, 6.3, 6.4). Незважаючи на це, буряковий жом залишається перспективною сировиною для виготовлення твердого палива, оскільки його енергетичні характеристики є достатніми для ефективного використання у паливній промисловості, згідно діючих європейських стандартів [212].

Яблучні вичавки

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик яблучних вичавок наведено у табл. 6.6.

Усереднене значення вищої теплотворної здатності яблучних вичавок становить ≈ 18592 кДж/кг або ≈ 4443 ккал/кг (табл. 6.6).

Таблиця 6.6

Результати експериментального визначення теплотворної здатності яблучних вичавок за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,32980	0,59917	94,9	1,8	60,7	18691	4467
2	0,35766	0,64960	114,4	1,8	45,9	18598	4445
3	0,34307	0,61911	107,3	4,1	46,9	18486	4418
<i>Середнє значення:</i>						18592	4443

Зольність досліджуваних зразків яблучних вичавок знаходилась в межах $0,6 \div 1,1$ % мас. Середнє значення зольності досліджуваних зразків яблучних вичавок становило 0,8 % мас.

Середнє значення вологості яблучних вичавок на момент експерименту становило 9,99 %.

Значення теплотворної здатності досліджуваного матеріалу свідчить про перспективність подальших досліджень для виготовлення дослідних зразків твердого палива з яблучних вичавок.

Жолуді

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) наведено у табл. 6.7.

Усереднене значення вищої теплотворної здатності жолудів згідно результатів експериментальних досліджень становить ≈ 18163 кДж/кг або ≈ 4341 ккал/кг (табл. 6.7).

Таблиця 6.7

Результати експериментального визначення теплотворної здатності жолудів за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	$q_{тер}$, Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,75181	1,47688	153,3	2,1	58,1	1572,6	18107	4328
2	0,87114	1,70907	141,7	2,1	98,6	1772,3	18215	4353
3	0,88123	1,71231	154,4	1,2	142	1695,6	18168	4342
<i>Середнє значення:</i>							18163	4341

Зольність досліджуваних зразків жолудів знаходилась в межах $0,8 \div 0,9$ % мас. Середнє значення зольності становило 0,9 % мас.

Середнє значення вологості жолудів на момент експерименту становило 4,48 %.

Значення теплотворної здатності досліджуваного матеріалу дещо вищі за показники для швидкоростучих рослин (табл. 6.2).

Каштани

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) наведено у табл. 6.8.

Таблиця 6.8

Результати експериментального визначення теплотворної здатності каштанів за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	$q_{тер}$ амп, Дж	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,25210	0,53851	1196	86,1	1.2	90,2	17372	4152
2	0,27107	0,56328	1057	107,2	0.6	78,7	17496	4182
3	0,16359	0,42180	1412	110,5	0.6	67,2	17780	4249
Середнє значення:							17549	4194

Визначене усереднене значення вищої теплотворної здатності каштанів згідно результатів експериментальних досліджень становить ≈ 17549 кДж/кг або ≈ 4194 ккал/кг (табл. 6.8).

Середнє значення зольності досліджуваних зразків каштанів становило 1,3 % мас. Середнє значення вологості каштанів на момент експерименту становило 6,83 %.

Одержані експериментальні дані свідчать про перспективність проведення досліджень щодо створення альтернативного твердого палива з дослідженої вторинної сировини рослинного походження, оскільки вона володіє високою теплотворною здатністю, що є на рівні існуючих аналогів, а також відносно невисокими показниками зольності.

Отримані значення теплотворної здатності дослідженої вторинної сировини рослинного походження свідчить про перспективність використання для виготовлення альтернативного твердого палива. Зважаючи на це, подальші дослідження були проведені для визначення теплотворних характеристик сформованого твердого палива.

6.2. Дослідження енергетичних характеристик брикетованої вторинної сировини рослинного походження

Однією із найуживаніших форм твердого палива є брикети. Методика створення брикетованих зрізів альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження описана у розділі 2.3.9.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Було виконане пресування кукурудзяної післяспиртової барди за тиску 100 кгс/см² та температури у прес-формі 150 °С протягом 60 с (зразок №1), 120 с (зразок №2) та 180 с (зразок №3) з метою одержання дослідних зразків твердопаливних брикетів. Як результат проведених досліджень було отримано дослідні брикетовані зразки твердого палива, які володіють міцністю та сталою формою.

Результат пресування кукурудзяної післяспиртової барди у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.1. Відмітимо, що для пресування досліджуваного матеріалу було використано нижчий тиск у гідравлічному пресі, ніж рекомендовано авторами [26].



Рис. 6.1. Дослідний брикетований зразок твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди (зразок №1)

Додавання зв'язуючих речовин при виготовленні брикетів із кукурудзяної післяспиртової барди не вимагається, що є додатковою перевагою. Охолоджене тверде паливо готове до використання.

Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних брикетованих зразків з кукурудзяної післяспиртової барди наведено у табл. 6.9.

Таблиця 6.9

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів із кукурудзяної післяспиртової барди за даними калориметрії спалювання

№ дослідю	m, г	$\Delta T, B$	$q_{тер}$ амп, Дж	q_n Дж	q_{HNO_3} Дж	q_c Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
Зразок №1								
1	0,53400	1,25163	904,0	134,5	14,8	65,6	22405	5354
2	0,52670	1,26037	1122,0	76,8	15,9	44,3	22540	5387
3	0,55335	1,19907	-	121,9	19,8	123,0	22390	5351
<i>Середнє значення:</i>							22445	5364
Зразок № 2								
1	0,38925	0,90192	-	92,7	14,8	95,1	23945	5723
2	0,35283	0,82550	-	103,6	7,7	91,8	24155	5773
3	0,47070	1,08325	-	89,4	12,4	190,2	24002	5736
<i>Середнє значення:</i>							24034	5744
Зразок № 3								
1	0,24217	0,63235	-	120,8	7,7	45,9	26679	6376
2	0,25820	0,66858	-	107,7	7,4	41,3	26509	6336
<i>Середнє значення:</i>							26594	6356

В усіх зразках показники вологості становили орієнтовно 1%. Щодо зольності одержаних брикетованих зразків, то показники були наступні (табл. 6.10):

Таблиця 6.10

Результати експериментального визначення зольності брикетів із кукурудзяної післяспиртової барди за даними калориметрії спалювання

№ зразка	Середній вміст золи, % мас.
1	0,6÷1,1
2	1,2÷1,6
3	0,8÷1,0

При порівнянні експериментальних даних з табл. 6.1 та табл. 6.9 бачимо, що вища теплотворна здатність брикетованого твердого палива є вищою за значення несформованої досліджуваної сировини (≈ 19545 кДж/кг, табл. 6.1) – найімовірніше за рахунок додаткової втрати вологи під час пресування за підвищеної температури, а також збільшення щільності та густини одержаного брикету. Це додатково підтверджується тим, що із збільшенням часу пресування зразка, його середнє значення теплотворної здатності зростає (табл. 6.9). Протягом більшого часу пресування з матеріалу виділяється більша кількість вологи, що впливає на значення теплотворної здатності, оскільки при спалюванні частина енергії йде виділення залишкової вологості.

Що стосується значень зольності одержаних брикетованих зразків, то закономірностей із зміною часу пресування та їх теплотворною здатністю не спостерігається.

Відмітимо, що зразки №2 та №3 були візуально обпаленими після пресування, що свідчить про критичне значення часу перебування у прес-формі ≥ 120 с за температури 150 °С та необхідність визначення оптимального часу перебування сировини у прес-формі.

Отримані дослідні брикетовані зразки твердого палива зберігалися на відкритому повітрі протягом декількох місяців для дослідження збереження механічних властивостей при зберіганні. У жодному дослідженому зразку видимих змін не спостерігалось.

Додатково відмітимо, що використання для одержання брикетованих зразків твердого палива із кукурудзяної післяспиртової барди, що не пройшла стадію осушування (вологість зразків $\sim 66\%$ мас.), негативно впливає на ствердлу форму брикети та її механічну міцність – при формуванні палива за підвищеної температури утворюються тріщини та розломи внаслідок надлишкового тиску вологи, що випаровується.

Ячмінна пивна дробина

Внаслідок пресування ячмінної пивної дробини за тиску 100 кгс/см^2 та температури у прес-формі $150 \text{ }^\circ\text{C}$ протягом 60 с, 120 с та 180 с було виготовлено 3 брикетованих дослідні зрізці: зразок №1, зразок №2, зразок №3 відповідно.

Результат пресування ячмінної пивної дробини у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.1.



Рис. 6.2. Дослідний брикетований зразок твердого палива з ячмінної пивної дробини (зразок №1)

Як і у випадку пресування кукурудзяної післяспиртової барди, формування брикет відбувалося без додавання додаткових в'язучих речовин.

Результати дослідження вищої теплотворної здатності зразків виготовлених твердопаливних брикет з ячмінної пивної дробини наведено у табл. 6.11.

Отримані дослідні зразки було досліджено на вміст залишкової вологи, який знаходиться в межах $0,5 \div 1,5\%$, та кількості золи – $1,5 \div 1,6\%$ мас.

Порівнюючи значення теплотворної здатності ячмінної пивної дробини ($\approx 20005 \text{ кДж/кг}$, табл. 6.3) та брикетованих зразків (табл. 6.11), видно що це значення є вищим у сформованого твердого палива – експериментальні дані

свідчать, що із збільшенням часу пресування вища теплотворна здатність брикетованого зразка також зростає (табл. 6.11).

Таблиця 6.11

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів із ячмінної пивної дробини за даними калориметрії спалювання

№ дослідю	m , г	ΔT , В	$q_{тер}$ $амп$, Дж	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
Взірець № 1								
1	0,50326	0,98698	-	64,2	18,6	45,8	20221	4833
2	0,36344	0,70996	-	69,8	7,7	70,5	20195	4826
3	0,46443	0,90688	-	86,1	11,2	49,2	20103	4804
<i>Середнє значення:</i>							20173	4821
Взірець № 2								
1	0,81632	1,59860	-	78,2	23,0	123,0	20291	4850
2	0,71032	1,39261	-	92,6	26,3	64,0	20210	4830
3	0,47525	0,93379	-	87,7	13,9	29,5	20180	4823
<i>Середнє значення:</i>							20227	4834
Взірець № 3								
1	0,42690	0,83547	-	75,5	6,8	54,1	20186	4825
2	0,77603	1,52280	-	87,1	19,8	80,4	20272	4845
3	0,91658	1,81498	-	89,3	26,0	65,6	20437	4885
<i>Середнє значення:</i>							20298	4851

Як і у попередньому випадку із брикетованими зразками із кукурудзяної післяспиртової барди, із збільшенням часу пресуванням відбувається обпалення брикет, в результаті чого помітні зовнішні візуальні зміни. Зважаючи на те, що зразки №2 та №3 були візуально обпаленими після пресування та високу теплотворну здатність виготовлених зразків за часу пресування 60 с (табл. 6.9,

6.11) – для подальших досліджень використовували саме цей час пресування для брикетованих взірців.

Відходи кавового виробництва

Пресування відходів виробництва кави проводили за постійного тиску 100 кгс/см² протягом 60 с, з огляду на зроблені попередні висновки. Результат пресування відходів виробництва кави у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.3.



Рис. 6.3. Дослідний брикетований зразок твердого палива з відходів виробництва кави

Додаткові в'язучі речовини для формування брикетованих взірців також не використовували. Отримані дослідні зразки твердого палива, було піддано комплексним дослідженням для визначення теплотворних характеристик. Результати дослідження вищої теплотворної здатності зразків виготовлених твердопаливних брикет з відходів виробництва кави наведено у табл. 6.12.

Таблиця 6.12

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів із відходів виробництва кави за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m, г	$\Delta T, \text{В}$	$q_{\text{тер}}$ амп, Дж	$q_n,$ Дж	$q_{\text{HNO}_3},$ Дж	$q_c,$ Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	1,24682	2,66923	-	79,3	24,5	97,6	22148	5294
2	1,56269	3,35161	-	89,6	23,6	65,1	22163	5297
3	1,30903	2,80358	-	86,9	18,6	64,8	22131	5289
Середнє значення:							22147	5293

Отримані експериментальні дані вмісту залишкової вологості та зольності досліджених зразків становлять $\sim 1\%$ мас.

Значення вищої теплотворної здатності брикетованих взірців з відходів виробництва кави (табл. 6.12) є вищим, ніж у несформованого матеріалу (≈ 21583 кДж/кг, табл. 6.4). Дані експерименту підтверджують попередні висновки про вплив вмісту води на теплотворну здатність.

Буряковий жом

Результат пресування бурякового жому у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.4. Додаткові в'язучі речовини для формування брикетованих взірців не використовували.

Результати дослідження теплотворної здатності зразків виготовлених твердопаливних брикет з бурякового жому наведено у табл. 6.12.



Рис. 6.4. Дослідний брикетований зразок твердого палива з бурякового жому

Таблиця 6.13

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів з бурякового жому за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,66682	1,0450	77,5	7,7	168,9	16343	3906
2	0,58597	0,91697	83,9	5,9	144,3	16286	3892
3	0,93860	1,4664	76,8	8,9	234,5	16325	3902
<i>Середнє значення:</i>						16318	3900

Вологість усіх досліджених брикетованих зразків становила <1% мас. Зольність брикетованих зразків з бурякового жому знаходилась в межах $4,7 \div 5,0$ % мас. Середнє значення зольності становило 4,8 % мас.

Як видно з даних, наведених у табл. 6.13, значення вищої теплотворної здатності брикетованого палива з бурякового жому є також вищим, ніж у несформованого осушеного матеріалу (≈ 15900 кДж/кг, табл. 6.5).

Яблучні вичавки

Результат пресування яблучних вичавок у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.5. Додаткові в'язучі речовини для формування брикетованих зразків не використовували.



Рис. 6.5. Дослідний брикетований зразок твердого палива з яблучних вичавок

Результати дослідження теплотворної здатності зразків виготовлених твердопаливних брикет з яблучних вичавок наведено у табл. 6.14.

Таблиця 6.14

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів з яблучних вичавок за даними калориметрії спалювання

№ дослідю	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,78093	1,4751	80,9	9,4	55,8	19502	4661
2	0,76471	1,4366	99,8	8,3	55,8	19371	4630
3	0,92478	1,7396	88,1	9,4	75,4	19442	4647
<i>Середнє значення:</i>						19438	4646

Вологість усіх досліджених зрізків становила $< 1\%$. Зольність брикетованих зразків з яблучних вичавок знаходилась в межах $0,29 \div 0,87 \%$ мас. Середнє значення зольності становило $0,55 \%$ мас.

Значення вищої теплотворної здатності брикетованих зрізків з яблучних вичавок (табл. 6.14) є вищим, ніж у несформованого матеріалу (≈ 18592 кДж/кг, табл. 6.6), що підтверджує попередні спостереження під час проведення експериментальних досліджень.

Жолуді

З урахуванням високого вмісту лігніну, отримання брикет відбувалося без додавання додаткових в'язучих речовин. У результаті пресування було отримано готові до використання брикетовані зразки альтернативного твердого палива з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) (рис. 6.6).

Дані результатів дослідження вищої теплотворної здатності брикетованих зразків із жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) наведено у табл. 6.15.

Зольність брикетованих зразків з яблучних вичавок знаходилась в межах $1,15 \div 1,25 \%$ мас. Середнє значення зольності становило $1,22 \%$ мас.



Рис. 6.6. Дослідний брикетований зразок твердого палива з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*)

Вологість усіх отриманих зрізків становила $< 1\%$ мас.

Відмітимо, що після формування брикетованих зразків твердого палива з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) значення вищої теплотворної здатності дещо знижується (табл. 6.7, 6.14), що може бути пов'язано із виділенням летких органічних сполук з високою теплотворною здатністю під час

процесу пресування за температури 150 °С. Відповідь на дане питання потребує додаткових досліджень та аналізу утворюваних під час пресування газів та пари.

Таблиця 6.15

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) за даними калориметрії спалювання

№ дослідю	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	q_{ter} , Дж	Q,	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,98351	1,65471	116,6	1,2	104,8	-	17397	4158
2	1,05626	1,77734	131,1	2,4	143,8	-	17422	4164
3	1,68586	2,84317	82,4	3,0	109,2	-	17466	4174
Середнє значення:							17428	4165

Каштани

Результат пресування каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) у дослідний брикетований зразок наведено на рис. 6.7. Додаткові в'яжучі речовини для формування брикетованих зразків аналогічно не використовували.



Рис. 6.7. Дослідний брикетований зразок твердого палива з каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*)

Результати дослідження теплотворної здатності зразків виготовлених твердопаливних брикет з яблучних вичавок наведено у табл. 6.16.

Отримані результати калориметричного спалювання (табл. 6.8, 6.15) брикетованих дослідних сумішей з плодів гіркокаштану звичайного вказують на

збільшення середнього значення вищої теплотворної здатності твердопаливних брикетів у результаті формування матеріалу.

Таблиця 6.16

Результати експериментального визначення теплотворної здатності брикетів з каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) за даними калориметрії спалювання

№ дослідду	m, г	ΔT , В	$q_{тер}$ амп, Дж	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q	
							кДж/кг	ккал/кг
1	0,82647	1,4816	-	87,8	8,9	300,1	18797	4493
2	0,97315	1,7484	-	75,6	4,1	321,4	18840	4503
3	0,75804	1,3763	-	96,0	7,7	165,6	18869	4510
Середнє значення:							18835	4502

Середнє значення зольності брикетованих зразків з каштанів становило 4,1 % мас. Звернемо увагу на зростання показника зольності, що може бути пов'язано із залишками піску чи ґрунту на оболонці плода гіркокаштану у біомасі, що використовувалася для виготовлення брикетованого зразка.

Залишкова вологість усіх дослідних зразків становила <1 % мас.

Таким чином, у результаті проведених досліджень було створено брикетовані зразки альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Експериментальні дослідження теплотворних характеристик виготовлених брикетованих зразків засвідчили свою перспективність для практичного використання: вони володіють достатньою теплотворною здатністю, невисокими показниками зольності та залишкової вологості.

У сформованих брикетованих зразків спостерігається підвищення показників вищої теплотворної здатності, що пов'язано із випаровуванням залишкової вологи з досліджуваного матеріалу під час пресування у гідравлічному пресі за підвищеної температури.

Визначені характеристики виготовлених брикетованих взірців – отримані експериментально дані про вищу теплотворну здатність, зольність та вміст залишкової вологи – повністю відповідають або дуже наближені до існуючих вимог європейських стандартів до твердого палива. Наприклад, до шведського стандарту SS 187120, згідно з яким альтернативне паливо повинно мати наступні характеристики: теплотворна здатність (>16910 кДж/кг), зольність ($<1,5\%$), залишкова вологість ($<10\%$), а також до німецького стандарту DIN 51731: теплотворна здатність ($15512\div 19515$ кДж/кг), зольність ($<1,5\%$), залишкова вологість ($<12\%$) [212]. Можливим вирішенням проблеми невідповідності є створення композитного брикетованого твердого палива із різної вторинної сировини, що вимагає подальших додаткових досліджень, хоча, є перспективним, зважаючи на попередній досвід використання ячмінних висівок разом із відходами виробництва кави у двокомпонентній вихідній суміші для створення альтернативного твердого палива, що дозволило регулювати значення основних параметрів – вищої теплотворної здатності, зольності, вологості – для відповідності існуючим стандартам [213].

6.3. Дослідження енергетичних характеристик гранульованої вторинної сировини рослинного походження

Іншою поширеною формою використання твердого палива є гранули [25]. Методику створення гранульованих зразків альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження наведено у розділі 2.3.10.

Кукурудзяна післяспиртова барда

За допомогою гранулятора Pelletnik-150 було виконано гранулювання осушеної кукурудзяної післяспиртової барди та виготовлено зразки гранульованого твердого палива. Гранульоване тверде паливо одразу готове до використання.

Результат гранулювання кукурудзяної післяспиртової барди у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.8.



Рис. 6.8. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з кукурудзяної післяспиртової барди

Аналогічно до несформованої сировини та брикетованих зразків твердого палива, було виконано дослідження теплотворної здатності створених твердопаливних гранул. Результати проведення калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з кукурудзяної післяспиртової барди наведено у табл. 6.17.

Таблиця 6.17

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул із кукурудзяної післяспиртової барди за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,62448	1,22953	70,2	16,5	167,3	20503	4900
2	0,78913	1,54563	90,9	28,9	177,4	20341	4862
3	0,88935	1,75615	87,2	31,3	127,1	20443	4886
<i>Середнє значення:</i>						20429	4883

Залишкова вологість досліджених гранул з кукурудзяної післяспиртової барди становила 8,3 % мас. Зольність гранульованих зразків знаходилась в межах 0,9÷1,0 % мас. Середнє значення зольності становило 1 % мас.

Аналіз експериментальних даних табл. 6.1, 6.9 та 6.17 свідчить, що вища теплотворна здатність для кукурудзяної післяспиртової барди зростає у ряду:

несформована сировина < гранули < брикети

Ячмінна пивна дробина

Результат гранулювання ячмінної пивної дробини у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.9. Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з ячмінної пивної дробини наведено у табл. 6.18.

Таблиця 6.18

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з ячмінної пивної дробини за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,49467	0,91015	111,4	15,6	88,5	18962	4532
2	0,61652	1,13699	101,3	13,3	85,4	19037	4550
3	0.61373	1,13510	75,2	14,2	64,0	19097	4564
<i>Середнє значення:</i>						19033	4549



Рис. 6.9. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з ячмінної пивної дробини

Залишкова вологість досліджених гранул з ячмінної пивної дробини становила 9,2 % мас. Зольність гранульованих зразків знаходилась в межах $1,7 \div 6,3$ % мас. Середнє значення зольності гранул становило 4,6 % мас.

Аналіз експериментальних даних табл. 6.3, 6.11 та 6.18 свідчить, що вища теплотворна здатність для твердого палива з ячмінної пивної дробини зростає у ряду:

гранули < несформована сировина < брикети

У даному випадку є чітка кореляція із дослідженою залишковою вологістю несформованої сировини та твердопаливних зразків.

Відходи кавового виробництва

Результат гранулювання відходів виробництва кави у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.10.

Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з відходів виробництва кави наведено у табл. 6.19. Із аналізу експериментальних даних табл. 6.4, 6.12 та 6.19 робимо висновок про те, що вища теплотворна здатність для твердого палива з відходів виробництва кави зростає у ряду:

несформована сировина < брикети < гранули



Рис. 6.10. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з відходів виробництва кави

Таблиця 6.19

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з відходів виробництва кави за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,69940	1,55702	103,6	12,1	91,3	23002	5498
2	0,77795	1,75428	101,2	14,2	44,8	23244	5555
3	0,59938	1,35830	118,9	18,9	62,3	23324	5575
<i>Середнє значення:</i>						23190	5543

Як бачимо із аналізу значень теплотворної здатності твердопаливних зразків для кукурудзяної післяспиртової барди, ячмінної пивної дробини та відходів виробництва кави, кореляція між даними значеннями та значеннями залишкової вологості відсутня. Дана ситуація може бути пов'язана із природною неоднорідністю рослинної сировини, або розподілом речовин її складу у біомасі.

Зольність гранульованих зразків з відходів виробництва кави знаходилась в межах 1,5÷1,9 % мас. Середнє значення зольності гранул становило 1,6 % мас.

Залишкова вологість досліджених гранул з відходів виробництва кави становила 8,9 % мас.

Буряковий жом

Результат гранулювання бурякового жому у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.11. Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з бурякового жому подано у табл. 6.20.

Зольність гранульованих зразків з бурякового жому знаходилась в межах 5,0÷5,4 % мас. Середнє значення зольності гранул становило 5,2 % мас. Твердопаливні зразки з бурякового жому характеризуються найвищими показниками зольності серед дослідженої вторинної сировини рослинного походження.



Рис. 6.11. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з бурякового жому

Таблиця 6.20

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з бурякового жому за даними калориметрії спалювання

№ дослідю	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,89112	1,32675	78,2	3,5	95,1	15422	3686
2	0,75550	1,12682	84,9	3,5	152,7	15519	3709
3	0,93088	1,38466	60,8	8,9	172,2	15502	3705
<i>Середнє значення:</i>						15481	3700

Залишкова вологість досліджених гранул становила 8,6 % мас.

Із аналізу експериментальних даних табл. 6.5, 6.13 та 6.20 робимо висновок про те, що вища теплотворна здатність для твердого палива з бурякового жому зростає у ряду:

гранули < несформована сировина < брикети

Відмітимо, що буряковий жом володіє найнижчою теплотворною здатністю серед зразків, виготовлених з дослідженої вторинної сировини рослинного походження.

Яблучні вичавки

Результат гранулювання яблучних вичавок у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.12.



Рис. 6.12. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з яблучних вичавок

Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з яблучних вичавок подано у табл. 6.21.

Таблиця 6.21

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з яблучних вичавок за даними калориметрії спалювання

№ досліду	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,90030	1,61298	97,1	6,2	99,2	18535	4430
2	0,79934	1,42671	85,2	13,0	102,5	18475	4415
3	0,81080	1,44205	88,9	16,5	91,7	18388	4395
<i>Середнє значення:</i>						18466	4413

Залишкова вологість досліджених гранул з яблучних вичавок становила 8,6 % мас. Зольність гранульованих зразків з яблучних вичавок знаходилась в межах 0,8÷1,2 % мас. Середнє значення зольності гранул становило 1,1 % мас.

Аналіз експериментальних даних табл. 6.6, 6.14 та 6.21 свідчить, що вища теплотворна здатність для твердого палива з яблучних вичавок, аналогічно до твердого палива з ячмінної пивної дробини та бурякового жому, зростає у ряду:

гранули < несформована сировина < брикети

Жолуді

Результат гранулювання жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.13. Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) наведено у табл. 6.22.

Таблиця 6.22

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m, г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,87225	1,41124	79,4	3,5	105,0	16768	4008
2	0,81641	1,31851	85,4	4,1	162,7	16802	4016
3	0,81790	1,32222	80,2	5,3	112,6	16762	4006
<i>Середнє значення:</i>						16777	4010

Залишкова вологість досліджених гранул з жолудів становила 9,4 % мас. Зольність гранульованих зразків знаходилась в межах 1,4÷1,6 % мас., середнє значення зольності становило 1,6 % мас.

Аналіз експериментальних даних табл. 6.7, 6.15 та 6.22 свідчить, що вища теплотворна здатність для твердого палива з жолудів дубу звичайного, зростає у ряду:

гранули < брикети < несформована сировина



Рис. 6.13. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*)

Каштани

Результат гранулювання каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) у дослідні сформовані зразки наведено на рис. 6.14. Результати виконання калориметричних досліджень теплотворних характеристик дослідних гранульованих зразків з каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) наведено у табл. 6.23.

Таблиця 6.23

Результати експериментального визначення теплотворної здатності гранул з каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) за даними калориметрії спалювання

№ досліджу	m , г	ΔT , В	q_n , Дж	q_{HNO_3} , Дж	q_c , Дж	Q,	
						кДж/кг	ккал/кг
1	0,79452	1,33247	90,7	7,7	198,4	17480	4178
2	0,90230	1,51534	96,9	5,3	226,2	17516	4186
3	0,62025	1,04337	69,7	1,8	179,9	17582	4202
Середнє значення:						17526	4189

Залишкова вологість досліджених гранул з каштанів становила 9,3 % мас.

Зольність гранульованих зразків знаходилась в межах $3,1 \div 3,8$ % мас., середнє значення зольності становило 3,4 % мас.



Рис. 6.14. Дослідні гранульовані зразки твердого палива з каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*)

Аналіз експериментальних даних табл. 6.8, 6.16 та 6.23 показує, що вища теплотворна здатність для твердого палива з каштанів, аналогічно до твердого палива з ячмінної пивної дробини, бурякового жому та яблучних вичавок, зростає у ряду:

гранули < несформована сировина < брикети

Таким чином, виготовлені гранульовані зразки твердого палива з дослідженої вторинної сировини рослинного походження засвідчили перспективність практичного використання, зважаючи на високі показники теплотворної здатності, відносно невисоку залишкову зольність та вологість.

Перспективою подальших досліджень є аналіз тривалості горіння дослідних зразків, а також аналіз вмісту утворених при спалюванні газів.

Також перспективним є створення композиційних твердопаливних зразків з різної вторинної сировини для вирівнювання основних параметрів, теплотворної здатності та зольності зокрема, зважаючи на досвід попередніх досліджень [50].

Висновки до шостого розділу

1. Визначено теплотворні характеристики несформованої вторинної сировини рослинного походження – вищу теплотворну здатність, зольність та залишкову вологість. Показано перспективність використання досліджуваної вторинної сировини рослинного походження як альтернативного твердого палива.
2. Виготовлено брикетовані зразки твердого палива з вторинної сировини рослинного походження за допомогою пресування у гідравлічному пресі. Визначено теплотворні характеристики створених брикетованих твердопаливних зразків. Показано, що у сформованих брикетованих зразків спостерігається підвищення показників вищої теплотворної здатності у порівнянні із несформованою сировиною. Визначено, що виготовлені брикетовані зразки повністю відповідають існуючим вимогам європейських стандартів до твердого палива.
3. Виготовлено гранульовані зразки твердого палива з вторинної сировини рослинного походження за допомогою гранулятора. Визначено теплотворні характеристики створених гранульованих твердопаливних зразків. Визначено, що теплотворні характеристики гранульованих зразків близькі до значень твердопаливних брикетованих зразків та несформованої сировини.
4. Показано перспективність практичного використання альтернативного твердого палива з дослідженої вторинної сировини рослинного походження.
5. Основні результати досліджень опубліковані в роботах [50–52, 202, 214–226].

РОЗДІЛ 7

ЕКОНОМІЧНІ АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА ОСНОВІ ВТОРИННОЇ СИРОВИНИ РОСЛИННОГО ПОХОДЖЕННЯ

Пошук технологічно доцільних параметрів процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження є важливим з міркувань ефективності та економічної вигоди. До регульованих параметрів фільтраційного сушіння насамперед відносяться висота шару осушуваного матеріалу, температура теплового агенту та швидкість його руху. Встановлення технологічно доцільних параметрів сушіння дозволяє досягти найменших енергетичних затрат на видалення вологи з вторинної сировини рослинного походження, забезпечуючи при цьому збереження корисних властивостей матеріалу та прийнятну ціну отриманої осушеної сировини. Таким чином, пошук технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння є важливим етапом для проектування сушильного обладнання – для подальшого вторинного використання вторинної сировини рослинного походження, що допомагає забезпечити раціональне використання ресурсів та збереження навколишнього середовища.

Технологічно доцільні параметри проведення процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження буде розраховано, зважаючи на одержані експериментальні дані, представлені у розділах 3 та 4. У розділі 6 було проаналізовано теплотворні характеристики виготовленого альтернативного твердого палива на основі досліджуваної сировини.

Метою даного розділу було визначення технологічно доцільних параметрів процесу фільтраційного сушіння дослідженої вторинної сировини рослинного походження, пропозиція апаратурного оформлення для промислової реалізації процесу та принципової блок-схеми відділення приготування твердого

палива на її основі, а також виконати порівняльну калькуляцію енергетичної ефективності даних процесів.

7.1. Визначення технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі експериментальних даних

Визначення технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на експериментальній установці було розраховано наступним чином, виходячи із міркувань, що енергія для процесу осушення, в основному, витрачається на нагрів теплового агенту та подолання тепловим агентом гідравлічного опору шару вологого матеріалу. Таким чином, загальні енерговитрати на випаровування 1 кг вологи за фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження Q^{lab} розраховували за рівнянням:

$$Q^{lab} = Q_{t.a.}^{lab} + Q_{\Delta P}^{lab}, \quad (7.1)$$

де $Q_{t.a.}^{lab}$ – енергетичні витрати на нагрів теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару досліджуваного матеріалу, кДж/кг H₂O;

$Q_{\Delta P}^{lab}$ – енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару досліджуваного матеріалу для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу, кДж/кг H₂O.

Енергетичні витрати на нагрів теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару досліджуваного матеріалу $Q_{t.a.}^{lab}$ було визначено за класичним видозміненим рівнянням [227]:

$$Q_{t.a.}^{lab} = \frac{c_{t.a.} \cdot G_{t.a.}^{lab} \cdot (T_1 - T_0) \cdot \tau}{\eta_{t.a.} \cdot W^{lab}}, \quad (7.2)$$

де $c_{t.a.}$ – теплоємність повітря, кДж/кг·°С;

$G_{t.a.}^{lab}$ – масова витрата теплового агенту, кг/с;

T_1 – початкова температура теплового агенту, °С;

T_0 – температура навколишнього середовища, °С;

$\eta_{t.a.}$ – коефіцієнт, який враховує втрати тепла у навколишнє середовище, згідно рекомендацій [227]: $\eta_{t.a.} = 0,6$;

W^{lab} – кількість вологи, яка випарувалась, кг.

У свою чергу, енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару досліджуваного матеріалу для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу під час фільтраційного сушіння $Q_{\Delta P}^{lab}$ визначали за рівнянням [228]:

$$Q_{\Delta P}^{lab} = \frac{\Delta P \cdot V_{t.a.}^{lab} \cdot \tau}{\eta_{\Delta P} \cdot W^{lab} \cdot 1000}, \quad (7.3)$$

де ΔP – втрати тиску у шарі досліджуваного матеріалу, Па;

$V_{t.a.}^{lab}$ – об'ємна витрата теплового агента, м³/с;

$\eta_{\Delta P}$ – коефіцієнт, який враховує втрати електроенергії, згідно рекомендацій [228]:

$\eta_{\Delta P} = 0,5$.

Масову витрату $G_{t.a.}^{lab}$ теплового агента було розраховано за рівнянням:

$$G_{t.a.}^{lab} = S \cdot v_0 \cdot \rho_{t.a.}, \quad (7.4)$$

де S – площа поперечного перерізу циліндричного контейнера 5 (рис. 2.11) експериментальної установки для фільтраційного сушіння (рис. 2.10), м², $S = 7,539 \cdot 10^{-3}$ м²;

v_0 – швидкість руху теплового агента, м/с;

$\rho_{t.a.}$ – густина теплового агента, кг/м³.

Значення вологовмісту досліджуваного матеріалу w^c визначали за рівнянням:

$$w^c = \frac{\omega}{100 - \omega}, \quad (7.5)$$

де ω – вологість досліджуваного матеріалу, % мас.

Кількість вологи W^{lab} , що випарувалась, визначали згідно матеріального балансу:

$$G_1 = G_2 + W^{lab}, \quad (7.6)$$

$$W^{lab} = G_1 - G_2, \quad (7.7)$$

де G_1, G_2 – відповідно, початкова та кінцева маса вологого матеріалу, кг.

Кінцеву масу вологого матеріалу G_2 розраховували за даними значень початкової та кінцевої вологості досліджуваного матеріалу:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100 - \omega_2} \quad (7.8)$$

де ω_1, ω_2 – відповідно, початкова та кінцева вологість досліджуваного матеріалу, % мас.

Втрати тиску у шарі досліджуваного матеріалу ΔP визначали за запропонованими критеріальними рівняннями згідно даних експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агенту у розділі 3.2.

Тривалість процесу фільтраційного сушіння було розраховано за запропонованими для кожного виду вторинної сировини рослинного походження рівняннями у розділі 4.2 із врахуванням уточнюючого коефіцієнта $K_{\tau II} = 0,7 \div 0,9$ для врахування затрат теплоти на випаровування зв'язаної вологи та нагрівання вологого матеріалу у періоді часткового насичення теплового агенту вологою, як було зазначено у розділі 2.3.4.

Осушення було розраховано від початкової вологості матеріалу ω_1 до кінцевого значення $\omega_2 = 14$ % (мас.), обраного як найвище із значень $7 \div 14$ % (мас.), рекомендованих для тривалого зберігання біомаси та формування альтернативного твердого палива [51].

Кукурудзяна післяспиртова барда

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.1 та табл. 7.2, номери експериментів у табл. 7.1 та 7.2 співпадають.

Необхідно відмітити хорошу кореляцію розрахованих значень тривалості фільтраційного сушіння та гідравлічного опору шару матеріалу (табл. 7.1) із експериментально одержаними даними (рис. 3.2, рис. 4.1–4.3).

Таблиця 7.1

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_l , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с	
1	0,04	70	1,76	1,029	0,123	0,084	0,014	0,013	2346	535	
2	0,08			1,029	0,246	0,168	0,014	0,013	4691	1034	
3	0,12			1,029	0,369	0,252	0,014	0,013	7037	1854	
4	0,16			1,029	0,492	0,336	0,014	0,013	9382	2931	
5	0,12	60	1,76	1,06	0,369	0,252	0,014	0,013	7037	2300	
6		80		1	0,369	0,252	0,013	0,013	7037	1604	
7		90		0,972	0,369	0,252	0,013	0,013	7037	1399	
8		70		1,24	1,029	0,369	0,252	0,010	0,009	3826	2069
9				2,29	1,029	0,369	0,252	0,018	0,017	11287	1756
10				2,82	1,029	0,369	0,252	0,022	0,021	16522	1637

Таблиця 7.2

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, 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	7309,569	2,030	395,935	0,110	7705,503	2,140
2	7071,031	1,964	766,028	0,213	7837,059	2,177
3	8450,220	2,347	1373,160	0,381	9823,379	2,729
4	10020,648	2,784	2171,139	0,603	12191,787	3,387
5	8639,258	2,400	1703,527	0,473	10342,785	2,873
6	8526,833	2,369	1188,160	0,330	9714,993	2,699
7	8432,762	2,342	1036,201	0,288	9468,963	2,630

№ експ.	$Q^{lab}_{t.a.}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{t.a.}$, кВт·год/ кг H ₂ O	$Q^{lab}_{\Delta P}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{\Delta P}$, кВт·год/ кг H ₂ O	Q^{lab} , кДж/ кг H ₂ O	N^{lab} , кВт·год/ кг H ₂ O
8	6645,568	1,846	587,130	0,163	7232,698	2,009
9	10413,238	2,893	2714,070	0,754	13127,307	3,646
10	11959,160	3,322	4562,991	1,267	16522,151	4,589

Аналіз питомих енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи з кукурудзяної післяспиртової барди свідчить про наступні залежності: питомі показники енергетичних витрат Q^{lab} зменшуються із зниженням висоти шару матеріалу, зростанням температури теплового агенту та зниженням швидкості його руху (табл. 7.1, 7.2).

За даними виконаного розрахунку, найнижчі енергетичні витрати на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу $Q^{lab}_{t.a.} = 8432,762$ кДж/кг H₂O або $N^{lab}_{t.a.} = 2,342$ кВт/кг H₂O, враховуючи вибір доцільної висоти шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальної тривалості процесу, є для таких параметрів фільтраційного сушіння: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температура теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість руху теплового агенту $v_0 = 1,76$ м/с (експеримент №7, табл. 5.2). За даних параметрів процесу, енергетичні витрати на подолання гідравлічного опору шару вологого матеріалу становлять $Q^{lab}_{\Delta P} = 1036,201$ кДж/кг H₂O або $N^{lab}_{\Delta P} = 0,288$ кВт/кг H₂O.

Таким чином, загальні енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди за технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння $H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с становлять $Q^{lab} = 9468,963$ кДж/кг H₂O або $N^{lab} = 2,630$ кВт/кг H₂O (табл. 7.2).

Ячмінна пивна дробина

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини згідно результатів попередньо проведених

експериментальних досліджень наведено у табл. 7.3 та табл. 7.4, номери експериментів у табл. 7.3 та 7.4 співпадають.

Таблиця 7.3

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_l , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , 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	0,101	0,014	0,014	7030	984	
2	0,08			1,029	0,273	0,202	0,014	0,014	14060	1843	
3	0,12			1,029	0,409	0,304	0,014	0,014	21091	2860	
4	0,16			1,029	0,545	0,405	0,014	0,014	28121	3943	
5	0,12	50	1,81	1,093	0,409	0,304	0,015	0,014	21091	4965	
6		80		1	0,409	0,304	0,014	0,014	21091	2421	
7		90		0,973	0,409	0,304	0,013	0,014	21091	1901	
8		70		1,26	1,029	0,409	0,304	0,010	0,009	12382	4487
9				2,31	1,029	0,409	0,304	0,018	0,017	30750	2604
10				2,82	1,029	0,409	0,304	0,022	0,021	42311	2378

Таблиця 7.4

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q^{lab}_{t.a.}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{t.a.}$, кВт·год/ кг H ₂ O	$Q^{lab}_{\Delta P}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{\Delta P}$, кВт·год/ кг H ₂ O	Q^{lab} , кДж/ кг H ₂ O	N^{lab} , кВт·год/ кг H ₂ O
1	11485,273	3,190	1864,593	0,518	13349,866	3,708
2	10757,104	2,988	3492,754	0,970	14249,858	3,958
3	11129,969	3,092	5420,731	1,506	16550,700	4,597
4	11506,783	3,196	7472,339	2,076	18979,122	5,272
5	12312,316	3,420	9409,090	2,614	21721,406	6,034

№ експ.	$Q^{lab}_{t.a.}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{t.a.}$, кВт·год/ кг H ₂ O	$Q^{lab}_{\Delta P}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{\Delta P}$, кВт·год/ кг H ₂ O	Q^{lab} , кДж/ кг H ₂ O	N^{lab} , кВт·год/ кг H ₂ O
6	10985,082	3,051	4587,767	1,274	15572,849	4,326
7	9792,116	2,720	3602,591	1,001	13394,707	3,721
8	12152,905	3,376	3474,945	0,965	15627,849	4,341
9	12930,605	3,592	9181,953	2,551	22112,558	6,142
10	14418,211	4,005	14087,836	3,913	28506,047	7,918

Аналізуючи сумарні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи з ячмінної пивної дробини (табл. 7.4), спостерігаємо наступні залежності від параметрів фільтраційного сушіння: питомі показники Q^{lab} зменшуються із зниженням висоти шару матеріалу, зростанням температури теплового агенту та зниженням швидкості теплового агенту.

Із врахуванням вибору доцільної висоти шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальної тривалості процесу, згідно даних розрахунку, найнижчі енергетичні витрати на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу $Q^{lab}_{t.a.}$ є для 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. 7.4). За даних параметрів процесу на підігрів теплового агенту треба витратити $Q^{lab}_{t.a.} = 9792,116$ кДж/кг H₂O або 2,720 кВт·год/кг H₂O.

За даних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини Q^{lab} для параметрів експерименту №7 ($H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,81$ м/с), $Q^{lab}_{\Delta P}$ становить 3602,591 кДж/кг H₂O або 1,001 кВт·год/кг H₂O (табл. 7.4).

Загальні енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини за технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння $H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,81$ м/с становлять $Q^{lab} = 13394,707$ кДж/кг H₂O або $N^{lab} = 3,721$ кВт/кг H₂O (табл. 7.4).

Відходи кавового виробництва

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння відходів виробництва кави згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.5 та табл. 7.6, номери експериментів у табл. 7.5 та 7.6 співпадають.

Таблиця 7.5

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_1 , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с	
1	0,04	70	1,76	1,029	0,115	0,078	0,014	0,013	8445	384	
2	0,08			1,029	0,229	0,157	0,014	0,013	16890	678	
3	0,12			1,029	0,344	0,235	0,014	0,013	25335	1039	
4	0,16			1,029	0,459	0,313	0,014	0,013	33780	1581	
5	0,12	60	1,76	1,060	0,344	0,235	0,014	0,013	25335	1419	
6		80		1,000	0,344	0,235	0,013	0,013	25335	848	
7		90		0,972	0,344	0,235	0,013	0,013	25335	627	
8		70		1,24	1,029	0,344	0,235	0,010	0,009	15388	1365
9				2,29	1,029	0,344	0,235	0,018	0,017	37597	853
10				2,82	1,029	0,344	0,235	0,022	0,021	52004	790

Таблиця 7.6

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, кДж/ кг Н ₂ О	$N_{t.a.}^{lab}$, кВт·год/ кг Н ₂ О	$Q_{\Delta P}^{lab}$, кДж/ кг Н ₂ О	$N_{\Delta P}^{lab}$, кВт·год/ кг Н ₂ О	Q^{lab} , кДж/ кг Н ₂ О	N^{lab} , кВт·год/ кг Н ₂ О
1	5642,476	1,567	1100,375	0,306	6742,851	1,873

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, 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
2	4980,096	1,383	1942,400	0,540	6922,495	1,923
3	5082,061	1,412	2973,255	0,826	8055,316	2,238
4	5803,834	1,612	4527,369	1,258	10331,202	2,870
5	5724,116	1,590	4063,686	1,129	9787,801	2,719
6	4836,524	1,343	2426,385	0,674	7262,909	2,017
7	4060,289	1,128	1796,264	0,499	5856,553	1,627
8	4704,847	1,307	1671,889	0,464	6376,736	1,771
9	5433,586	1,509	4717,525	1,310	10151,111	2,820
10	6193,265	1,720	7437,524	2,066	13630,789	3,786

Аналізуючи проведені розрахунки, що наведені у табл. 7.5 та табл. 7.6, та враховуючи доцільну висоту шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальну тривалість процесу сушіння, технологічно доцільними параметрами фільтраційного сушіння є висота шару відходів виробництва кави $H = 120$ мм, температура теплового агента $T = 90$ °С та швидкості його фільтрування крізь стаціонарний шар матеріалу $v_0 = 1,76$ м/с. Загальні енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для фільтраційного сушіння відходів виробництва кави за технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння $H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с становлять $Q^{lab} = 5856,553$ кДж/кг H₂O або $N^{lab} = 1,627$ кВт/кг H₂O (табл. 7.6).

Буряковий жом

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння бурякового жому згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.7 та табл. 7.8, номери експериментів у табл. 7.7 та 7.8 співпадають.

Таблиця 7.7

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння бурякового жому за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_1 , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с
1	0,04	70	1,76	1,029	0,123	0,106	0,014	0,013	2138	1280
2	0,08			1,029	0,246	0,212	0,014	0,013	4277	2211
3	0,12			1,029	0,369	0,318	0,014	0,013	6415	3428
4	0,16			1,029	0,492	0,424	0,014	0,013	8553	5263
5	0,12	60	1,76	1,06	0,369	0,318	0,014	0,013	6415	4328
6		80		1	0,369	0,318	0,013	0,013	6415	2796
7		90		0,972	0,369	0,318	0,013	0,013	6415	2380
8		70		1,24	1,029	0,369	0,318	0,010	0,009	3777

Таблиця 7.8

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння бурякового жому за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, 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	13882,080	3,856	685,482	0,190	14567,562	4,047
2	11989,797	3,330	1184,086	0,329	13173,884	3,659
3	12393,435	3,443	1835,923	0,510	14229,359	3,953
4	14268,394	3,963	2818,231	0,783	17086,625	4,746
5	12892,088	3,581	2317,424	0,644	15209,512	4,225
6	11787,429	3,274	1497,325	0,416	13284,754	3,690
7	11380,004	3,161	1274,754	0,354	12654,758	3,515
8	12867,207	3,574	1122,170	0,312	13989,378	3,886

Аналіз енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи з бурякового жому свідчить про наступні залежності від параметрів фільтраційного методу осушення: питомі показники N^{lab} знижуються із зниженням висоти шару матеріалу, зростанням температури теплового агенту та зниженням швидкості теплового агенту – залежності аналогічні для попередньо дослідженої вторинної сировини рослинного походження (табл. 7.7). На основі виконаних розрахунків, робимо висновок про найраціональніші енергетичні витрати для видалення 1 кг вологи з шару матеріалу за фільтраційного сушіння бурякового жому для параметрів експерименту №7 ($H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с), що становлять 12654,758 кДж/кг H₂O або 3,515 кВт·год /кг H₂O (табл. 7.8).

Яблучні вичавки

Зважаючи на рекомендації, вихідну вторинну сировину рослинного походження рослинну сировину для подальшого використання як твердого палива, доцільно осушувати до вологості ≤ 14 %, що в перерахунку на вологовміст складає орієнтовно $w^c \approx 0,16$ кг H₂O / кг сухого матеріалу. Зважаючи на аналіз визначених попередньо значень рівноважного вологовмісту яблучних вичавок w_e^c для різних температур у розділі 4.2, досягнути необхідного вологовмісту можливо лише за температур 80 °С та 90 °С, оскільки для них значення w_e^c менші за необхідне w^c .

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння яблучних вичавок згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.9 та табл. 7.10, номери експериментів у табл. 7.9 та 7.10 співпадають.

За результатами розрахунків, технологічно доцільними параметрами фільтраційного сушіння яблучних вичавок приймаємо висоту шару осушуваного матеріалу $H = 120$ мм, температуру теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість фільтрування теплового агенту $v_0 = 1,76$ м/с.

За даних параметрів процесу загальні питомі енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи становлять 21990,02 кДж/кг H₂O або 6,108 кВт·год/кг H₂O (табл. 7.10).

Таблиця 7.9

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_l , °C	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с
1	0,12	80	1,76	1	0,404	0,325	0,013	0,013	1912	5804
2	0,12	90	1,76	0,972	0,404	0,325	0,013	0,013	1912	4544

Таблиця 7.10

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння яблучних вичавок за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, кДж/ кг Н ₂ О	$N_{t.a.}^{lab}$, кВт·год/ кг Н ₂ О	$Q_{\Delta P}^{lab}$, кДж/ кг Н ₂ О	$N_{\Delta P}^{lab}$, кВт·год/ кг Н ₂ О	Q^{lab} , кДж/ кг Н ₂ О	N^{lab} , кВт·год/ кг Н ₂ О
1	23970,077	6,658	907,547	0,252	24877,624	6,910
2	21279,545	5,911	710,475	0,197	21990,020	6,108

Жолуді

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння жолудів дубу звичайного (*Quercus robur L.*) згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.11 та табл. 7.12, номери експериментів у табл. 7.11 та 7.12 співпадають.

Аналізуючи розрахунки, що наведені у табл. 7.11 та табл. 7.12, та враховуючи доцільну висоту шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальну тривалість процесу сушіння, технологічно доцільними параметрами фільтраційного сушіння є висота шару жолудів дубу звичайного $H = 120$ мм, температура теплового агента $T = 90$ °C та швидкість його фільтрування $v_0 = 1,76$ м/с. Загальні енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для фільтраційного сушіння жолудів дубу звичайного за технологічно

доцільних параметрів фільтраційного сушіння $H = 120$ мм, $T = 90$ °С, $v_0 = 1,76$ м/с становлять $Q^{lab} = 15335,001$ кДж/кг H_2O або $N^{lab} = 4,260$ кВт/кг H_2O (табл. 7.12).

Таблиця 7.11

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння жолудів за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_l , °С	v_0 , м/с	$\rho_{t.a.}$, кг/м ³	G_l , кг	W , кг	$G_{t.a.}$, кг/с	$V_{t.a.}$, м ³ /с	ΔP , Па	τ , с	
1	0,04	70	1,76	1,029	0,080	0,027	0,014	0,013	7416	268	
2	0,08			1,029	0,159	0,054	0,014	0,013	14831	488	
3	0,12			1,029	0,239	0,082	0,014	0,013	22247	796	
4	0,16			1,029	0,319	0,109	0,014	0,013	29662	1329	
5	0,12	60	1,76	1,060	0,239	0,082	0,014	0,013	22247	911	
6		80		1,000	0,239	0,082	0,013	0,013	22247	684	
7		90		0,972	0,239	0,082	0,013	0,013	22247	593	
8		70		1,98	1,029	0,239	0,082	0,015	0,015	27374	733
9				2,29	1,029	0,239	0,082	0,018	0,017	35484	658
10				2,82	1,029	0,239	0,082	0,022	0,021	51748	572

Таблиця 7.12

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння жолудів за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q^{lab}_{t.a.}$, кДж/ кг H_2O	$N^{lab}_{t.a.}$, кВт·год/ кг H_2O	$Q^{lab}_{\Delta P}$, кДж/ кг H_2O	$N^{lab}_{\Delta P}$, кВт·год/ кг H_2O	Q^{lab} , кДж/ кг H_2O	N^{lab} , кВт·год/ кг H_2O
1	11331,319	3,148	1940,420	0,539	13271,739	3,687
2	10306,323	2,863	3529,791	0,980	13836,114	3,843
3	11215,568	3,115	5761,794	1,600	16977,362	4,716
4	14042,051	3,901	9618,465	2,672	23660,515	6,572
5	10580,066	2,939	6595,450	1,832	17175,516	4,771

№ експ.	$Q_{t.a.}^{lab}$, 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
6	11232,346	3,120	4948,130	1,374	16180,476	4,495
7	11044,531	3,068	4290,470	1,192	15335,001	4,260
8	11616,827	3,227	7343,449	2,040	18960,276	5,267
9	12053,358	3,348	9876,823	2,744	21930,180	6,092
10	12906,449	3,585	15423,319	4,284	28329,768	7,869

Каштани

Результати розрахунку технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) згідно результатів попередньо проведених експериментальних досліджень наведено у табл. 7.13 та табл. 7.14, номери експериментів у табл. 7.13 та 7.14 співпадають.

Таблиця 7.13

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння каштанів за різних параметрів процесу

№ експ.	H , м	T_1 , °C	ν_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	0,036	0,018	0,014	0,014	3280	274	
2	0,08			1,029	0,072	0,036	0,014	0,014	6560	520	
3	0,12			1,029	0,108	0,054	0,014	0,014	9841	841	
4	0,16			1,029	0,144	0,072	0,014	0,014	13121	1216	
5	0,12	60	1,81	1,060	0,108	0,054	0,014	0,014	9841	1088	
6		80		1,000	0,108	0,054	0,014	0,014	9841	689	
7		90		0,972	0,108	0,054	0,013	0,014	9841	590	
8		70		1,98	1,029	0,108	0,054	0,015	0,015	11288	802
9		2,29		1,029	0,108	0,054	0,018	0,017	14160	752	
10		2,82		1,029	0,108	0,054	0,022	0,021	19761	696	

Таблиця 7.14

Питомі енергетичні витрати на проведення фільтраційного сушіння каштанів за різних параметрів процесу

№ експ.	$Q^{lab}_{t.a.}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{t.a.}$, кВт·год/ кг H ₂ O	$Q^{lab}_{\Delta P}$, кДж/ кг H ₂ O	$N^{lab}_{\Delta P}$, кВт·год/ кг H ₂ O	Q^{lab} , кДж/ кг H ₂ O	N^{lab} , кВт·год/ кг H ₂ O
1	18009,467	5,003	1364,208	0,379	19373,675	5,382
2	17108,326	4,752	2591,895	0,720	19700,221	5,472
3	18464,991	5,129	4196,142	1,166	22661,133	6,295
4	20007,792	5,558	6062,322	1,684	26070,114	7,242
5	19669,654	5,464	5423,971	1,507	25093,625	6,970
6	17644,261	4,901	3438,260	0,955	21082,521	5,856
7	17124,681	4,757	2942,691	0,817	20067,372	5,574
8	19245,435	5,346	5016,890	1,394	24262,326	6,740
9	20873,777	5,798	6825,416	1,896	27699,193	7,694
10	23791,911	6,609	10857,046	3,016	34648,957	9,625

Для каштанів гіркокаштану звичайного, аналогічно до попередніх висновків, враховуючи доцільну висоту шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальну тривалість процесу сушіння, технологічно доцільними параметрами фільтраційного сушіння обираємо висоту шару каштанів $H = 120$ мм, температуру теплового агента $T = 90$ °C та швидкість руху теплового агента $v_0 = 1,76$ м/с. Загальні енергетичні витрати на випаровування 1 кг вологи для фільтраційного сушіння каштанів гіркокаштану звичайного за технологічно доцільних параметрів фільтраційного сушіння $H = 120$ мм, $T = 90$ °C, $v_0 = 1,76$ м/с становлять $Q^{lab} = 20067,372$ кДж/кг H₂O або $N^{lab} = 5,574$ кВт/кг H₂O (табл. 7.14).

Зважаючи на проведені розрахунки для всіх досліджених об'єктів вторинної сировини рослинного походження обираємо як технологічно доцільні параметри для проведення процесу фільтраційного сушіння наступні: висоту

шару матеріалу $H = 120$ мм, температуру теплового агента $T = 90$ °С та швидкість руху теплового агента $v_0 \approx 1,8$ м/с.

7.2. Апаратурне оформлення виробництва альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження

Для промислового осушення вторинної сировини рослинного походження пропонується використовувати установку фільтраційного сушіння (рис. 7.1), основний принцип роботи якої полягає у тому, що вологий матеріал осушується, рухаючись на стрічці транспортеру під впливом потоку теплового агента, що проходить крізь його шар. За основу було взято установку [229], проте з удосконаленим способом підведення теплового агента.

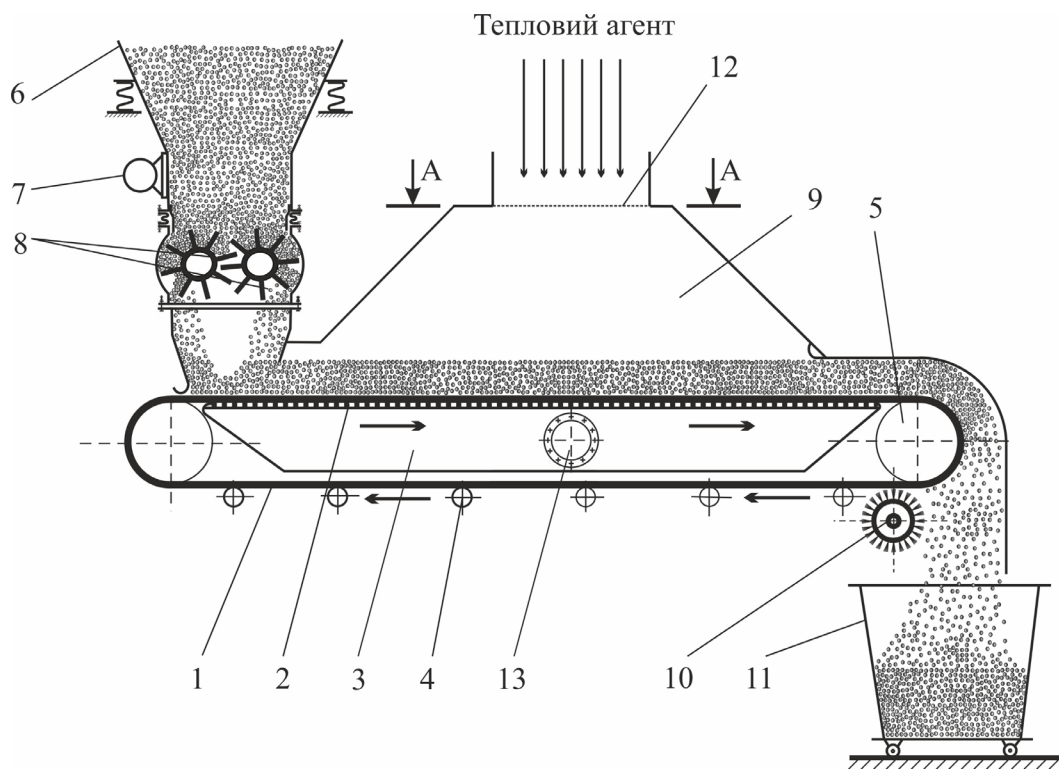


Рис. 7.1. Установка фільтраційного сушіння: 1 – стрічка транспортера, 2 – перфорована поверхня камери розрідження, 3 – камера розрідження, 4 – ролики для підтримання стрічки транспортера, 5 – привідний барабан, 6 – бункер для вологого матеріалу, 7 – вібратор, 8 – живильник, 9 – сушильна камера, 10 – щітка для очищення стрічки транспортера, 11 – бункер сухого матеріалу; 12 – розподільча решітка; 13 – вентилятор

Установка фільтраційного сушіння (рис. 7.1) містить транспортер із стрічкою транспортера 1, яка опирається на ролики 4 і приводиться у рух барабаном 5. Під транспортером 1 встановлена камера розрідження 3 із перфорованою перегородкою 2, яка з'єднана з вентилятором 13. Над стрічкою транспортера 1 (рис. 7.1) встановлений бункер 6 для подачі вологого матеріалу. Бункер 6 з'єднаний із вібратором 7 для запобігання злипанню вологого матеріалу та живильником 8 для подачі вологого матеріалу на стрічку транспортера 1. На протилежній стороні від завантажувального бункера 6 під стрічковим транспортером 1 закріплена щітка 10 видалення залишків матеріалу та встановлений розвантажувальний бункер сухого матеріалу 11.

Над стрічкою транспортера 1 розміщена сушильна камера 9, куди подається тепловий агент. через розподільчу решітку 12 із технологічними отворами для диференціального розподілу нагрітого теплового агенту (рис. 7.2).

A-A

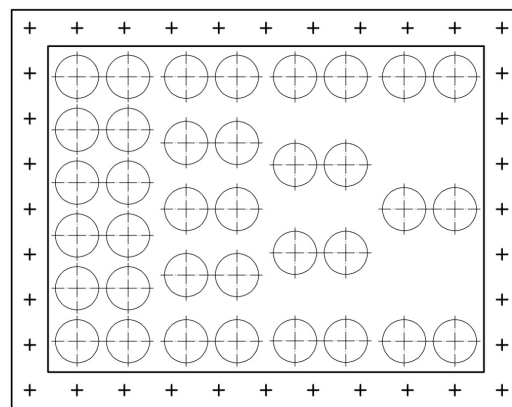


Рис. 7.2. Розподільча решітка (поз. 12, рис. 7.1) для розподілення потоку теплового агенту вздовж сушильної зони в установці фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів

Принцип роботи установки фільтраційного сушіння (рис. 7.1) наступний: вологий матеріал засипають у завантажувальний бункер 6. Включають вентилятор 13, приєднаний до камери розрідження 3, вібратор 7, живильник 8 і стрічковий транспортер 1, який опирається на ролики 4 і який приводять в рух за допомогою привідного барабану 5. Одночасно у сушильну камеру 9 подають

тепловий агент заданої температури, крізь розподільчу решітку 12 (рис. 7.2). В камері сушіння 9 вологий матеріал нагрівається за допомогою тепла теплового агенту, що крізь перфоровану поверхню перегородки 2 камери розрідження 3 фільтрується внаслідок створеного вентилятором 13 розрідження крізь шар вологого матеріалу. Тепловий агент віддає тепло матеріалу на стрічці транспортера 1, насичується парами вологи і вентилятором 13 виноситься за межі сушильної установки. Осушуваний матеріал переміщується стрічковим транспортером 1 до розвантажувального бункера 11 вздовж камери сушіння 9, внаслідок чого висушується. Залишки сухого матеріалу на стрічковому транспортері 1 видаляють щіткою 10 в бункер 11.

Для оцінки ефективності промислового використання було виконано розрахунок параметрів промислового процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі обраних оптимальних параметрів процесу. Під час розрахунків параметри теплового агенту визначали за допомогою *I-d* діаграми стану вологого повітря [230].

Схему тепломасообміну на установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1) можна зобразити наступним чином (рис. 7.3):

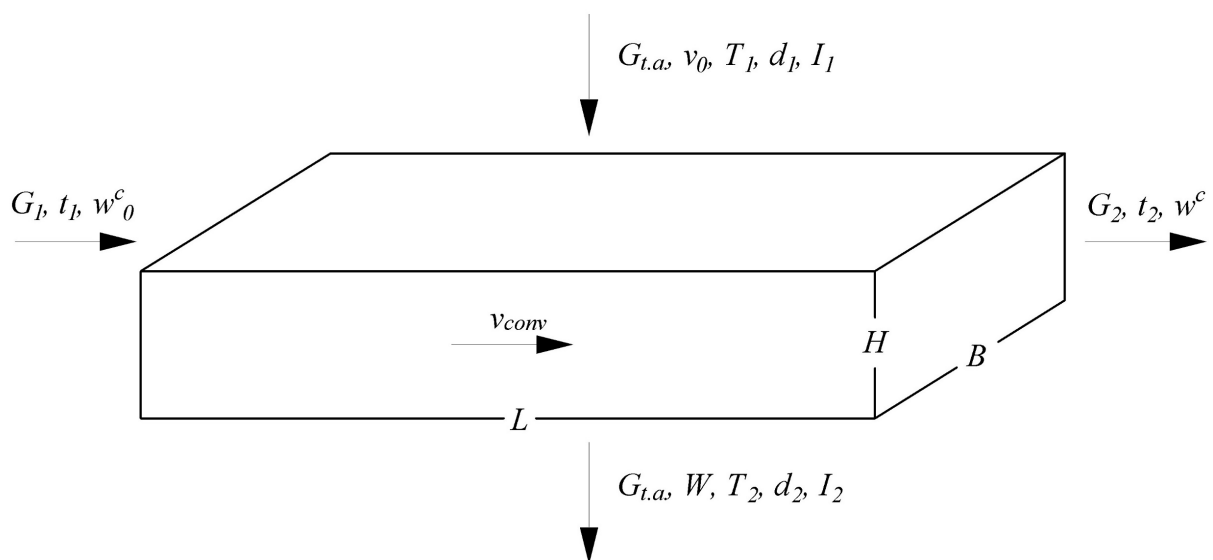


Рис. 7.3. Схема тепломасообміну на установці фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, де:

G_1, G_2 – початкова та кінцева маса вологого та висушеного матеріалу, кг/год;

T_1, T_2 – початкова та кінцева температура теплового агенту, °С;

W – кількість випаруваної вологи, кг/год;

$G_{t.a.}$ – масова витрата теплового агенту, кг/год;

v_{conv} – швидкість руху транспортера, м/с;

d_1, d_2 – початковий та кінцевий вологовміст теплового агенту, кг Н₂О / кг сухого матеріалу;

I_1, I_2 – ентальпія теплового агенту до та після процесу сушіння, кДж/кг;

L – довжина зони сушіння, м;

B – ширина транспортеру, м.

Процес виробництва альтернативного твердого палива із вторинної сировини рослинного походження повинен включати 2 основні стадії: стадію попередньої підготовки сировини, тобто процес осушення до показника необхідної вологості, та стадію формування твердого палива, брикетування або гранулювання – залежно від поставленого технологічного завдання (рис. 7.4). Для стадії попередньої підготовки сировини запропоновано використовувати процес фільтраційного сушіння, технологічно доцільні параметри якого було розраховано у розділі 7.1 (рис. 7.4). Для стадії пресування/гранулювання вторинної сировини рослинного походження запропоновано використовувати методики виготовлення твердого палива згідно досліджень у розділах 6.2 та 6.3.

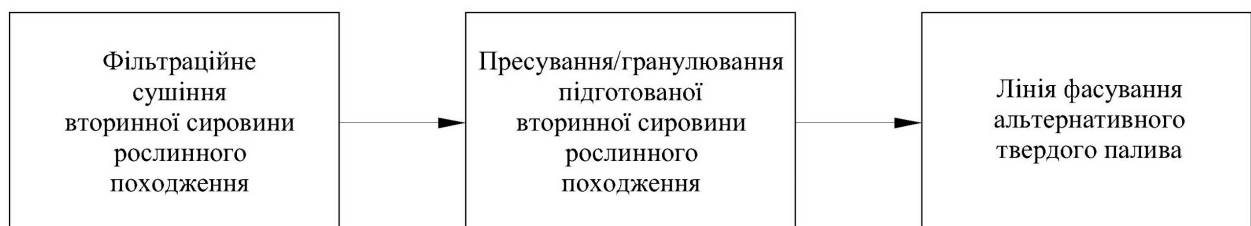


Рис. 7.4. Принципова блок-схема виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

Перевагами запропонованої принципової блок-схеми (рис. 7.4) є її відносна простота, універсальність використання різних типів обладнання, можливість розгортання на обмежених виробничих площах та на місці

накопичення промислових відходів, відсутність громіздкого допоміжного обладнання та можливість роботи у періодичному або безперервному режимах.

7.3. Розрахунок питомих енергетичних витрат за промислового використання фільтраційного сушіння для вторинної сировини рослинного походження

Зважаючи на відсутність загально прийнятих методик розрахунку сушильного обладнання для фільтраційного сушіння, на основі аналізу процесів під час фільтраційного сушіння та літературних джерел, пропонується наступний алгоритм розрахунку параметрів процесу для промислової установки фільтраційного сушіння (рис. 7.1):

1. Згідно вихідних даних вологості за рівнянням (7.5) визначити вологовміст початкового w^c_0 та осушеного w^c матеріалу.
2. Визначити тривалість сушіння за допомогою визначених залежностей у розділі 4.2, врахувавши додаткові витрати теплоти на випаровування зв'язаної вологи у періоді часткового насичення теплового агенту вологою згідно рівняння (2.17).
3. Задати габаритні розміри стрічки транспортеру l установки фільтраційного сушіння (рис. 7.1) та визначити об'єм V_{mat} та масу G_{mat} матеріалу, що перебуває на стрічці транспортеру у зоні сушіння:

$$V_{mat} = L \cdot B \cdot H \quad (7.9)$$

$$G_{mat} = V_{mat} \cdot \rho_b \quad (7.10)$$

де ρ_b – насипна густина вологого матеріалу, кг/м³.

4. Уточнити продуктивність за вологим матеріалом G'_1 :

$$G'_1 = \frac{G_{mat} \cdot 3600}{\tau} \quad (7.11)$$

де τ – час перебування матеріалу в зоні сушіння, с.

5. Визначити об'ємну витрату теплового агенту $Q_{t.a.}$ та масову витрату теплового агенту $G_{t.a.}$:

$$Q_{t.a.} = v_0 \cdot L \cdot B \quad (7.12)$$

$$G_{t.a.} = Q_{t.a.} \cdot \rho_{t.a.}, \quad (7.13)$$

де $\rho_{t.a.}$ – густина теплового агенту за початкової температури теплового агенту T_1 .

6. Визначити швидкість транспортеру v_{conv} :

$$v_{conv} = \frac{L}{\tau} \quad (7.14)$$

7. Визначені згідно експериментальних даних параметри процесу фільтраційного сушіння уточнити перевірочним розрахунком за допомогою матеріального та теплового балансів. Параметри теплового агенту визначити за допомогою $I-d$ діаграми стану вологого повітря [230]. Згідно матеріального балансу процесу фільтраційного сушіння за вихідним матеріалом визначити G_2 за рівнянням (7.8) та W за рівнянням (7.7). Після чого визначити витрату теплового агенту згідно рівняння:

$$G'_{t.a.} = \frac{W}{d_2 - d_1} \quad (7.15)$$

Згідно теплового балансу [144], витрату теплового агенту розраховують за рівнянням:

$$G''_{t.a.} = \frac{Q}{c_{t.a.} \cdot (T_1 - T_2)}, \quad (7.16)$$

де $c_{t.a.}$ – теплоємність повітря, кДж/кг·°С;

Q – сумарні затрати теплоти на нагрів матеріалу та вологи у матеріалі, кДж:

$$Q = (1 + \alpha) \cdot (Q_{ev} + Q_v + Q_{H_2O} + Q_{mat} + Q_{res}), \quad (7.17)$$

де α – коефіцієнт втрат тепла, $\alpha = 0,1$;

Q_{ev} – кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу, кДж/год;

Q_v – кількість теплоти для утворення пари, кДж/год;

Q_{H_2O} – кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі, кДж/год;

Q_{mat} – кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу, кДж/год;

Q_{res} – кількість теплоти для нагрівання залишкової вологи у матеріалі, кДж/год.

Вищенаведені показники кількості теплоти визначаються згідно наступних рівнянь:

$$Q_{ev} = W \cdot r, \quad (7.18)$$

де r – питома теплота пароутворення води, кДж/кг·°С.

$$Q_v = W \cdot c_v \cdot (T_2 - T_w), \quad (7.19)$$

де c_v – теплоємність пари, кДж/кг·°С;

T_w – температура «мокрого» термометра теплового агенту, °С; для даного розрахунку згідно $I-d$ діаграми стану вологого повітря: $T_w = 33$ °С.

$$Q_{H_2O} = W \cdot c_{H_2O} \cdot (T_w - t_1), \quad (7.20)$$

де c_{H_2O} – теплоємність води, кДж/кг·°С.

$$Q_{mat} = G_d \cdot c_{mat} \cdot (t_2 - t_1), \quad (7.21)$$

де G_d – маса сухого матеріалу, кг/год;

c_{mat} – теплоємність матеріалу, кДж/кг·°С.

$$G_d = G_1 \cdot \frac{100 - \omega_1}{100} \quad (7.22)$$

$$Q_{res} = G_d \cdot w^c \cdot c_{H_2O} \cdot (t_2 - t_1) \quad (7.23)$$

8. Визначити кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агенту $N_{t.a.}$ згідно рівняння:

$$N_{t.a.} = Q_{t.a.} \cdot c_{t.a.} \cdot (T_1 - T_0) \quad (7.24)$$

9. Для універсалізації одержаних даних обчислити питомий показник енергетичних витрат на нагрівання теплового агенту для видалення 1 кг вологи з вологого матеріалу:

$$l_{t.a.} = \frac{N_{t.a.}}{W} \quad (7.25)$$

10. Визначити потужність вентилятора для забезпечення необхідної швидкості руху теплового агенту крізь шар вологого матеріалу:

$$N_{fan} = \frac{Q_{t.a.} \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta_{\Delta P}} \quad (7.26)$$

11. Розрахувати загальну кількість енергії N , яка необхідна для процесу фільтраційного сушіння вологого матеріалу:

$$N = N_{t.a.} + N_{fan} \quad (7.27)$$

12. Визначити питомий показник енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи з осушуваного матеріалу для процесу фільтраційного сушіння згідно залежності:

$$l = \frac{N}{W} \quad (7.28)$$

Для оцінки ефективності промислового використання було виконано розрахунок параметрів промислового процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження на основі визначених технологічно раціональних параметрів процесу фільтраційного сушіння у розділі 7.1.

Під час розрахунків параметри теплового агенту визначали за допомогою $I-d$ діаграми стану вологого повітря [230].

Для порівняння ефективності використання фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження було виконано розрахунок осушення у барабанній сушарці [231, 232] для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_I . Для осушення обирали температуру теплового агенту $T_I = 140$ °C, зважаючи на особливості сушіння біомаси [233], що містить сполуки лігніну.

Матеріальний баланс барабанної сушарки визначали за рівняннями (7.8), (7.7) та (7.15).

Конструктивний розрахунок барабанної сушарки визначали наступним чином. Спочатку визначали об'єм барабану $V^{r.d.}$ за напруженням барабану за вологою A_V :

$$V^{r.d.} = \frac{W}{A_V} \quad (7.29)$$

За об'ємом барабану обирали стандартний апарат із найближчим більшим об'ємом і, відповідно, відомими діаметром $D^{r.d.}$ та $L^{r.d.}$. Час сушіння у барабанній сушарці $\tau^{r.d.}$ визначали за рівнянням [211]:

$$\tau^{r.d.} = \frac{2 \cdot \beta \cdot \rho_b \cdot (\omega_1 - \omega_2)}{A_V \cdot (200 - (\omega_1 - \omega_2))}, \quad (7.30)$$

де β – коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом.

Необхідну кількість теплового агента для нагріву матеріалу в барабанній сушарці визначали за рівняннями (7.16)–(7.23). Під час розрахунку енергетичних витрат було враховано необхідну потужність вентилятора, необхідного для транспортування сушильного агента крізь барабан. Гідравлічний опір барабанної сушарки приймали на основі рекомендацій [144, 228, 234] із незначним запасом, з огляду на можливу зміну перепаду тиску залежно від типу насадок, що впливає на характер пересипання матеріалу.

Кукурудзяна післяспиртова барда

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. 7.15. Визначену початкову вологість досліджуваного матеріалу для розрахунку було округлено до найближчого більшого цілого значення. Для універсалізації розрахунку його було виконано для продуктивності за вихідним матеріалом $G_I = 1000$ кг/год.

Таблиця 7.15

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_I , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	73
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14

Показник	Значення
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	407,5
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °C	90
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °C	55
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	52
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,76
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Розрахунок було виконано згідно запропонованого вище алгоритму та вихідних показників (табл. 7.15), результати розрахунку наведено у табл. 7.16.

Таблиця 7.16

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O /кг сух. мат.	2,7
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,39
Ширина стрічкового транспортеру B , м	0,95
Довжина стрічкового транспортеру L , м	9
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	1,026
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	418,09
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0063
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_l , кг/год	1062,16
Об'ємна витрата теплового агенту $Q_{t.a.}$, м ³ /год	54172,8
Масова витрата теплового агенту $G_{t.a.}$, кг/год	52710,13

Показник	Значення
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	286,78
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	333,47
Кількість вологи W , кг/год	728,69
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,022
Масова витрата теплового агента $G'_{t.a.}$, кг/год	54788,83
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1675990,44
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	30138,68
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	39691,82
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	13150,37
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	6259,61
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1941754,019
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	54929,39
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	1725,28
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год /·кг H_2O	2,34
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	198,63
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	1923,91
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год /·кг H_2O	2,64

Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агенту $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального балансу $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$ становлять, відповідно, 3,79 % та 4,04 %, що свідчить про коректність запропонованого алгоритму розрахунку.

Як свідчать дані розрахунку у табл. 7.16, загальна кількість енергії необхідної для фільтраційного сушіння ~ 1000 кг кукурудзяної післяспиртової барди на установці фільтраційного сушіння становить приблизно 1923,91 кВт·год. При цьому, 1725,28 кВт·год енергії необхідно затратити на нагрівання теплового агенту, а також 198,63 кВт·год – для забезпечення руху теплового агенту крізь дисперсний шар матеріалу на конвеєрі. Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за фільтраційного процесу кукурудзяної післяспиртової барди на установці фільтраційного сушіння становлять орієнтовно 2,64 кВт·год /·кг H_2O .

Для порівняння ефективності використання фільтраційного методу сушіння, було виконано розрахунок даного процесу сушіння у барабанній сушарці для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_l , згідно алгоритму, наведено у даному розділі вище. Вихідні показники для розрахунку процесу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці наведено у табл. 7.17.

Таблиця 7.17

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	73
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	407,5

Показник	Значення
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	90
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	87
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Результати розрахунку процесу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці наведено у табл. 7.18.

Таблиця 7.18

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	2,7
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	4,55
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	270
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	313,95
Кількість вологи W , кг/год	686,05
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	45,74
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	14
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,2
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	53,2
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	4335,8

Показник	Значення
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,027
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	37488,88
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1577906,98
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	65517,44
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	57490,7
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	29151,31
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	10611,59
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1914745
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.'}_{t.a.}$, кг/год	37915,76
Гідрравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	2127,49
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / кг H ₂ O	3,1
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	19,42
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	2146,91
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / кг H ₂ O	3,13

Різниця між значеннями витрати теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$ та $G^{r.d.'}_{t.a.}$ в барабанній сушарці становить 1,13 % (табл. 7.18), що свідчить про коректність використаного алгоритму розрахунку.

При осушенні 1000 кг кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці, сумарно необхідно витратити орієнтовно 2146,91 кВт·год енергії. Основна її частина – 2127,49 кВт·год, йде на нагрів необхідної кількості теплового агенту, а також 19,42 кВт·год для забезпечення роботи вентилятора. Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи при осушенні кукурудзяної післяспиртової барди становлять приблизно 3,13 кВт·год /·кг H₂O.

Таким чином, порівняння розрахунків ефективності використання фільтраційного сушіння для кукурудзяної післяспиртової барди показує перспективність даного методу для промислового використання (табл. 7.19).

Таблиця 7.19

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,39	4,55
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1923,91	2146,92
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год /·кг H ₂ O	2,64	3,13

Відмітимо, що наведений розрахунок процесу сушіння є оціночним і не містить розрахунків енергетичних витрат на функціонування допоміжного обладнання. Проте, як свідчать одержані результати, для аналогічної продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг/год, фільтраційне сушіння дозволяє зменшити кількість енергії на ~220 кВт·год та скоротити необхідний час для сушіння більше ніж у 10 разів. Дані табл. 7.19 свідчать, що використання фільтраційного методу сушіння дає змогу зменшити питомий показник енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи з кукурудзяної післяспиртової

барди l у порівнянні із процесом сушіння у барабанній сушарці на 15,65 %. Також варто зазначити, що загальний економічний ефект буде вищим через значні теплові втрати у довкілля для барабанної сушарки через її великі габарити, тривалий час сушіння та потребу в енергоємному допоміжному обладнанні для очищення відпрацьованого теплового агенту від дрібнодисперсної фракції.

Ячмінна пивна дробина

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г1, додаток Г.

Розрахунок було виконано згідно запропонованого вище алгоритму та вихідних показників (табл. Г1, додаток Г), результати розрахунку наведено у табл. Г2, додаток Г.

Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агенту $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$ становлять, відповідно, 2,67 % та 3,79 %, що свідчить про відповідність експериментальних даних та теоретичних розрахунків (табл. Г2, додаток Г).

Для порівняння ефективності використання фільтраційного методу сушіння, було виконано розрахунок осушення ячмінної пивної дробини у барабанній сушарці для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_l згідно алгоритму, наведено у даному розділі вище. Вихідні показники для розрахунку процесу сушіння кукурудзяної післяспиртової барди у барабанній сушарці наведено у табл. Г3, додаток Г. Результати розрахунку процесу сушіння ячмінної пивної дробини у барабанній сушарці наведено у табл. Г4, додаток Г.

Різниця між значеннями витрати теплового агенту $G^{r.d.}_{t.a.}$ та $G^{r.d.'}_{t.a.}$ в барабанній сушарці становить 0,56 % (табл. Г4, додаток Г), що свідчить про коректність виконаного розрахунку.

Результати проведених обчислень дають змогу зробити висновок про те, що розрахунок ефективності використання фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини вказує перспективність даного методу (табл. 7.20).

Таблиця 7.20

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~ 1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,53	5,67
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	2810,29	2315,65
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи l , кВт·год/кг H ₂ O	3,74	3,11

Найголовнішою перевагою методу фільтраційного сушіння є те, що воно дозволяє скоротити час на осушення ячмінної пивної дробини більше, ніж у 10 разів (табл. 7.20). Паралельно спостерігається збільшення загальних питомих енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи на 16,8 % порівняно із барабанною сушаркою (табл. 7.20), проте у світлі значної економії тривалості процесу даний показник не є визначальним. Додатково відмітимо, що у випадку ячмінної пивної дробини це зростання енергетичних витрат в основному пов'язане із значною кількістю енергії, необхідної для роботи вентилятора N_{fan} через значний гідравлічний опір шару матеріалу. Що стосується енергетичних витрат на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агенту $l_{t.a.}$, то вигіднішим є процес фільтраційного сушіння на 11,3 %: 2,73 кВт·год/кг H₂O проти 3,08 кВт·год/кг H₂O для барабанної сушарки.

Дана проблема може бути вирішеною кількома способами. Один із них – це попереднє зневоднення сировини за допомогою механічних методів, наприклад відтискання або центрифугування, з подальшим сушінням

фільтраційним методом до необхідного кінцевого вологовмісту. Інший спосіб, що є більш економічно ефективним та прийнятним з точки зору раціонального природокористування – це використання вторинної теплоти на підприємствах. Використання вторинної теплоти допоможе уникнути енерговитрат на стадії нагрівання теплового агенту. Використання вторинного тепла як теплового агенту не тільки сприяє раціональному використанню ресурсів, але й значно знижує експлуатаційні витрати, що забезпечує вагомий економічний ефект.

Відмітимо, що у барабанній сушарці використання вторинної теплоти неможливе, адже барабанна сушарка вимагає нагрівання теплового агенту шляхом спалювання газоподібного чи твердого палива. Також до переваг фільтраційного методу можемо віднести менші габарити установки у порівнянні із барабанною сушаркою.

Відходи кавового виробництва

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння відходів виробництва кави на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г5, додаток Г.

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння відходів виробництва кави у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу наведено у табл. Г6, додаток Г.

Аналізуючи табл. Г6, додаток Г, можна побачити, що спостерігається деяка розбіжність між значеннями розрахованої масової витрати теплового агенту $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та теоретичних розрахунків за даними матеріального $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$. Абсолютне відхилення становить 25,71 % та 25,73 % відповідно. Дану розбіжність, єдину серед усіх виконаних розрахунків, пояснюємо інтенсивним видаленням вологи з досліджуваного матеріалу під час фільтраційного сушіння, що приводить до збільшення насичення теплового агенту вологою на виході із стаціонарного шару, а, отже, і зменшення його кінцевої температури.

Відповідно до проведеного розрахунку, для осушення ~ 1000 кг відходів виробництва кави фільтраційним методом необхідно затратити 1163,87 кВт·год енергії. При цьому, більша частина необхідних енергетичних затрат, а саме 807,15 кВт·год, йде на нагрівання теплового агенту до необхідної початкової температури. Також, 356,72 кВт·год необхідно затратити на подолання гідравлічного опору стаціонарного шару відходів виробництва кави сушильним агентом. Таким чином, загальні енергетичні витрати необхідні для видалення 1 кг вологи з матеріалу на промисловій установці фільтраційного сушіння становлять близько 1,65 кВт·год/кг H_2O .

З метою оцінки ефективності промислового фільтраційного сушіння відходів виробництва кави, додатково було здійснено розрахунок барабанної сушарки для аналогічної продуктивності за вихідним матеріалом, вихідні показники для розрахунку наведено у табл. Г7, додаток Г.

У табл. Г8, додаток Г, наведено отримані результати ефективності використання барабанної сушарки для процесу сушіння відходів виробництва кави.

Похибка між значеннями масової витрати теплового агенту розрахованих на основі експериментальних даних та перевіреного розрахунку становить 0,18 % (табл. Г8, додаток Г), що підтверджує його коректність.

Таким чином, для осушення ~ 1000 кг відходів виробництва кави у сушарці барабанного типу, необхідно затратити орієнтовно 1629,25 кВт·год. При цьому, основна частина затраченої енергії, а саме 1614,51 кВт·год використовується для нагрівання теплового агенту до початкової температури $t_l = 140$ °С.

Якщо ж казати про загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи з досліджуваного матеріалу, то це значення становить приблизно 2,37 кВт·год/кг H_2O . Порівняльний розрахунок використання фільтраційного сушіння відходів виробництва кави на промисловій установці показав свою перспективність над сушінням у барабанній сушарці (табл. 7.21).

Згідно з одержаними результатами, для аналогічної продуктивності за вихідним матеріалом орієнтовно 1000 кг/год, фільтраційне сушіння дозволяє

зменшити споживання енергії на ~ 465 кВт·год та скоротити необхідний час сушіння більше ніж у 20 разів.

Таблиця 7.21

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння відходів виробництва кави та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~ 1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,18	4,24
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1163,87	1629,25
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год /·кг H ₂ O	1,65	2,37

Буряковий жом

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння бурякового жому на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г9, додаток Г.

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат для промислового процесу фільтраційного сушіння бурякового жому наведено у табл. Г10, додаток Г. Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агента $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$ становлять 1,91 % та 2,48 % відповідно, тому розраховані результати можна вважати коректними.

Щоб оцінити ефективність запропонованого методу сушіння, розраховано ефективність осушення бурякового жому у барабанній сушарці для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_l , вихідні дані для розрахунку наведено у табл. Г11, додаток Г.

Результати розрахунку процесу сушіння бурякового жому у барабанній установці, згідно вищенаведеної методики, наведено у табл. Г12, додаток Г. За даними матеріального балансу, похибка становить 0,41 % (табл. Г12, додаток Г), тому можна стверджувати, що отримані результати коректні.

Аналіз даних, одержаних для процесу сушіння бурякового жому фільтраційним методом та у барабанній сушарці свідчить про те, що, незважаючи на незначно більші енергетичні затрати за допомогою фільтраційного сушіння, ми маємо суттєве скорочення тривалості сушіння – орієнтовно у 10 разів, що, безперечно свідчить про вищу ефективність фільтраційного методу сушіння (табл. 7.22). Зважаючи на те, що розрахунок є оціночним і не включає у себе енергетичні витрати на допоміжне обладнання барабанної сушарки (циклон для очищення вихідних газів, привід барабану тощо), перспективність використання фільтраційного сушіння для бурякового жому є очевидною. Вирішенням проблеми, як і для осушення ячмінної дробини може бути використання вторинного тепла на виробництві.

Таблиця 7.22

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння бурякового жому та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,65	6,77
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	2827,04	2673,45
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / кг H ₂ O	3,28	3,11

Яблучні вичавки

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння яб-

лучних вичавок на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г13, додаток Г.

Розрахунок було виконано згідно запропонованого вище алгоритму та вихідних показників (табл. Г13, додаток Г), результати розрахунку наведено у табл. Г14, додаток Г. Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агента $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального балансу $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$ становлять, відповідно, 0,29 % та 4,55 %, що свідчить про коректність запропонованого алгоритму розрахунку.

Для порівняння ефективності використання фільтраційного методу сушіння, було виконано розрахунок даного процесу сушіння яблучних вичавок у барабанній сушарці для аналогічної продуктивності за вологим матеріалом G_I вихідні показники наведено у табл. Г15, додаток Г.

Результати розрахунку процесу сушіння яблучних вичавок у барабанній сушарці наведено у табл. Г16, додаток Г.

Різниця між значеннями витрати теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$ та $G^{r.d.'}_{t.a.}$ в барабанній сушарці становить 0,55 % (табл. Г16, додаток Г), що свідчить про коректність використаного алгоритму розрахунку.

Порівняння розрахунків ефективності використання фільтраційного сушіння для яблучних вичавок показує перспективність даного методу для промислового використання у порівнянні із барабанною сушаркою (табл. 7.23).

Дані калькуляції промислових методів осушення свідчать про ефективність використання фільтраційного сушіння згідно показників питомих енергетичних витрат на видалення вологи та, насамперед – згідно тривалості процесу (табл. 7.23). Проте, зважаючи на високу початкову вологість вихідної сировини та особливості видалення вологи під час фільтраційного сушіння, рекомендовано проводити попереднє зневоднення за допомогою фізичних або механічних методів.

Таблиця 7.23

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння яблучних вичавок та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	1,31	6,27
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	5338,08	5132,79
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год/кг H ₂ O	6,36	6,40

Жолуді

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння жолудів дуба звичайного (*Quercus robur L.*) на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г17, додаток Г. Результати розрахунку згідно запропонованого вище алгоритму та вихідних показників наведено у табл. Г18, додаток Г.

Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агенту $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального балансу $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$ становлять, відповідно, 2,71 % та 3,18%, що свідчить про коректність запропонованого алгоритму розрахунку (табл. Г18, додаток Г).

Вихідні показники порівняльного для розрахунку процесу сушіння жолудів дубу звичайного у барабанній сушарці наведено у табл. Г19, додаток Г.

Результати розрахунку процесу сушіння жолудів у барабанній сушарці наведено у табл. Г20, додаток Г.

Різниця між значеннями витрати теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$ та $G^{r.d.'}_{t.a.}$ в барабанній сушарці становить 0,2 % (табл. Г20, додаток Г), що свідчить про коректність використаного алгоритму розрахунку.

Порівняння розрахунків використання фільтраційного сушіння та сушіння у барабанній сушарці для жолудів дубу звичайного показує перспективність фільтраційного методу для промислового використання (табл. 7.24), зважаючи на значно меншу тривалість сушіння та нижчі питомі енергетичні витрати.

Таблиця 7.24

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння жолудів та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,16	2,14
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	721,52	1188,76
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год /·кг H ₂ O	2,08	3,48

Каштани

Вихідні показники для розрахунку параметрів фільтраційного сушіння каштанів гіркокаштану звичайного (*Aesculus hippocastanum*) на промисловій установці фільтраційного сушіння (рис. 7.1), згідно визначених технологічно доцільних параметрів процесу у розділі 7.1, наведено у табл. Г21, додаток Г.

Розрахунок було виконано згідно запропонованого вище алгоритму та вихідних показників (табл. Г21, додаток Г), результати розрахунку наведено у табл. Г22, додаток Г. Значення абсолютної похибки розрахованої масової витрати теплового агента $G_{t.a.}$ згідно експериментальних даних та перевірочних розрахунків за даними матеріального балансу $G'_{t.a.}$ та теплового балансу $G''_{t.a.}$

становлять, відповідно, 2,42 % та 1,31%, що свідчить про коректність запропонованого алгоритму розрахунку.

Вихідні показники для розрахунку процесу сушіння каштанів гіркокаштану звичайного у барабанній сушарці наведено у табл. Г23, додаток Г.

Результати розрахунку процесу сушіння каштанів гіркокаштану звичайного у барабанній сушарці наведено у табл. Г24, додаток Г.

Різниця між значеннями витрати теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$ та $G^{r.d.'}_{t.a.}$ в барабанній сушарці становить 0,13 % (табл. Г24, додаток Г), що свідчить про коректність використаного алгоритму розрахунку.

Порівняння розрахунків ефективності використання фільтраційного сушіння для каштанів та сушіння у барабанній сушарці свідчить про переваги фільтраційного сушіння для промислового використання (табл. 7.25).

Таблиця 7.25

Порівняння результатів розрахунку процесу фільтраційного сушіння каштанів та сушіння у барабанній сушарці для продуктивності за вихідним матеріалом ~1000 кг

Показник	Фільтраційне сушіння	Барабанна сушарка
Загальний час сушіння τ , год	0,16	2,02
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1275,73	1638,63
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год /·кг H ₂ O	2,41	3,28

Як свідчать дані проведених розрахунків, фільтраційний метод сушіння має переваги перед традиційним осушенням у барабанній сушарці. Додатково зауважимо, що загальний економічний ефект буде вищим, зважаючи на високий показник втрат теплоти у доквілля у барабанній сушарці з огляду на її великі габаритні розміри, час сушіння та конструктивні особливості. Також

використання барабанної сушарки вимагає енергоємного додаткового обладнання, наприклад циклону для очищення вихідного потоку від частинок, що виносяться, а також двигунів для обертання барабану.

Важливо також, що для фільтраційного методу можна використовувати вторинне тепло на підприємствах, що в той час як використання барабанної сушарки вимагає нагрівання теплового агенту за допомогою спалювання палива.

Детальні розрахунки економічної ефективності також повинні включати в себе собівартість вихідної сировини, витрати на логістику, супутні витрати на обслуговування та оплату праці. Зважаючи на наявність значної сировинної бази та можливість розгортання технологічного процесу на місцях накопичення відходів або прийому сировини – у порівнянні із особливостями видобутку викопного або важковідновлювального палива – описаний вище технологічний процес матиме зміст та суттєвий економічний ефект та перспективи практичного застосування.

Висновки до сьомого розділу

1. Встановлені технологічно доцільні параметри процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Показано, що технологічно доцільними параметрами проведення процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження є, враховуючи доцільну висоту шару вологого матеріалу для промислових сушильних установок та оптимальну тривалість процесу сушіння: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температура теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість руху теплового агенту $v_0 \approx 1,8$ м/с.
2. Запропоновано установку фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу сушіння вторинної сировини рослинного походження та принципову блок-схему виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.

3. Запропоновано алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу.
4. Розраховано питомі енергетичні витрати для усіх досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу.
5. Показано ефективність використання процесу фільтраційного сушіння порівняно із барабанными сушарками, що широко використовуються для сушіння біомаси.
6. Основні результати досліджень опубліковані в роботах [158, 202, 235–240].

ВИСНОВКИ

На основі законів теорії тепло- та масообміну, гідродинаміки стаціонарного шару та кінетики сушіння дисперсних матеріалів, у дисертаційній роботі розроблено наукові положення, висновки та рекомендації, сукупність яких є новими науковообґрунтованими результатами у галузі процесів та обладнання хімічної технології, які розв'язують науково-прикладну проблему гідродинамічних, кінетичних, тепломасообмінних процесів під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження та створення на її основі альтернативного твердого палива. Вирішена науково-технічна проблема дає змогу моделювати та здійснювати розрахунок основних параметрів процесу фільтраційного сушіння, розробляти нові енергозберігаючі технології та обладнання, використовувати вторинну сировину рослинного походження як альтернативне тверде паливо.

1. Обґрунтовано вибір вторинної сировини рослинного походження, що є перспективною з огляду використання для виготовлення альтернативного твердого палива.
2. Встановлено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння та визначено коефіцієнти модифікованого рівняння Ергана, що дає змогу прогнозувати гідравлічний опір шару та енергетичні витрати на створення перепаду тиску для кожного дослідженого матеріалу. Виведено залежності для визначення гідравлічного опору стаціонарного шару вторинної сировини рослинного походження для висот шару матеріалу $H = 80 \div 120$ мм та $H = 90 \div 110$ мм.
3. Виконано комп'ютерне моделювання гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння у програмному комплексі *ANSYS Fluent 2022 R2*. Встановлено, що усереднене відхилення результатів комп'ютерного моделювання не перевищує 9 %, що є

прийнятною точністю, одержані результати дослідження гідродинаміки під час фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів можна використовувати для розширеного діапазону меж досліджуваних висот стаціонарного шару матеріалу з прийнятною точністю.

4. Узагальнено закономірності гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної сировини рослинного походження під час процесу фільтраційного сушіння. Отримано критеріальні залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса для руху теплового агенту крізь стаціонарний шар вторинної рослинної сировини для досліджених висот шару матеріалів.
5. Встановлено та узагальнено закономірності кінетики процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Встановлено вплив основних параметрів процесу фільтраційного сушіння (висоти вологого матеріалу H , температури теплового агенту T , швидкості руху теплового агенту v_0) на зміну вологовмісту досліджуваного матеріалу у часі. Визначено узагальнюючі залежності зміни вологовмісту досліджених матеріалів у часі та тривалості процесу сушіння для досліджених матеріалів для періодів повного насичення теплового агенту вологою та часткового насичення теплового агенту вологою.
6. Встановлено закономірності динаміки процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Показано, що висота шару вологого матеріалу не впливає на інтенсивність видалення вологи, яка виноситься тепловим агентом. Показано, що динаміка видалення вологи під час фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження пропорційно зростає із збільшенням температури теплового агенту та підвищенням швидкості руху теплового агенту. Визначено, що швидкість фільтраційного сушіння зростає із зменшенням шару вологого матеріалу, підвищенням температури теплового агенту, та збільшенням швидкості руху теплового агенту. Встановлено, що насичення теплового агенту вологою з часом зменшується.

7. Узагальнено результати експериментальних досліджень зовнішнього тепломасообміну процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження. Визначено усереднені коефіцієнти тепловіддачі для сухого та вологого шару досліджених матеріалів вторинної сировини рослинного походження. Визначено коефіцієнти масовіддачі для вологого шару дослідженої вторинної сировини рослинного походження. Експериментальні дані узагальнено визначеними залежностями критеріїв Нуссельта та Шервуда для усіх досліджених матеріалів. Показано подібність коефіцієнтів тепло- та масовіддачі з використанням числа Льюїса у періоді повного насичення теплового агенту вологою під час процесу фільтраційного сушіння. Визначено коефіцієнти внутрішньої дифузії для досліджуваної вторинної сировини рослинного походження та узагальнено їх залежності від температури теплового агенту за допомогою розрахункових залежностей.
8. Доведено перспективність використання альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Визначено основні енергетичні характеристики несформованої вторинної сировини рослинного походження.
9. Виготовлено дослідні брикетовані та гранульовані зразки альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження та встановлено основні енергетичні характеристики альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження. Визначено основні теплофізичні характеристики створених твердопаливних зразків. Визначено, що виготовлені зразки твердого палива відповідають існуючим вимогам європейських стандартів.
10. Виконано розрахунок технологічно доцільних параметрів сушильного обладнання для проведення процесу фільтраційного сушіння: висота шару матеріалу $H = 120$ мм, температура теплового агенту $T = 90$ °С, швидкість руху теплового агенту $v_0 \approx 1,8$ м/с.

11. Запропоновано апаратурне оформлення для промислового процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження: установку фільтраційного сушіння для промислового проведення процесу та принципову блок-схему виготовлення альтернативного твердого палива з вторинної сировини рослинного походження.
12. Показано економічну ефективність процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження за допомогою розрахованих питомих енергетичних витрат. Запропоновано алгоритм розрахунку питомих енергетичних показників процесу фільтраційного сушіння вторинної сировини рослинного походження для промислового проведення процесу. Розраховано питомі енергетичні витрати для усіх досліджених матеріалів для промислового проведення процесу. Показано ефективність використання процесу фільтраційного сушіння порівняно із барабанними сушарками, що широко використовуються для сушіння біомаси.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Baltacı, Ö., Kırıl, Z., Dalkılıç, K., & Karaman, O. (2024). Thermal Image and Inverter Data Analysis for Fault Detection and Diagnosis of PV Systems. *Applied Sciences*, 14(9), 3671. <https://doi.org/10.3390/app14093671>
2. Khan, M. A. H., Bonifacio, S., Clowes, J., Foulds, A., Holland, R., Matthews, J. C., & Shallcross, D. E. (2021). Investigation of Biofuel as a Potential Renewable Energy Source. *Atmosphere*, 12(10), 1289. <https://doi.org/10.3390/atmos12101289>
3. Craig, J., & Latham, A. (2024). Carbon matters: Fossil fuels and the Energy Transition. *EPJ Web of Conferences*, 310, 00002. <https://doi.org/10.1051/epjconf/202431000002>
4. Zhang, L., Jian, X., & Ma, Y. (2024). Analysis of differences in fossil fuel consumption in the world based on the fractal time series and complex network. *Frontiers in Physics*, 12, 1457287. <https://doi.org/10.3389/fphy.2024.1457287>
5. Singh, R. L., & Singh, P. K. (2017). Global Environmental Problems. B R. L. Singh (Ред.), *Principles and Applications of Environmental Biotechnology for a Sustainable Future* (с. 13–41). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1866-4_2
6. 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>
7. *New Source Review for Stationary Sources of Air Pollution*. (2006) (с. 11701). Washington, D.C.: National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11701>
8. Beardsworth, R. (2024). COP28: The fossil fuel COP and political leadership on climate. *Open Access Government*, 41(1), 350–351. <https://doi.org/10.56367/OAG-041-11158>
9. Karmakar, R., Tripathi, V., Kumar, P., Singh, N., & Kumar, R. (2024). The Interplay of Fossil Fuels and Natural Disasters. B N. Singh & S. A. Babu (Ред.),

- Climate Crisis and Sustainable Solutions* (с. 91–106). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7110-3_6
10. Grant, D., Hansen, T., Jorgenson, A., & Longhofer, W. (2024). A worldwide analysis of stranded fossil fuel assets' impact on power plants' CO₂ emissions. *Nature Communications*, 15(1), 7517. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-52036-8>
 11. Achasova, A. O., & Achasov, A. B. (2024). The European Green Deal and prospects for Ukraine. *Man and Environment. Issues of Neoecology*, (41), 33–56. <https://doi.org/10.26565/1992-4224-2024-41-03>
 12. The European Green Deal – European Commission. (2021, Липень 14). Вилучено 21, Грудень 2024, із https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_en
 13. Piopoulos, T. G., Galbiatti Silveira, P., & Penttinen, S.-L. (2024). Legal Principles for a European Green Energy Transition. *European Energy and Environmental Law Review*, 33(Issue 6), 248–253. <https://doi.org/10.54648/EELR2024026>
 14. Horizon Europe - European Commission. (2024, Грудень 20). Вилучено 21, Грудень 2024, із https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en
 15. Voloshchuk, T. (2024). Horizon Europe: The EU Budget as a Resource for Research and Innovation. *Business Navigator*, (3(76)). <https://doi.org/10.32782/business-navigator.76-39>
 16. Cherep, O., Cherep, A., Oleynikova, L. H., & Lyshchenko, E. G. (2023). Development of new alternative energy sources for sustainable energy supply. *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University Economic Series*, (105), 67–76. <https://doi.org/10.26565/2311-2379-2023-105-07>
 17. Kulichkova, G. I., Ivanova, T. S., Köttner, M., Volodko, O. I., Spivak, S. I., Tsygankov, S. P., & Blume, Y. B. (2020). Plant Feedstocks and their Biogas Production Potentials. *The Open Agriculture Journal*, 14(1), 219–234. <https://doi.org/10.2174/1874331502014010219>

18. Циганков, С., Іванова, Т., Співак, С., Лукашевич, К., & Блюм, Я. (2024). Розроблення комплексної технології заміщення викопних енергоносіїв побічними продуктами виробництва біоетанолу. *Science and Innovation*, 20(5), 53–61. <https://doi.org/10.15407/scine20.05.053>
19. Kosowski, P. (2024). From Fossil Fuels to Renewables: Clustering European Primary Energy Production from 1990 to 2022. *Energies*, 17(22), 5596. <https://doi.org/10.3390/en17225596>
20. Ivanova, T., Tsygankov, S., Titova, L., Dzyhun, L., Klechak, I., & Bisko, N. (2023). Vinasse Utilization into Valuable Products. В *Bioconversion of Wastes to Value-added Products* (1 вид., с. 245–269). Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003329671-9>
21. Gangil, S., & Bhargav, V. K. (2019). Influences of binderless briquetting stresses on intrinsic bioconstituents of rice straw based solid biofuel. *Renewable Energy*, 133, 462–469. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.033>
22. Корінчук, Д. М., Сорокова, Н. М., Снежкін, Ю. Ф., & Дахненко, В. Л. (2023). Спосіб виготовлення композиційного гранульованого біопалива. Вилучено із <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1718128>
23. Chaloupková, V., Ivanova, T., Ekrt, O., Kabutey, A., & Herák, D. (2018). Determination of Particle Size and Distribution through Image-Based Macroscopic Analysis of the Structure of Biomass Briquettes. *Energies*, 11(2), 331. <https://doi.org/10.3390/en11020331>
24. Кіндзера, Д. П., Атаманюк, В. М., Госовський, Р. Р., & Мотіль, І. М. (2013). Дослідження процесу формування паливних брикетів із рослинної сировини та визначення їх характеристик. *Науковий вісник НЛТУ України*, (23.17), 138–146.
25. Манзій, С. О., Копанський, М. М., & Ференц, О. Б. (2010). Порівняльні характеристики гранульованого та брикетованого біопалива. *Науковий вісник НЛТУ України*, 20(3), 88–90.

26. Мальований, М. С., & Бать, Р. Я. (2011). Гранулювання паливних матеріалів. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8)(51), 8–12.
27. Ezeokolie, E. D., Maduoma, T. U., Akpotabor, E. M., Akanni, O., Garbati, A. A., Odeh, A. A., & Esonwune, J. N. (2024). Production and optimization of briquette (solid fuels) from waste biomass using industrial starch as binder. *European Journal of Sustainable Development Research*, 8(4), em0270. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/15138>
28. Lomunyak, G., Osodo, B., Njoka, F., & Kombe, E. (2024). Characterization, optimization and emission analysis of manually-made charcoal dust briquettes with starch, paper and algae binders. *Heliyon*, 10(24), e40991. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40991>
29. Chipangura, W., Masauli, B., Mungwari, C. P., Nyamunda, B. C., Madziwa, T. N., Nyathi, L., & Chigondo, M. (2024). Fabrication of briquettes from charcoal fines using tannin formaldehyde resin as a binder. *European Journal of Sustainable Development Research*, 8(1), em0249. <https://doi.org/10.29333/ejosdr/14125>
30. Uwaoma, R. C., Henning, C. N., Bunt, J. R., Leokaoko, N. T., & Neomagus, H. W. J. P. (2022). Comparison of industrial wastes as a binder in the agglomeration of coal fines. *Results in Engineering*, 16, 100729. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100729>
31. Ганженко, О. М., Гументик, М. Я., & Квак, В. М. (2015). Технологія виробництва твердого біопалива з міскантусу. *Біоенергетика*, 2, 13–17.
32. Asefon, T. I., & Adepoju, K. (2024). A Review on Fuel Wood Consumption and Implications on the Environment. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 28(9), 166–171. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2024/v28i9819>
33. Berg, K. E. (2024). Fuel Alternatives for Developing Countries. В F. Montagnini (Ред.), *Integrating Landscapes: Agroforestry for Biodiversity Conservation and*

- Food Sovereignty* (Вип. 14, с. 487–510). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-54270-1_16
34. Moahmmed, D., & Messaoud, H. (2024). Renewable Energy and Agriculture. В G. C. Lazaroiu, M. Roscia, & V. S. Dancu (Ред.), *Energy Transition Holistic Impact Challenge (ETHIC): A New Environmental and Climatic Era* (с. 233–273). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-55448-3_11
 35. Хіврич, О. Б., Квак, В. М., Каськів, В. В., Мамайсур, В. В., & Макаренко, А. С. (2011). Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. *Агробіологія*, 6, 153–157.
 36. Pogorilyu, L., Khalin, S., Smolyar, V., & Kovtun, O. (2022). Relevance of Using Miscanthus as Biomass for Burning in Solid Fuel Boilers. *Technical and technological aspects of development and testing of new machinery and technologies for agriculture of Ukraine*, (30(44)). [https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30\(44\)-21](https://doi.org/10.31473/2305-5987-2022-1-30(44)-21)
 37. Sabluk, V. T., Hryshchenko, O. M., Smirnykh, V. M., & Pedos, V. P. (2021). Phytophagous energy plantings of willow. *Bioenergy*, (2). <https://doi.org/10.47414/be.2.2020.224984>
 38. Fedoreiko, V. S., Luchko, M. R., Iskerskyi, I. S., & Zahorodnii, R. I. (2019). Enhancing the efficiency of energy generation systems based on solid biofuels: technical and economic aspects. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (2), 94–100. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-2/14>
 39. Prasad, S., Sheetal, K. R., Renjith, P. S., Kumar, A., & Kumar, S. (2019). Sweet Sorghum: An Excellent Crop for Renewable Fuels Production. В A. A. Rastegari, A. N. Yadav, & A. Gupta (Ред.), *Prospects of Renewable Bioprocessing in Future Energy Systems* (Вип. 10, с. 291–314). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-14463-0_11
 40. Muarif, A., Mulyawan, R., Fikri, A., Yulisda, D., Sutarma, D., Rukmana, I., & Pane, A. (2024). Analysis of Briquettes Characteristics Made of Oil Palm Frond Waste and Sugarcane Bagasse with Tapioca Starch Adhesive. *Proceedings of*

- Malikussaleh International Conference on Multidisciplinary Studies (MICoMS)*, 4, 00010. <https://doi.org/10.29103/micoms.v4i.888>
41. Pestaño, L. D. B., & Jose, W. I. (2016). Production of Solid Fuel by Torrefaction Using Coconut Leaves As Renewable Biomass. *International Journal of Renewable Energy Development*, 5(3), 187–197. <https://doi.org/10.14710/ijred.5.3.187-197>
 42. Hargono, H., Zuhrah, A., & Hafizh Azizi, R. (2024). The Influence of Rice Husks, Coconut Shells, and Sugarcane Bagasse on the Quality of Bio Briquettes. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*, 2415–2418. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24OCT1370>
 43. Dewita, A., Faisal, M., & Gani, A. (2020). Physical Characteristics of Briquettes Made of Oil Palm Empty Fruit Bunches (EFB) Using Brown Algae Adhesive. *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 15(1), 38–44. <https://doi.org/10.23955/rkl.v15i1.15429>
 44. Amarasekara, A., Tanzim, F. S., & Asmatulu, E. (2017). Briquetting and carbonization of naturally grown algae biomass for low-cost fuel and activated carbon production. *Fuel*, 208, 612–617. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.07.034>
 45. Гелету́ха, Г. Г., Желе́зна, Т. А., & Трибой О.В. (2014, Вересень 12). Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні. Аналітична записка БАУ №10. Вилучено із <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-10-ua.pdf>
 46. Гелету́ха, Г. Г., & Желе́зна, Т. А. (2014, Лютий 25). Перспективи використання відходів сільського господарства для виробництва енергії в Україні. Аналітична записка БАУ №7. Вилучено із <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-7-ua.pdf>
 47. Kindzera, D., Hosovskyi, R., Atamanyuk, V., & Symak, D. (2021). Heat Transfer Process During Filtration Drying of Grinded Sunflower Biomass. *Chemistry & Chemical Technology*, 15(1), 118–124. <https://doi.org/10.23939/chcht15.01.118>

48. Fedoreiko, V. S., Rutylo, M. I., Iskerskyi, I. S., & Zahorodnii, R. I. (2020). Optimization of heat production processes in the biofuel vortex combustion systems. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (6), 83–88. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2020-6/083>
49. Smith, G. M., & Lindley, J. A. (1988). An evaluation of two sunflower residue fuels. *Biomass*, 16(4), 215–224. [https://doi.org/10.1016/0144-4565\(88\)90027-3](https://doi.org/10.1016/0144-4565(88)90027-3)
50. Ivashchuk, O. S., Chyzhovych, R. A., Atamanyuk, V. M., Manastyrsk, V. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using of barley bran in the production of alternative solid fuel from coffee production waste. *Journal of Chemistry and Technologies*, 31(2), 318–324. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v31i2.274932>
51. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, S. S., Zherebetskyi, 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>
52. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kiiaieva, 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>
53. Glovyn, N. M. (2017). Effect of alcohol on bards agrochemical soil properties. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 19(74). <https://doi.org/10.15421/nvlvet7442>
54. Хижняк, М. І., & Цьонь, Н. І. (2010). Спиртова барда як цінна кормова добавка й органічне добриво у сільському господарстві. *Рибогосподарська наука України*, 2, 122–130.
55. Beltrán, F. J., Álvarez, P. M., Rodríguez, E. M., García-Araya, J. F., & Rivas, J. (2001). Treatment of High Strength Distillery Wastewater (Cherry Stillage) by Integrated Aerobic Biological Oxidation and Ozonation. *Biotechnology Progress*, 17(3), 462–467. <https://doi.org/10.1021/bp010021c>
56. Nataraj, S. K., Hosamani, K. M., & Aminabhavi, T. M. (2006). Distillery wastewater treatment by the membrane-based nanofiltration and reverse osmosis

- processes. *Water Research*, 40(12), 2349–2356. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.04.022>
57. Мазур, А. Г., Ціхановська, В. М., & Гонтарук, Я. В. (2013). Перспективи виробництва біогазу на спиртових заводах Вінницької області. *Наукові праці інституту біоенергетичних культур і цукрових буряків: збірник наукових праць*, 19, 245–249.
58. Mikucka, W., & Zielińska, M. (2020). Distillery Stillage: Characteristics, Treatment, and Valorization. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 192(3), 770–793. <https://doi.org/10.1007/s12010-020-03343-5>
59. Голуб, Н. Б., & Потапова, М. В. (2018). Технологія одержання біогазу з післяспиртової барди. *Відновлювана енергетика*, 2, 70–77.
60. Mussatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.06.001>
61. 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)
62. Mussatto, S. I. (2014). Brewer's spent grain: a valuable feedstock for industrial applications: Brewer's spent grain and its potential applications. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 94(7), 1264–1275. <https://doi.org/10.1002/jsfa.6486>
63. Eliopoulos, C., Arapoglou, D., Chorianopoulos, N., Markou, G., & Haroutounian, S. A. (2022). 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>
64. 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>

65. Hassan, S. S., Ravindran, R., Jaiswal, S., Tiwari, B. K., Williams, G. A., & Jaiswal, A. K. (2020). An evaluation of sonication pretreatment for enhancing saccharification of brewers' spent grain. *Waste Management*, *105*, 240–247. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.02.012>
66. Aboukila, E. F., Nassar, I. N., Rashad, M., Hafez, M., & Norton, J. B. (2018). Reclamation of calcareous soil and improvement of squash growth using brewers' spent grain and compost. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, *17*(4), 390–397. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2016.09.005>
67. Combest, S., & Warren, C. (2019). Perceptions of college students in consuming whole grain foods made with Brewers' Spent Grain. *Food Science & Nutrition*, *7*(1), 225–237. <https://doi.org/10.1002/fsn3.872>
68. 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>
69. Öztürk, S., Özboy, Ö., Cavidoğlu, İ., & Köksel, H. (2002). Effects of brewer's spent grain on the quality and dietary fibre content of cookies. *Journal of the Institute of Brewing*, *108*(1), 23–27. <https://doi.org/10.1002/j.2050-0416.2002.tb00116.x>
70. Макас, А. (2021). Сучасні методи утилізації кавового шламу, як елемент природоохоронних технологій. В *Scientific practice: modern and classical research methods*, European Scientific Platform. <https://doi.org/10.36074/logos-15.10.2021.21>
71. Martinez-Saez, N., García, A. T., Pérez, I. D., Rebollo-Hernanz, M., Mesías, M., Morales, F. J., ... Del Castillo, M. D. (2017). Use of spent coffee grounds as food ingredient in bakery products. *Food Chemistry*, *216*, 114–122. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.07.173>
72. Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, *66*, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>

73. Woo, D.-G., Kim, S. H., & Kim, T. H. (2021). Solid Fuel Characteristics of Pellets Comprising Spent Coffee Grounds and Wood Powder. *Energies*, *14*(2), 371. <https://doi.org/10.3390/en14020371>
74. Siahaan, H. N., Putra, H. S., & Hasibuan, M. F. A. (2023). Utilization of Coffee Commodity Agricultural Waste Through Partnership Towards Sustainable Production and Consumption. *Jurnal Biologi Tropis*, *23*(2), 230–236. <https://doi.org/10.29303/jbt.v23i2.6161>
75. Iriundo-DeHond, A., Iriundo-DeHond, M., & Del Castillo, M. D. (2020). Applications of Compounds from Coffee Processing By-Products. *Biomolecules*, *10*(9), 1219. <https://doi.org/10.3390/biom10091219>
76. Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(12), 3493–3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
77. Mesa, L., González, E., Cara, C., González, M., Castro, E., & Mussatto, S. I. (2011). The effect of organosolv pretreatment variables on enzymatic hydrolysis of sugarcane bagasse. *Chemical Engineering Journal*, *168*(3), 1157–1162. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.02.003>
78. Leow, Y., Yew, P. Y. M., Chee, P. L., Loh, X. J., & Kai, D. (2021). Recycling of spent coffee grounds for useful extracts and green composites. *RSC Advances*, *11*(5), 2682–2692. <https://doi.org/10.1039/D0RA09379C>
79. Kwon, E. E., Yi, H., & Jeon, Y. J. (2013). Sequential co-production of biodiesel and bioethanol with spent coffee grounds. *Bioresource Technology*, *136*, 475–480. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.052>
80. Abdullah, M., & Bulent Koc, A. (2013). Oil removal from waste coffee grounds using two-phase solvent extraction enhanced with ultrasonication. *Renewable Energy*, *50*, 965–970. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.073>
81. McNutt, J., & He, Q. (Sophia). (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, *71*, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>

82. Misra, V., & Shrivastava, A. K. (2022). Understanding the Sugar Beet Crop and Its Physiology. В V. Misra, S. Srivastava, & A. K. Mall (Ред.), *Sugar Beet Cultivation, Management and Processing* (с. 11–25). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2730-0_2
83. Жнива-2023: В Україні намолочено 71,5 млн тонн олійних та зернових культур. (б. д.). Вилучено 23, Грудень 2024, із <https://minagro.gov.ua/news/zhnyva-2023-v-ukraini-namolocheno-715-mln-tonn-oliinykh-ta-zernovykh-kultur>
84. Семенова, О. І., Бублієнко, Н. О., & Вітюк, О. І. (2013). Сучасні напрямки використання та утилізації бурякового жому. В *Efektivni Nastroje Modernich Ved – 2013 : Матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції* (с. 10–12). Вилучено із <https://dspace.nuft.edu.ua/handle/123456789/9061>
85. Muir, B. M., & Anderson, A. R. (2022). Development and Diversification of Sugar Beet in Europe. *Sugar Tech*, 24(4), 992–1009. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01036-9>
86. Joanna, B., Michal, B., Piotr, D., Agnieszka, W., Dorota, K., & Izabela, W. (2018). Sugar Beet Pulp as a Source of Valuable Biotechnological Products. В *Advances in Biotechnology for Food Industry* (с. 359–392). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811443-8.00013-X>
87. Zheng, Y., Lee, C., Yu, C., Cheng, Y.-S., Zhang, R., Jenkins, B. M., & VanderGheynst, J. S. (2013). Dilute acid pretreatment and fermentation of sugar beet pulp to ethanol. *Applied Energy*, 105, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.11.070>
88. Yapo, B. M., & Gnakri, D. (2015). Pectic Polysaccharides and Their Functional Properties. В K. G. Ramawat & J.-M. Mérillon (Ред.), *Polysaccharides* (с. 1729–1749). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-16298-0_62
89. Prandi, B., Baldassarre, S., Babbar, N., Bancalari, E., Vandezande, P., Hermans, D., & Sforza, S. (2018). Pectin oligosaccharides from sugar beet pulp: molecular

- characterization and potential prebiotic activity. *Food & Function*, 9(3), 1557–1569. <https://doi.org/10.1039/C7FO01182B>
90. Al-Tamimi, M. A. H. M., Palframan, R. J., Cooper, J. M., Gibson, G. R., & Rastall, R. A. (2006). In vitro fermentation of sugar beet arabinan and arabinooligosaccharides by the human gut microflora. *Journal of Applied Microbiology*, 100(2), 407–414. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2005.02780.x>
91. Mojovic, L., Pejin, D., Grujic, O., Markov, S., Pejin, J., Rakin, M., & Savic, D. (2009). Progress in the production of bioethanol on starch-based feedstocks. *Chemical Industry and Chemical Engineering Quarterly*, 15(4), 211–226. <https://doi.org/10.2298/CICEQ0904211M>
92. Gumienna, M., Szambelan, K., Jeleń, H., & Czarnecki, Z. (2014). Evaluation of ethanol fermentation parameters for bioethanol production from sugar beet pulp and juice: Sugar beet for bioethanol production. *Journal of the Institute of Brewing*, n/a-n/a. <https://doi.org/10.1002/jib.181>
93. Zarringhalam-Moghaddam, A., Gholipour-Zanjani, N., Dorosti, S., & Vaez, M. (2011). Physical properties of solid fuel briquettes from bituminous coal waste and biomass. *Journal of Coal Science and Engineering (China)*, 17(4), 434–438. <https://doi.org/10.1007/s12404-011-0415-7>
94. Zanjani, N. G., Moghaddam, A. Z., & Dorosti, S. (2013). Physical and Chemical Properties of Beet Pulp/Mezino Bituminous Coal Briquettes. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35(22), 2173–2180. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.532188>
95. Usmani, Z., Sharma, M., Diwan, D., Tripathi, M., Whale, E., Jayakody, L. N., ... Gupta, V. K. (2022). Valorization of sugar beet pulp to value-added products: A review. *Bioresource Technology*, 346, 126580. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126580>
96. Yadav, S., Malik, A., Pathera, A., Islam, R. U., & Sharma, D. (2016). Development of dietary fibre enriched chicken sausages by incorporating corn bran, dried apple pomace and dried tomato pomace. *Nutrition & Food Science*, 46(1), 16–29. <https://doi.org/10.1108/NFS-05-2015-0049>

97. Yadav, S., Malik, A. K., Pathera, A. K., Islam, R. U., & Sharma, D. P. (2016). Development of fibre enriched chicken nuggets by incorporating wheat bran and dried apple pomace. *Indian Journal of Poultry Science*, 51(3), 312. <https://doi.org/10.5958/0974-8180.2016.00052.0>
98. Jung, J., Cavender, G., & Zhao, Y. (2015). Impingement drying for preparing dried apple pomace flour and its fortification in bakery and meat products. *Journal of Food Science and Technology*, 52(9), 5568–5578. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1680-4>
99. Rocha Parra, A. F., Ribotta, P. D., & Ferrero, C. (2015). Apple pomace in gluten-free formulations: effect on rheology and product quality. *International Journal of Food Science & Technology*, 50(3), 682–690. <https://doi.org/10.1111/ijfs.12662>
100. Mir, S. A., Bosco, S. J. D., Shah, M. A., Santhalakshmy, S., & Mir, M. M. (2017). Effect of apple pomace on quality characteristics of brown rice based cracker. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 16(1), 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.jssas.2015.01.001>
101. Vaez, S., Karimi, K., Denayer, J. F. M., & Kumar, R. (2023). Evaluation of apple pomace biochemical transformation to biofuels and pectin through a sustainable biorefinery. *Biomass and Bioenergy*, 172, 106757. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106757>
102. Molinuevo-Salces, B., Riaño, B., Hijosa-Valsero, M., González-García, I., Paniagua-García, A. I., Hernández, D., & García-González, M. C. (2020). Valorization of apple pomaces for biofuel production: A biorefinery approach. *Biomass and Bioenergy*, 142, 105785. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105785>
103. Chatanta, D., Attri, C., Gopal, K., Devi, M., Gupta, G., & Bhalla, T. (2007). Bioethanol Production from Apple Pomace left after Juice Extraction. *The Internet Journal of Microbiology*, 5(2). <https://doi.org/10.5580/3a8>
104. Claes, A., Melchi, L., Uludag-Demirer, S., & Demirer, G. N. (2021). Supplementation of Carbon-Based Conductive Materials and Trace Metals to

- Improve Biogas Production from Apple Pomace. *Sustainability*, 13(17), 9488. <https://doi.org/10.3390/su13179488>
105. Llana Coalla, H., Blanco Fernández, J. M., Morís Morán, M. A., & López Bobo, M. R. (2009). Biogas generation apple pulp. *Bioresource Technology*, 100(17), 3843–3847. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.03.012>
106. Riggio, V., Comino, E., & Rosso, M. (2015). Energy production from anaerobic co-digestion processing of cow slurry, olive pomace and apple pulp. *Renewable Energy*, 83, 1043–1049. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.056>
107. Xu, R., Ferrante, L., Hall, K., Briens, C., & Berruti, F. (2011). Thermal self-sustainability of biochar production by pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 91(1), 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.01.001>
108. Wu, L., Buchholz, D., Vaalma, C., Giffin, G. A., & Passerini, S. (2016). Apple-Biowaste-Derived Hard Carbon as a Powerful Anode Material for Na-Ion Batteries. *ChemElectroChem*, 3(2), 292–298. <https://doi.org/10.1002/celec.201500437>
109. Liu, H., Kumar, V., Jia, L., Sarsaiya, S., Kumar, D., Juneja, A., & Awasthi, M. K. (2021). Biopolymer poly-hydroxyalkanoates (PHA) production from apple industrial waste residues: A review. *Chemosphere*, 284, 131427. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131427>
110. Gustafsson, J., Landberg, M., Batori, V., Åkesson, D., Taherzadeh, M. J., & Zamani, A. (2019). Development of Bio-Based Films and 3D Objects from Apple Pomace. *Polymers*, 11(2), 289. <https://doi.org/10.3390/polym11020289>
111. Bhushan, S., Kalia, K., Sharma, M., Singh, B., & Ahuja, P. S. (2008). Processing of Apple Pomace for Bioactive Molecules. *Critical Reviews in Biotechnology*, 28(4), 285–296. <https://doi.org/10.1080/07388550802368895>
112. Tkach, V., Rumiantsev, M., Kobets, O., Luk'yanets, V., & Musienko, S. (2019). Ukrainian plain oak forests and their natural regeneration. *Forestry Studies*, 71(1), 17–29. <https://doi.org/10.2478/fsmu-2019-0010>
113. Rumiantsev, M., Lukyanets, V., Musienko, S., Mostepanyuk, A., & Obolonyk, I. (2018). Main problems in natural seed regeneration of pedunculate oak (*Quercus*

- robur* L.) stands in Ukraine. *Forestry Studies*, 69(1), 7–23. <https://doi.org/10.2478/fsmu-2018-0008>
114. Rumiantsev, M., Kobets, O., Vysotska, N., Luk'yanets, V., Obolonyk, I., Tupchii, O., & Nazarenko, V. (2023). Acorn production of pedunculate oak in northeast of Ukraine. *Forestry Studies*, 78(1), 14–27. <https://doi.org/10.2478/fsmu-2023-0002>
115. Cantos, E., Espín, J. C., López-Bote, C., De La Hoz, L., Ordóñez, J. A., & Tomás-Barberán, F. A. (2003). Phenolic Compounds and Fatty Acids from Acorns (*Quercus* spp.), the Main Dietary Constituent of Free-Ranged Iberian Pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(21), 6248–6255. <https://doi.org/10.1021/jf030216v>
116. Ventanas, S., Ventanas, J., Tovar, J., García, C., & Estévez, M. (2007). Extensive feeding versus oleic acid and tocopherol enriched mixed diets for the production of Iberian dry-cured hams: Effect on chemical composition, oxidative status and sensory traits. *Meat Science*, 77(2), 246–256. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.03.010>
117. Sales-Campos, H., Reis De Souza, P., Crema Peghini, B., Santana Da Silva, J., & Ribeiro Cardoso, C. (2013). An Overview of the Modulatory Effects of Oleic Acid in Health and Disease. *Mini-Reviews in Medicinal Chemistry*, 13(2), 201–210. <https://doi.org/10.2174/1389557511313020003>
118. Karabas, H. (2013). Biodiesel production from crude acorn (*Quercus frainetto* L.) kernel oil: An optimisation process using the Taguchi method. *Renewable Energy*, 53, 384–388. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.12.002>
119. Karabas, H. (2014). The optimum production parameters of methyl ester from acorn kernel oil. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2), 625–628. <https://doi.org/10.1002/ep.11819>
120. Chao, B., Liu, R., Zhang, X., Zhang, X., & Tan, T. (2017). Tannin extraction pretreatment and very high gravity fermentation of acorn starch for bioethanol production. *Bioresource Technology*, 241, 900–907. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.026>

121. Heidari, F., Asadollahi, M. A., Jeyhanipour, A., Kheyrandish, M., Rismani-Yazdi, H., & Karimi, K. (2016). Biobutanol production using unhydrolyzed waste acorn as a novel substrate. *RSC Advances*, 6(11), 9254–9260. <https://doi.org/10.1039/C5RA23941A>
122. Sasaki, C., Kushiki, Y., Asada, C., & Nakamura, Y. (2014). Acetone–butanol–ethanol production by separate hydrolysis and fermentation (SHF) and simultaneous saccharification and fermentation (SSF) methods using acorns and wood chips of *Quercus acutissima* as a carbon source. *Industrial Crops and Products*, 62, 286–292. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.08.049>
123. Allouch, M., Alami, M., & Boukhelifi, F. (2015). Production of fuel friquettes from acorn shells and acorn cups. B 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC) (с. 1–7). Представлена на 2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Marrakech: IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRSEC.2015.7455026>
124. Mason, A. S. (Ред.). (2017). *Polyploidy and Hybridization for Crop Improvement*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315369259>
125. Massantini, R., Moschetti, R., & Frangipane, M. T. (2021). Evaluating progress of chestnut quality: A review of recent developments. *Trends in Food Science & Technology*, 113, 245–254. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.04.036>
126. Hu, M., Yang, X., & Chang, X. (2021). Bioactive phenolic components and potential health effects of chestnut shell: A review. *Journal of Food Biochemistry*, 45(4). <https://doi.org/10.1111/jfbc.13696>
127. Pereira-Lorenzo, S., Ramos-Cabrer, A. M., Díaz-Hernández, M. B., Ciordia-Ara, M., & Ríos-Mesa, D. (2006). Chemical composition of chestnut cultivars from Spain. *Scientia Horticulturae*, 107(3), 306–314. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.08.008>
128. Przyborska, J., Hall, M. C., & Concannon, M. (2019). In vitro determination of prebiotic potential of aqueous extract of horse chestnut by-product. *Bioactive Carbohydrates and Dietary Fibre*, 19, 100190. <https://doi.org/10.1016/j.bcdf.2019.100190>

129. Correia, P., & Beirão-da-Costa, M. L. (2012). Effect of drying temperatures on starch-related functional and thermal properties of chestnut flours. *Food and Bioproducts Processing*, *90*(2), 284–294. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2011.06.008>
130. Demirkesen, I. (2016). Formulation of Chestnut Cookies and their Rheological and Quality Characteristics. *Journal of Food Quality*, *39*(4), 264–273. <https://doi.org/10.1111/jfq.12209>
131. Demirkesen, I., Campanella, O. H., Sumnu, G., Sahin, S., & Hamaker, B. R. (2014). A Study on Staling Characteristics of Gluten-Free Breads Prepared with Chestnut and Rice Flours. *Food and Bioprocess Technology*, *7*(3), 806–820. <https://doi.org/10.1007/s11947-013-1099-3>
132. Wilkinson, J. A., & Brown, A. M. G. (1999). Horse Chestnut – *Aesculus Hippocastanum*: Potential Applications in Cosmetic Skin-care Products. *International Journal of Cosmetic Science*, *21*(6), 437–447. <https://doi.org/10.1046/j.1467-2494.1999.234192.x>
133. Góral, I., & Wojciechowski, K. (2020). Surface activity and foaming properties of saponin-rich plants extracts. *Advances in Colloid and Interface Science*, *279*, 102145. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2020.102145>
134. Timilsena, Y. P., Phosanam, A., & Stockmann, R. (2023). Perspectives on Saponins: Food Functionality and Applications. *International Journal of Molecular Sciences*, *24*(17), 13538. <https://doi.org/10.3390/ijms241713538>
135. Elizabeth, C. R., & Araceli, R. M. C. (2024). Solar energy utilization and conservation in an industrial solar drying process. *Clean Energy Science and Technology*, *2*(4), 218. <https://doi.org/10.18686/cest218>
136. Kivevele, T., & Huan, Z. (2014). A review on opportunities for the development of heat pump drying systems in South Africa. *South African Journal of Science*, *110*(5/6), 11. <https://doi.org/10.1590/sajs.2014/20130236>
137. Guo, W., Cheng, S., Cui, Z., He, D., Zhang, X., Shi, T., & Du, J. (2024). Dynamic drying characteristics of alfalfa under solar energy-heat pump combined drying

- conditions. *INMATEH Agricultural Engineering*, 569–580. <https://doi.org/10.35633/inmateh-73-48>
138. Снежкін, Ю. Ф., Muliar, В. П., & Дабіжа, Н. О. (2016). Аналіз сучасних способів сушіння та розробка оптимального режиму сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів у теплонасосній сушарці з комбінованим теплопідводом. *Кераміка: наука і життя*, (1(30)), 42. <https://doi.org/10.26909/csl.1.2016.5>
139. Petrova, Z., Samoilenko, K., Novikova, Y., & Petrov, P. (2022). Equilibrium Humidity as One of Important Energy-Efficiency Indexes in Drying of Food Powder Materials of Biological Nature. *Energy engineering and control systems*, 8(2), 90–97. <https://doi.org/10.23939/jeeecs2022.02.090>
140. Shapar, R. O., Sorokova, N. M., & Husarova, O. V. (2020). Resources and energy savings in the processing of thermolable plant materials for the dried products. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 2(3), 79–84. <https://doi.org/10.32838/TNU-2663-5941/2020.3-2/14>
141. Sorokova, N., Didur, V., & Variny, M. (2022). Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer during Moisture–Heat Treatment of Castor Beans to Improve the Quality of Vegetable Oil. *Agriculture*, 12(9), 1356. <https://doi.org/10.3390/agriculture12091356>
142. Sorokova, N., Variny, M., Pysmennyu, Y., & Kol'chik, Y. (2023). Mathematical Model and Numerical Method of Calculating the Dynamics of High-Temperature Drying of Milled Peat for the Production of Fuel Briquettes. *Computation*, 11(3), 53. <https://doi.org/10.3390/computation11030053>
143. Deb, S., Chandra Pradhan, R., Subbarao, P. M. V., & Yadav, S. (2024). Convective Drying. B. K. M. Gangawane, M. Dwivedi, & R. Chandra Pradhan (Ред.), *Advanced Computational Approaches for Drying in Food Processing* (с. 75–104). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-62550-3_4
144. Mujumdar, A. S. (Ред.). (2014). *Handbook of Industrial Drying*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208>

145. 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>
146. Атаманюк, В. М., & Гумницький, Я. М. (2013). Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. *Монографія. Львів: Видавництво Національного університету – Львівська політехніка.*
147. Атаманюк, В. М. (2007). *Гідродинаміка і масообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: Дис. докт. техн. наук: 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка».* Львів.
148. Aksel'rud, G. A., Khanyk, Ya. N., & Strepko, M. P. (1992). Filtration drying kinetics of gas-permeable articles. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 63(6), 1215–1220. <https://doi.org/10.1007/BF00853523>
149. Aksel'rud, G. A., Chernyavskii, A. I., & Khanyk, Ya. N. (1978). Drying in heated gas flows. *Journal of Engineering Physics*, 34(2), 150–153. <https://doi.org/10.1007/BF00861231>
150. Aksel'rud, G. A., Khanyk, Ya. N., & Topchii, V. I. (1986). Hydrodynamics of the filtration process of drying. *Journal of Engineering Physics*, 50(6), 677–681. <https://doi.org/10.1007/BF00871538>
151. Гузьова, І. О. (2001). *Гідродинаміка та тепломасообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури: Дис. канд. техн. наук: 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка».* Львів.
152. Мосюк, М. І. (2012). *Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої «енергетичної» верби в стаціонарному шарі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка».* Львів.
153. Матківська, І. Я. (2015). *Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці: Дис. канд. техн. наук: 05.14.06 / Національний ун-т «Львівська політехніка».* Львів.

154. Микичак, Б. М., Ханик, Я. М., Кіндзера, Д. П., & Ярош, Я. Д. (2008). Кінетика фільтраційного сушіння струганого шпону. *Науковий вісник УкрДЛТУ: збірник науково-технічних праць*, 18(3), 148–156.
155. Matkivska, I., Atamanyuk, V., & Symak, D. (2014). Basic regularities of the filtration drying of wheat grain. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(5(71)), 14. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.27975>
156. Atamanyuk, V. M., Kochubei, V. V., Kindzera, D. P., & Tsiura, N. Y. (2022). Investigation of the dehydration process of iron(II) sulfate heptahydrate by filtration method. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (5), 24–32. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2022-144-5-24-32>
157. Atamanyuk, V., Huzova, I., Gnativ, Z., & Mykychak, B. (2016). Selection of optimal method of forming a layer of candied fruits during filtration drying. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 5(11 (83)), 10–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.81409>
158. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., & Chyzhovych, R. A. (2024). Valourization of using efficiency of filtration drying for alcohol distillery stillage. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 10, 100820. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100820>
159. Huzova, I. (2020). Investigation of the Energy-Saving Method during Candied Fruits Filtration Drying. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 64(4), 555–561. <https://doi.org/10.3311/PPch.15107>
160. 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>
161. Gnativ, Z. Ya., Ivashchuk, O. S., Hrynychuk, Yu. M., Reutskyi, V. V., Koval, I. Z., & Vashkurak, Yu. Z. (2020). Modeling of internal diffusion mass transfer during filtration drying of capillary-porous material. *Mathematical Modeling and Computing*, 7(1), 22–28. <https://doi.org/10.23939/mmc2020.01.022>

162. Hosovkyi, R., Kindzera, D., & Atamanyuk, V. (2016). Diffusive Mass Transfer during Drying of Grinded Sunflower Stalks. *Chemistry & Chemical Technology*, 10(4), 459–463. <https://doi.org/10.23939/chcht10.04.459>
163. Barna, I., Gumnytskyi, Y., & Atamanyuk, V. (2013). Intradiffusion Mass Transfer during Drying of Slag Gravel Raw Granule. *Chemistry & Chemical Technology*, 7(4), 461–465. <https://doi.org/10.23939/chcht07.04.461>
164. Kobeyeva, Z., Khussanov, A., Atamanyuk, V., Hnativ, Z., Kaldybayeva, B., Janabayev, D., & Gnylianska, L. (2022). Analyzing the kinetics in the filtration drying of crushed cotton stalks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8(115)), 55–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252352>
165. Atamanyuk, V., Gnativ, Z., Kindzera, D., Janabayev, D., Khusanov, A., & Kaldybaeva, B. (2020). Hydrodynamics of Cotton Filtration Drying. *Chemistry & Chemical Technology*, 14(3), 426–432. <https://doi.org/10.23939/chcht14.03.426>
166. Harari, Z. (2024). Investigating the Mathematical Foundations of the Euler and Navier-Stokes Equations. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 14(04), 242–258. <https://doi.org/10.4236/ojfd.2024.144012>
167. Kollmann, W. (2024). Navier-Stokes Equations. B *Navier-Stokes Turbulence* (c. 17–55). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-59578-3_2
168. Spalart, P. R. (2000). Strategies for turbulence modelling and simulations. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(3), 252–263. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(00\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(00)00007-2)
169. Zhou, L., Elemam, M. A., Agarwal, R. K., & Shi, W. (2024). Computational Fluid Dynamic (CFD). B *Discrete Element Method for Multiphase Flows with Biogenic Particles* (c. 65–82). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67729-8_4
170. Ansys Fluent | Fluid Simulation Software. (б. д.). Вилучено 23, Грудень 2024, із <https://www.ansys.com/products/fluids/ansys-fluent>

171. SOLIDWORKS 3D Fluid Simulation & Flow Modeling Software. (2017, Листопад 28). Вилучено 23, Грудень 2024, із <https://www.solidworks.com/product/solidworks-flow-simulation>
172. COMSOL: Multiphysics Software for Optimizing Designs. (б. д.). *COMSOL*. Вилучено 23, Грудень 2024, із <https://www.comsol.com/>
173. Liaposhchenko, O., Moiseev, V., Starynskyi, O., Iakymiv, M., & Seif, H. (2023). Numerical Simulation and Optimization of Separation Equipment for Gas Preparation Unit. В V. Ivanov, I. Pavlenko, O. Liaposhchenko, J. Machado, & M. Edl (Ред.), *Advances in Design, Simulation and Manufacturing VI* (с. 138–147). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-32774-2_14
174. Zahir, A., Kumar, P., Saptoro, A., Shah, M., Tiong, A. N. T., & Hameed, S. (2023). Parametric Study of Experimental and CFD Simulation Based Hydrodynamics and Mass Transfer of Rotating Packed Bed: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(6), 4001–4031. <https://doi.org/10.1007/s11831-023-09932-x>
175. Uwitonze, H., Kim, A., Kim, H., Brigljević, B., Vu Ly, H., Kim, S.-S., ... Lim, H. (2022). CFD simulation of hydrodynamics and heat transfer characteristics in gas–solid circulating fluidized bed riser under fast pyrolysis flow condition. *Applied Thermal Engineering*, 212, 118555. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118555>
176. Kravchenko, O., Homan, V., Suvorova, I., & Baranov, I. (2021). Refining The Hydrocavitation Technology For Recycling Hydraulic Fracturing Flowback Water By Using Numerical Simulation And Physical Modelling Methods. *Procedia Environmental Science, Engineering and Management*, 8(1), 283–292.
177. Baranov, I., Kravchenko, O., Suvorova, I., Goman, V., & Veligotskyi, D. (2023). *Constructive tools for mathematical and computer modeling of physical and mechanical fields in the areas of complex shape*. PH “Akademperiodyka”. <https://doi.org/10.15407/akademperiodyka.489.156>

178. Mujumdar, A. S. (2004). Research and Development in Drying: Recent Trends and Future Prospects. *Drying Technology*, 22(1–2), 1–26. <https://doi.org/10.1081/DRT-120028201>
179. ДСТУ ISO 6540:2007 Кукурудза. Визначення вмісту вологи (у цілих та подрібнених зернах) (ISO 6540:1980, IDT). (б. д.).
180. ДСТУ ISO 3944:2003 Добрива. Визначення насипної щільності (без ущільнення) (ISO 3944:1992, IDT). (б. д.). Вилучено із https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=85153
181. Kobeyeva, Z., Khussanov, A., Atamanyuk, V., Hnativ, Z., Kaldybayeva, B., Janabayev, D., & Gnylianska, L. (2022). Analyzing the kinetics in the filtration drying of crushed cotton stalks. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(8(115)), 55–66. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.252352>
182. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Barabakh, S. A. (2024). Kinetic regularities of filtration drying of corn alcohol distillery stillage. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, (1), 12–20. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2024-152-1-12-20>
183. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., Barabakh, S., & Hnativ, Z. (2024). Kinetic Regularities of the Filtration Drying of Barley Brewer's Spent Grain. *Chemistry & Chemical Technology*, 18(1), 66–75. <https://doi.org/10.23939/chcht18.01.066>
184. Dwivedi, N., & Ritesh, D. L. (2024). Impact of Porosity on Underground Structure - A Review. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 72, 439–454. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2024/32402>
185. Zaïdi, H., Fohanno, S., Taïar, R., & Polidori, G. (2010). Turbulence model choice for the calculation of drag forces when using the CFD method. *Journal of Biomechanics*, 43(3), 405–411. <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2009.10.010>
186. Barraza-Jiménez, D., Iliana Torres-Herrera, S., Ponce Peña, P., Omar Ríos-Orozco, C., Padilla Mendiola, A., Marcela Coria Quiñones, E., ... Alberto Flores-Hidalgo, M. (2022). A CFD Porous Materials Model to Test Soil Enriched with

- Nanostructured Zeolite Using ANSYS-Fluent^(TM). В S. Bhattacharyya (Ред.), *Applications of Computational Fluid Dynamics Simulation and Modeling*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.100487>
187. *Ansys Fluent User's Guide*. (2013) (15 вид.). ANSYS, Inc.
188. ДСТУ EN 14774-2:2013 Тверде біопаливо. Визначення вмісту вологи. Метод висушування в сушильній шафі. Частина 2. Загальна волога. Спрощений метод (EN 14774-2:2009, IDT). (2015). Мінекономрозвитку України.
189. ДСТУ EN ISO 18122:2022 Тверде біопаливо. Визначення вмісту золи (EN ISO 18122:2015, IDT; ISO 18122:2015, IDT). (2022). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».
190. ДСТУ EN 14918:2016 Тверде біопаливо. Метод визначення теплотворної здатності (EN 14918:2009, IDT). (б. д.). ДП «Український науково-дослідний і навчальний центр проблем стандартизації, сертифікації та якості».
191. Антонюк, В. С., Тимчик, Г. С., Бондаренко, Ю. Ю., Петльований П.В., Білокінь, С. О., & Бондаренко М.О. (2013). *Методи та засоби мікроскопії: монографія*. Київ: НТТУ КПІ.
192. Барна, І. Р. (2013). *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук: 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка»*. Львів. Вилучено із <https://nrat.ukrintei.ua/searchdoc/0413U007047>
193. Госовський, Р. Р. (2018). *Закономірності фільтраційного сушіння органічної сировини для виготовлення альтернативного палива: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка»*. Львів. Вилучено із <https://lpnu.ua/spetsrady/d-3505209/gosovskyi-roman-romanovych>

194. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., & 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*, 9, 100566. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100566>
195. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., Atamanyuk, V., & Hnativ, Z. (2023). The Computer Modeling of the Thermal Agent Hydrodynamics Through the Alcohol Distillery Stillage Stationary Layer. В *2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)* (с. 1–4). Представлена на 2023 17th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM), Jaroslaw, Poland: IEEE. <https://doi.org/10.1109/CADSM58174.2023.10076496>
196. Чижович, Р., Иващук, О., & Атаманюк, В. (2023). CFD-моделювання потоку теплового агенту через шар ячмінної пивної дробини. *Chemical Technology and Engineering – 2023: Monograph. (Atamanyuk V.M. et al., Eds.)*, 7–14.
197. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Barabakh, S. (2024). Hydrodynamics of filtration drying of food industry secondary raw materials. *The Monograph of the 12th European Young Engineers Conference*, 22–25.
198. Ivashchuk, O., Chyzhovych, R., & Atamanyuk, V. (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>
199. Chyzhovych, R., Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Barabakh, S., & Manastyrska, V. (2024). Hydrodynamics of barley brewer’s spent grain filtration drying. В *12th European Young Engineers Conference* (с. 105).
200. Иващук, О., Атаманюк, В., & Чижович, Р. (2024). Дослідження гідродинаміки фільтраційного сушіння бурякового жому. В *Матеріали та технології в інженерії (МТІ-2024)* (с. 120–121).
201. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., & Chyzhovych, R. (2024). Research on hydrodynamics of the thermal agent flow for the beet pulp filtration drying. *Proceedings of the NTUU “Igor Sikorsky KPI”. Series: Chemical engineering*,

- ecology and resource saving*, (3), 9–18. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.3.2024.312415>
202. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Manastyrska, V., & Sobechko, I. (2024). Evaluation of the Apple Pomace Use as a Raw Material for Alternative Solid Fuel. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 12(4), 1–17. <https://doi.org/10.13044/j.sdewes.d12.0529>
203. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., & Chyzhovych, R. (2024). Investigation of regularities of the filtration drying kinetics of coffee production waste. *Food Science and Technology*, 18(1). <https://doi.org/10.15673/fst.v18i1.2715>
204. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., & Boldyryev, S. (2024). Investigation of the beet pulp filtration drying kinetics. *Environmental Problems*, 9(3), 179–186. <https://doi.org/10.23939/ep2024.03.179>
205. Кіяєва, С. С., Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., & Кузьмінчук, Т. А. (2022). Дослідження кінетики фільтраційного сушіння пивної дробини. В *VII Міжнародний молодіжний конгрес «Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування»* (с. 159).
206. Kiiiaieva, S., Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Kuzminchuk, T., & Kovalchuk, A. (2022). Research into kinetic regularities the brewers grains filtration drying. В *10th European Young Engineers Conference* (с. 83).
207. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Кіяєва, С. С., Дулеба, В. П., & Ковальчук, А. (2022). Фільтраційне сушіння пивної дробини. В *XI Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції, Львів: Видавництво Львівської політехніки*, (с. 161).
208. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Chyzhovych, R., Hnativ, Z., & Kiiiaieva, S. (2022). Filtration drying of food industry waste. В *Advanced polymer materials and technologies: recent trends and current priorities: multi-authored monograph / edited by V. Levytskyi, V. Plavan, V. Skorokhoda, V. Khomenko*. (с. 85–86).

209. Chyzhovych, R., Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Hnativ, Z., Kiiiaieva, S., & Manastyrskya, V. (2023). Filtration drying of secondary raw materials of organic origin. В *11th European Young Engineers Conference* (с. 66).
210. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Барабах, С., Кіяєва, С. С., & Гнатів, З. Я. (2024). Кінетичні закономірності фільтраційного сушіння відходів виробництва кави. В *XII Міжнародна науково-технічна конференція «Поступ в нафтогазопереробній та нафтохімічній промисловості»: матеріали конференції*. – Львів: Видавництво Львівської політехніки (с. 136–137). Вилучено із <https://openreviewhub.org/cte/paper-2023/cfd-modeling-thermal-agent-flow-through-layer-barley-brewers-spent-grain>
211. Атаманюк, В. М. (2007). *Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : 05.17.08 Процеси та обладнання хімічної технології / Національний ун-т «Львівська політехніка»*. Львів.
212. García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *Renewable Energy*, 36(12), 3537–3540. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.05.013>
213. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Manastyrskya, V., Chyzhovych, R., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. В *11th European Young Engineers Conference* (с. 26–29). Warsaw University of Technology.
214. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., & Sobechko, I. B. (2023). Using coffee production waste as a raw material for solid fuel. *Journal of Chemistry and Technologies*, 30(4), 588–594. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v30i4.265116>
215. Oleksandr Ivashchuk, Volodymyr Atamanyuk, Chyzhovych, R, Vladyslava Manastyrskya, S.A. Barabakh, & Iryna Sobechko. (2024). Research of solid fuel production from horse chestnut seeds. *Scopus, WoS, Vol. 32(No. 1)*, 131–137. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i1.291068>

216. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., Барабах, С. А., & Собечко, І. Б. (2024). Дослідження використання жолудів дубу звичайного для виготовлення альтернативного твердого палива. *Journal of Chemistry and Technologies*, 32(3), 599–604. <https://doi.org/10.15421/jchemtech.v32i3.304213>
217. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., & Собечко, І. Б. (2024). Дослідження виготовлення альтернативного твердого палива з бурякового жому. *Scientific Works*, 88(1), 70–75. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v88i1.2963>
218. Іващук О.С, Атаманюк В.М, & Чижович Р.А. (2024, Липень 3). *Тверде паливо*. Патент України №128410. Вилучено із <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1807435/>
219. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Манастирська, В. А., & Собечко, І. Б. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. В *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: колективна монографія* (с. 80–92). Київ: Яроченко Я. В.; ISBN: 978-617-7826-23-0.
220. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Manastyrskaya, V., Chyzhovych, R., Sobechko, I., & Moravskiy, V. (2023). Research of solid fuel briquettes obtaining from brewer's spent grain and coffee waste. В *11th European Young Engineers Conference* (с. 67). Warsaw University of Technology.
221. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Kuzminchuk, T., Zherebetskiy, R., & Kiiaieva, S. (2021). Research of the calorific value of dried alcohol distillery stillage. В *3rd International Scientific Conference «Chemical Technology and Engineering»: Proceedings* (с. 200–201). <https://doi.org/10.23939/cte2021.01.200>
222. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., Кузьмінчук, Т. А., Кіяєва, С. С., & Жеребецький, Р. Р. (2021). Дослідження теплотворної здатності осушеної післяспиртової барди. В *Матеріали XII Міжнародної онлайн-*

- конференції «Проблеми теплофізики та теплоенергетики» (с. 56–57).
Вилучено із <https://openreviewhub.org/cte/paper-2023/cfd-modeling-thermal-agent-flow-through-layer-barley-brewers-spent-grain>
223. Chyzhovych, R., Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., Kiiiaieva, S., Zhrebetskyi, R., & Kovalchuk, A. (2022). Research of the solid fuel briquettes obtaining from alcohol distillery stillage. В *10th European Young Engineers Conference* (с. 83).
224. Іващук, О. С. (2022). Альтернативне тверде паливо з відходів харчової промисловості. В *Перспективи виробництва біосировини енергетичних культур на рекультивованих землях* (с. 123–124).
225. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., Chyzhovych, R. A., Manastyrska, V., & Sobechko, I. (2024). Beet pulp as a raw material for the alternative solid fuel. *Збірник тез доповідей XX Міжнародної наукової конференції «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв», Одеса, ОНТУ, 34–35.*
226. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., & Манастирська, В. А. (2022). Дослідження одержання альтернативного твердого палива із відходів харчової промисловості. В *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. VII Міжнародний конгрес* (с. 73).
227. O’Keeffe, D., RosenBrock, C., Coyle, J., Phillips, P., Pentland, P., Nelson, P., & Lofts, G. (2024). *Jacaranda Physics 1 VCE Units 1 and 2 Fourth edition LearnON and Print*. John Wiley & Sons Australia, Ltd. Вилучено із <https://www.jacaranda.com.au/shop/?SingleProduct=9781119887898#/>
228. Land, C. M. van’t. (2012). *Drying in the process industry*. Hoboken, NJ: Wiley.
229. Атаманюк, В., Кіндзера, Д. П., Гузьова, І. О., Госовський, Р. Р., & Микичак, Б. М. (2017, Квітень 10). Установка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Вилучено із <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/806403>
230. Dziubenko, V. H., Mileikovskiy, V. O., & Sachenko, I. A. (2018). Expansion of the range of wet air I-d diagram for environmental safe heat production.

- Environmental safety and natural resources*, 26(2), 15–22.
<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2018.2.15-22>
231. Rezaei, H., Lim, C. J., & Sokhansanj, S. (2022). A computational approach to determine the residence time distribution of biomass particles in rotary drum dryers. *Chemical Engineering Science*, 247, 116932.
<https://doi.org/10.1016/j.ces.2021.116932>
232. Sai, P. S. T. (2013). Drying of Solids in a Rotary Dryer. *Drying Technology*, 31(2), 213–223. <https://doi.org/10.1080/07373937.2012.711406>
233. Jewiarz, M., Wróbel, M., Mudryk, K., & Szufa, S. (2020). Impact of the Drying Temperature and Grinding Technique on Biomass Grindability. *Energies*, 13(13), 3392. <https://doi.org/10.3390/en13133392>
234. Green, D. W., Southard, M. Z., & Perry, R. H. (Ред.). (2019). *Perry's chemical engineers' handbook* (Ninth edition.). New York: McGraw Hill Education.
235. Іващук, О. С., Атаманюк, В. М., Чижович, Р. А., & Барабах, С. А. (2024). Визначення оптимальних параметрів фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(1), 183–187.
236. Ivashchuk, O., Atamanyuk, V., & Chyzhovych, R. (2024). Efficiency Investigation of Coffee Production Waste Drying by Filtration Method. *Journal of Engineering Sciences*, 11(2), F9–F16.
[https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(2\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(2).f2)
237. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk V.M, Chyzhovych, R.A., Bacho, S., & Boldyryev, S. (2024). Investigation of the efficiency of a beet pulp filtration drying proces, 9(4), 268–274. <https://doi.org/10.23939/ep2024.04.268>
238. Ivashchuk, O. S., Atamanyuk, V. M., & Chyzhovych, R. A. (2024). Evaluation of the efficiency of filtration drying for industrial drying of brewer's spent grain. *Chemistry, Technology and Application of Substances*, 7(2), 161–167.
<https://doi.org/10.23939/ctas2024.02.161>
239. Іващук, О., Атаманюк, В., Чижович, Р., & Барабах, С. (2024). Оцінка ефективності використання фільтраційного сушіння для осушення біомаси.

- В Сталій розвиток – стан та перспективи. IV міжнародний науковий симпозіум в рамках Еразмус+ Модуль Жан Моне «Концепція екосистемних послуг: Європейський досвід» («EE4CES»)* (с. 98–100). Київ: Яро́ченко Я. В.
240. Чижович, Р., Іващук, О., Атаманюк, В., & Барабах, С. (2024). Розрахунок оптимальних параметрів фільтраційного сушіння післяспиртової барди. В *Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. IX Міжнародний молодіжний конгрес, Львів: зб. матер. – Київ : Яро́ченко Я. В.* (с. 236).

ДОДАТКИ

Додаток А

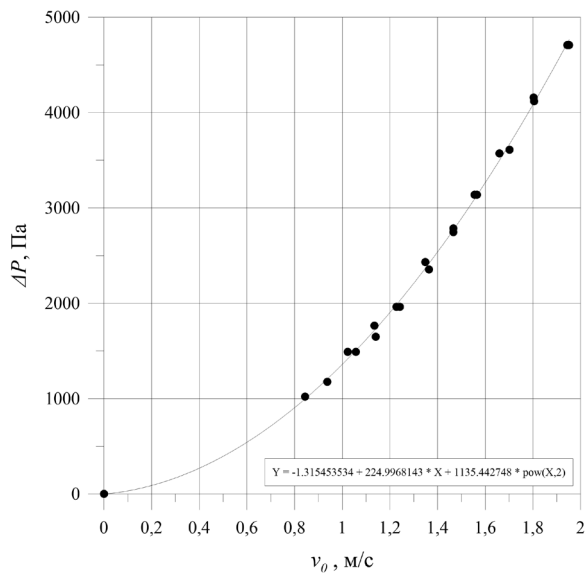


Рис. А1. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із ячмінною пивною дробиною

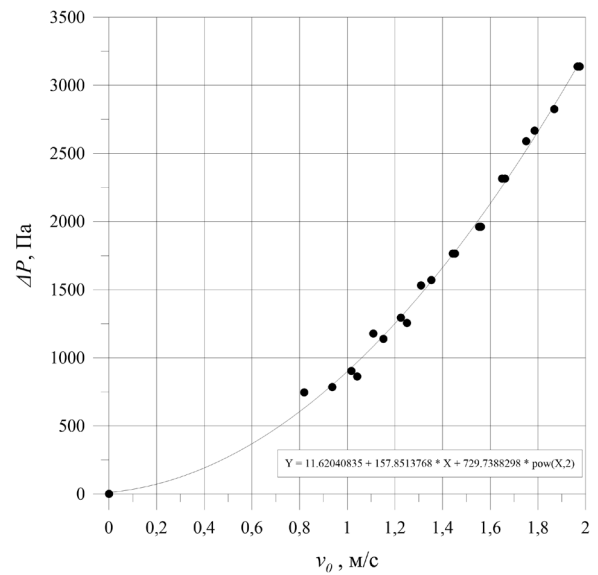


Рис. А2. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із відходами кавового виробництва

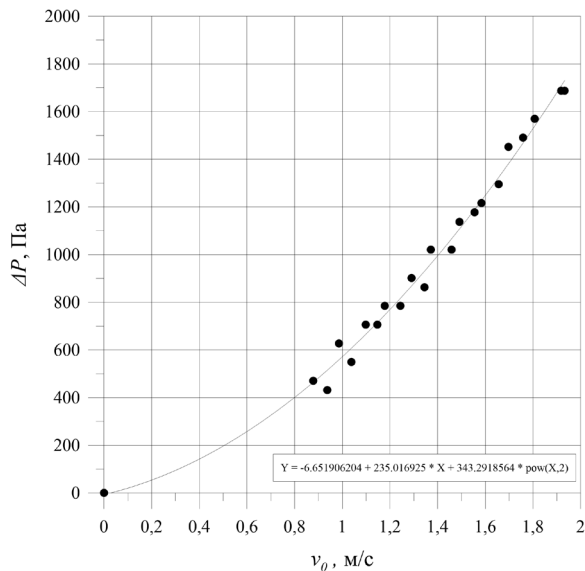


Рис. А3. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із бурякового жому

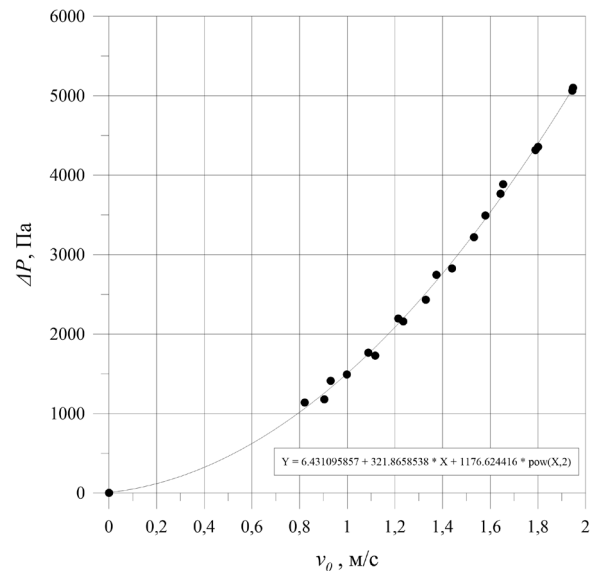


Рис. А4. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із яблучними вичавками

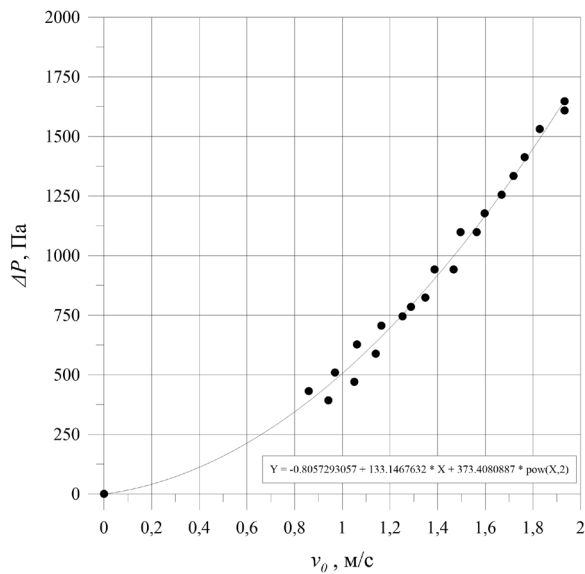


Рис. А5. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із жолудями дубу звичайного

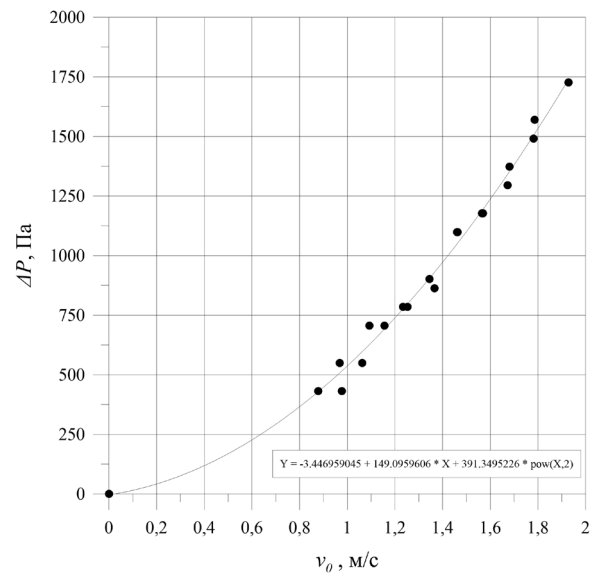


Рис. А6. Залежність зміни гідравлічного опору перфорованої перегородки циліндричного контейнера для серії дослідів із каштанами гіркокаштану звичайного

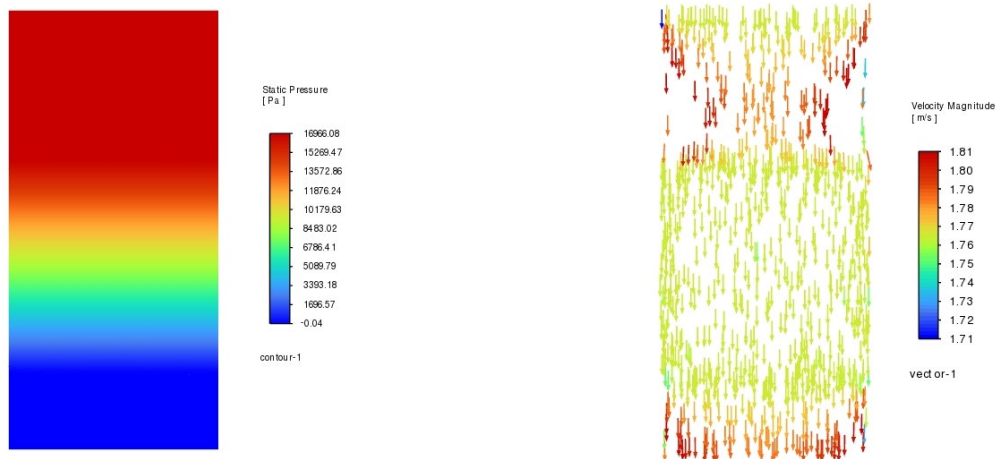


Рис. А7. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини ($H = 100$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 1,78$ м/с)

Рис. А8. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини ($H = 100$ мм, $T = 17$ °С, $v_0 = 1,78$ м/с)

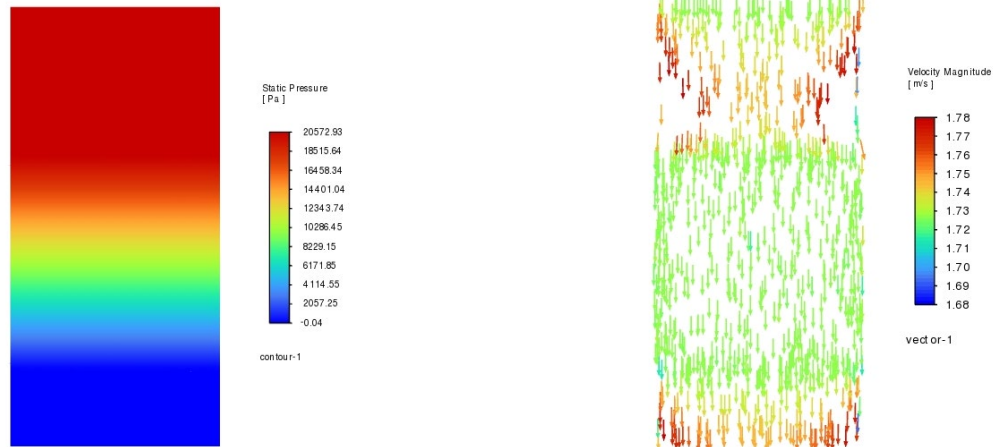


Рис. А9. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва ($H = 100$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 1,75$ м/с)

Рис. А10. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва ($H = 100$ мм, $T = 15$ °C, $v_0 = 1,75$ м/с)

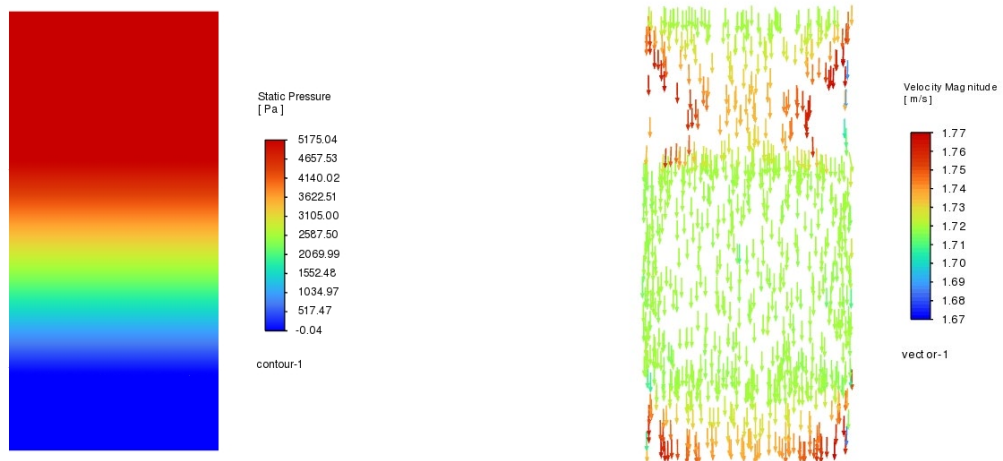


Рис. А11. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,72$ м/с)

Рис. А12. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар бурякового жому ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,72$ м/с)

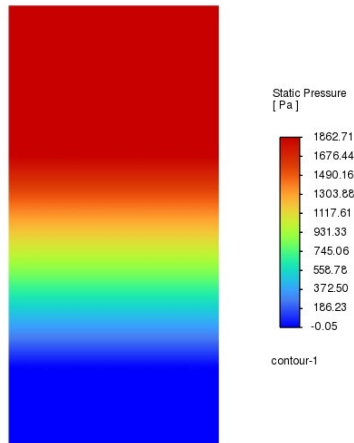


Рис. А13. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар яблучних вичавок ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,93$ м/с)

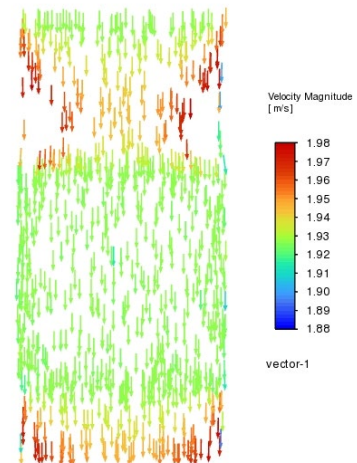


Рис. А14. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар яблучних вичавок ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,93$ м/с)

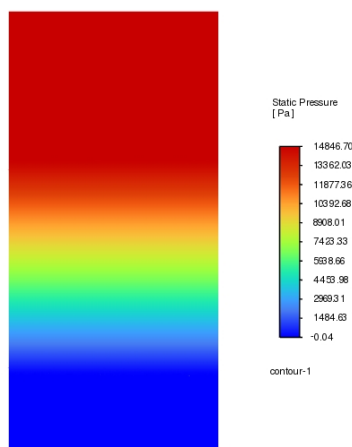


Рис. А15. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,67$ м/с)

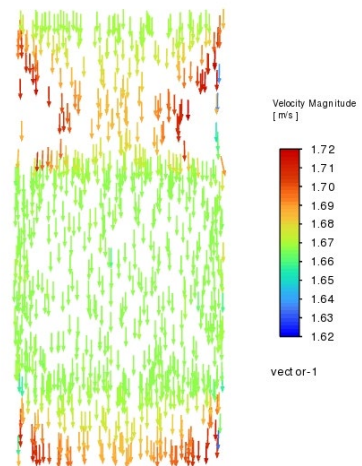


Рис. А16. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар жолудів ($H = 100$ мм, $T = 19$ °C, $v_0 = 1,67$ м/с)

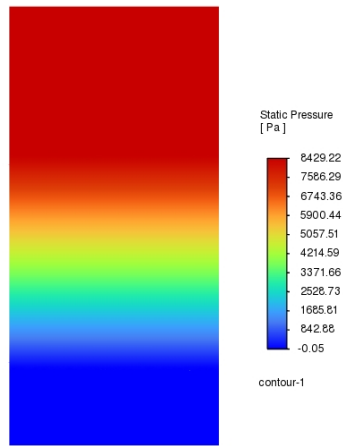


Рис. А17. Візуалізація розподілу поля статичного тиску у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар каштанів ($H = 100$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 1,85$ м/с)

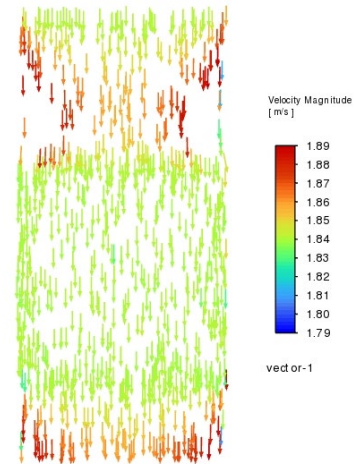


Рис. А18. Візуалізація векторного розподілу поля швидкостей у поперечному перерізі області моделювання руху теплового агента крізь стаціонарний шар каштанів ($H = 100$ мм, $T = 19$ °С, $v_0 = 1,85$ м/с)

Додаток Б

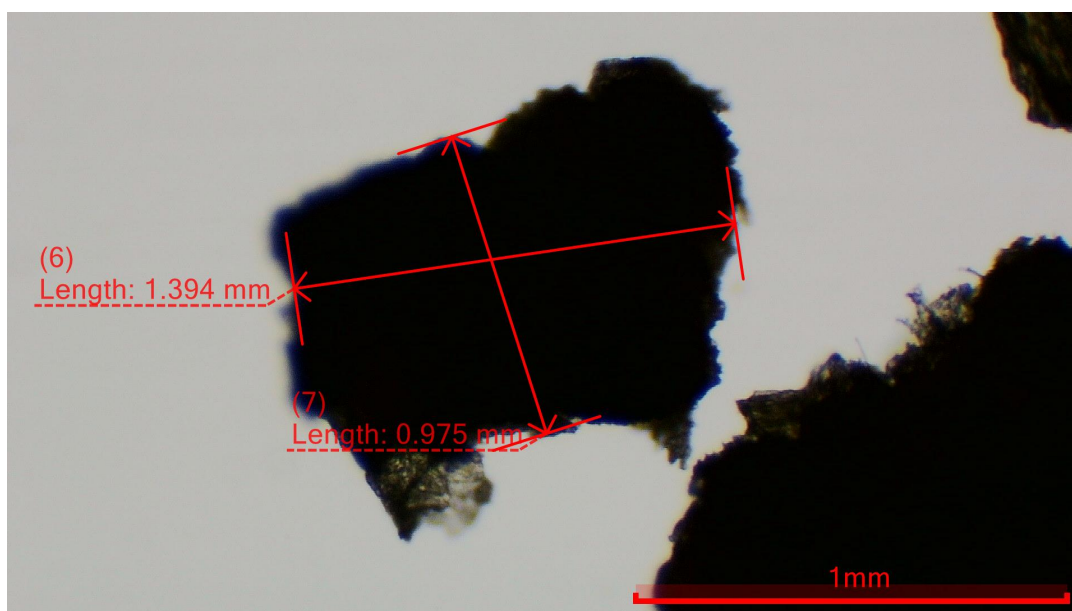


Рис. Б1. Приклад мікроскопічного визначення питомої поверхні частинок кукурудзяної післяспиртової барди

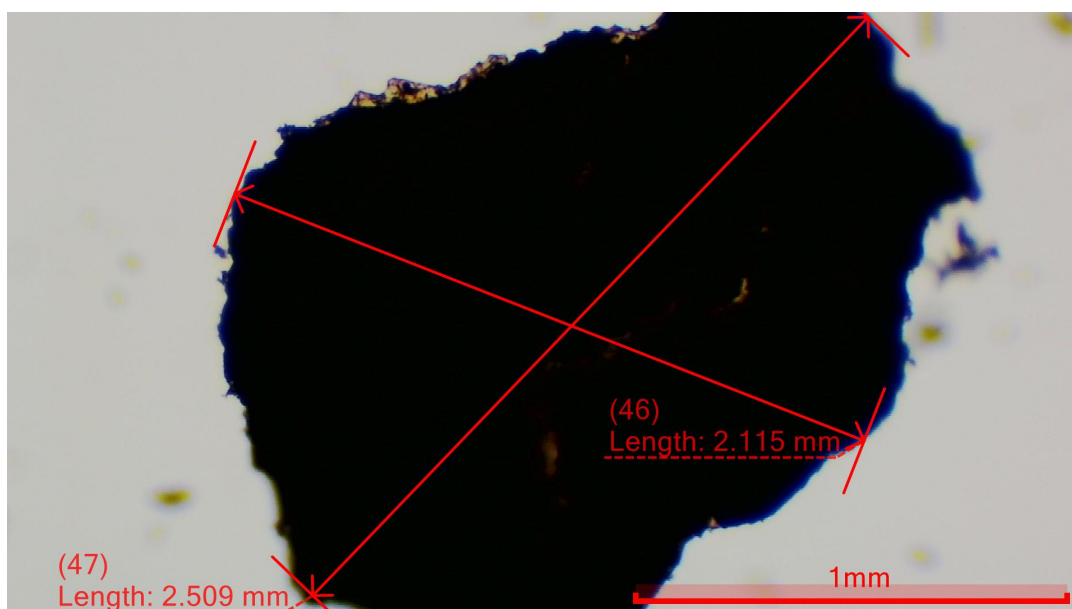


Рис. Б2 . Приклад мікроскопічного визначення питомої поверхні частинок відходів виробництва кави

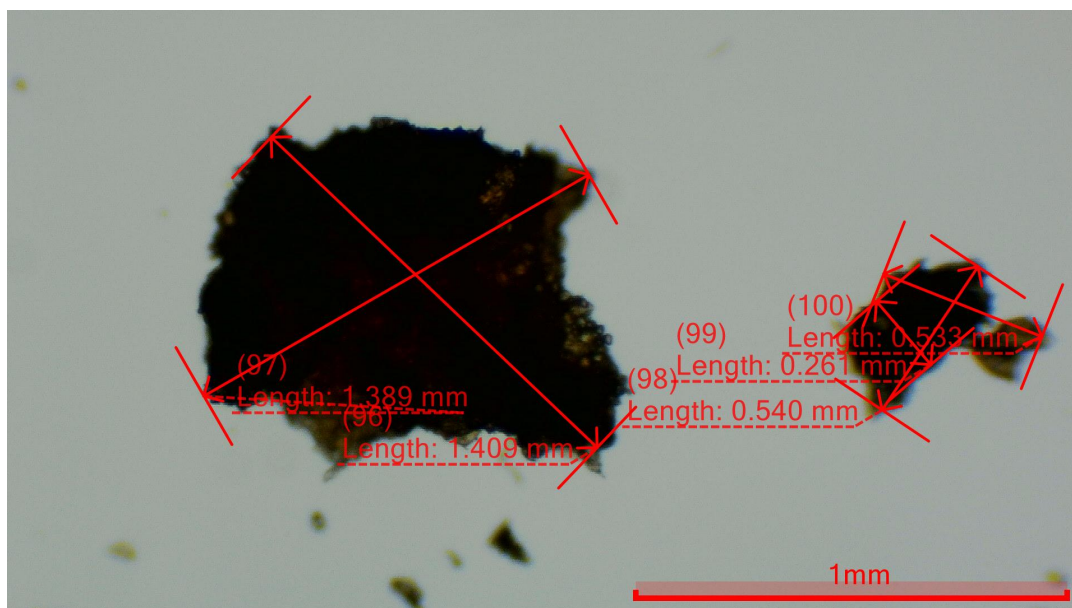


Рис. Б3. Приклад мікроскопічного визначення питомої поверхні частинок жолудів

Додаток В

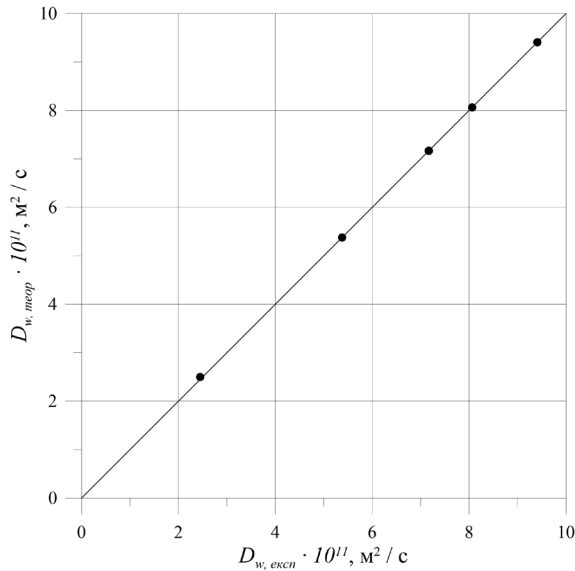


Рис. В1. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії кукурудзяної післяспиртової барди до теоретично розрахованих

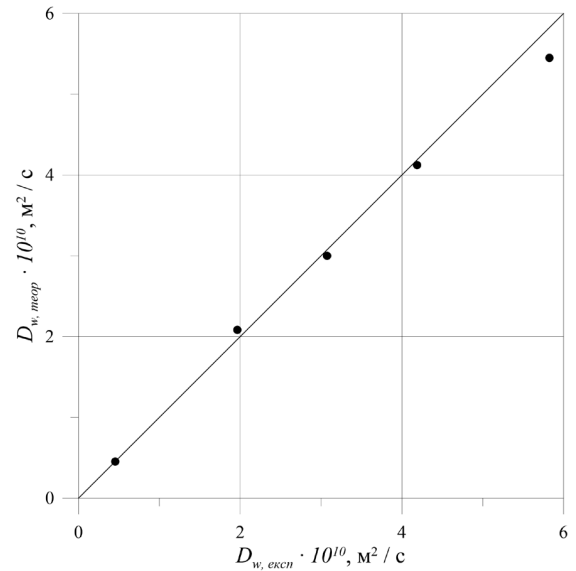


Рис. В2. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії відходів кавового виробництва до теоретично розрахованих

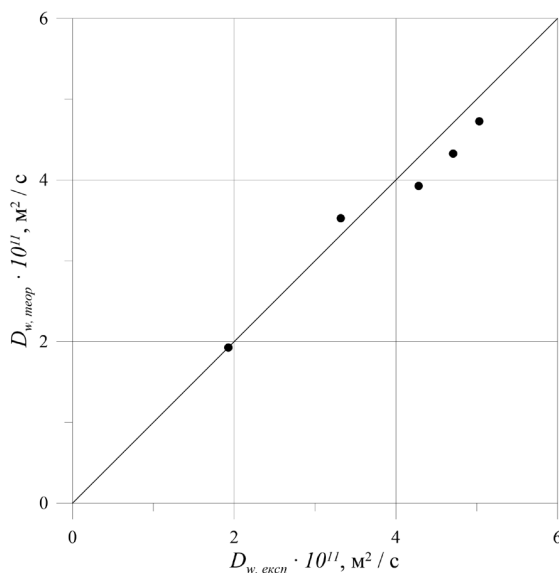


Рис. В3. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії жолудів до теоретично розрахованих

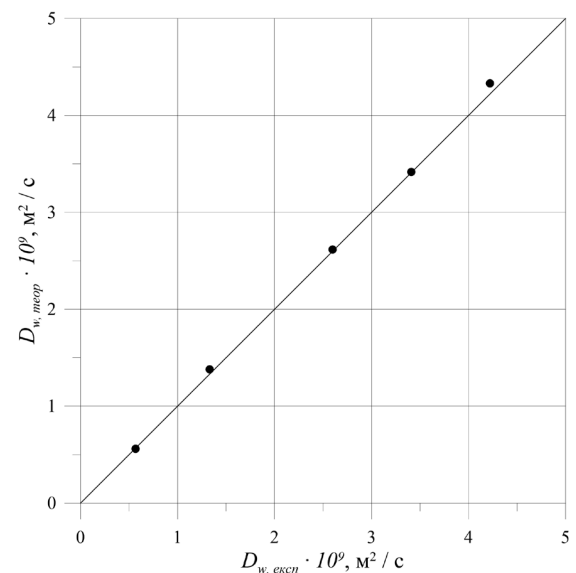


Рис. В4. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії ячмінної пивної дробини до теоретично розрахованих

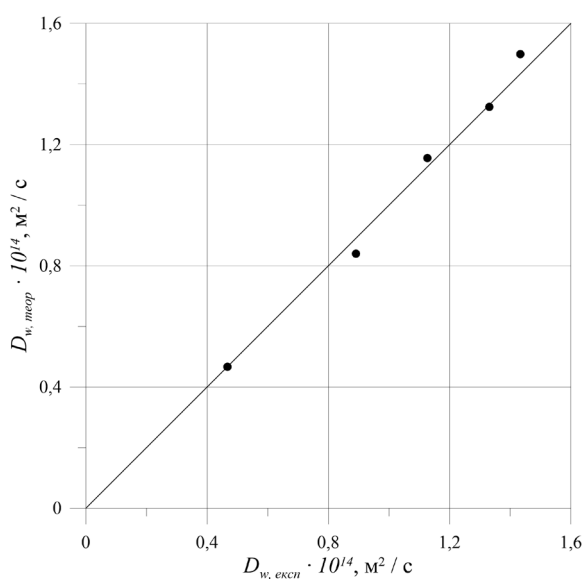


Рис. В5. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії бурякового жому до теоретично розрахованих

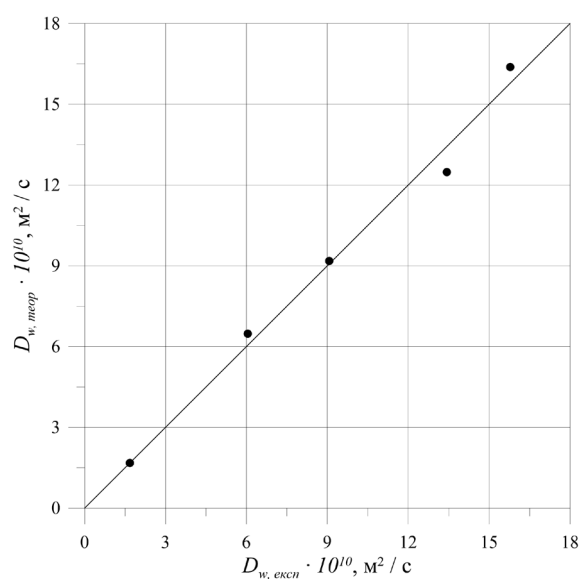


Рис. В6. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії яблучних вичавок до теоретично розрахованих

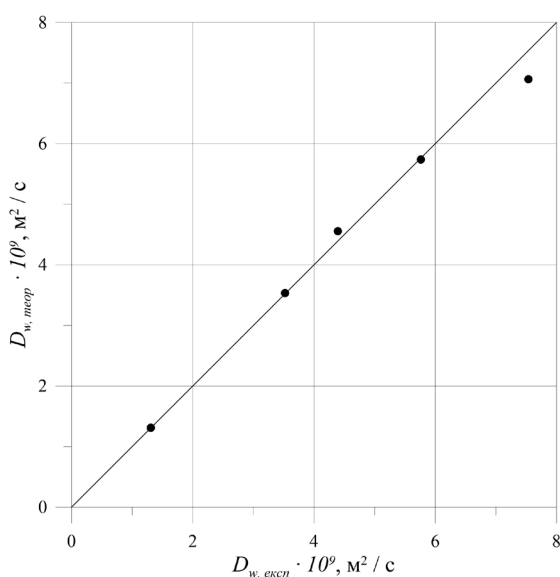


Рис. В7. Графічна залежність кореляції експериментальних значень коефіцієнтів внутрішньої дифузії каштанів до теоретично розрахованих

Додаток Г

Таблиця Г1

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	78
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	451,74
Температура навколишнього середовища T_0 , °С	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °С	90
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °С	57
Початкова температура матеріалу t_1 , °С	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °С	54
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,81
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г2

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	3,55
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,53
Ширина стрічкового транспортеру B , м	1,1
Довжина стрічкового транспортеру L , м	9
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	1,188

Показник	Значення
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	536,67
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0047
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1009,75
Об'ємна витрата теплового агента $Q_{t.a.}$, м ³ /год	64508,40
Масова витрата теплового агента $G_{t.a.}$, кг/год	62766,67
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	222,14
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	258,31
Кількість води W , кг/год	751,44
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг H ₂ O/ кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг H ₂ O/ кг сух. повітря	0,021
Масова витрата теплового агента $G'_{t.a.}$, кг/год	61092,61
Кількість теплоти на випаровування води з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1728309,83
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	33904,93
Кількість теплоти для нагрівання води у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	40930,89
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	21446,46
Кількість тепла для нагрівання залишкової води у матеріалі Q_{res} , кДж/год	5151,78
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2012718,29
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	60387,59
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	2054,45
Енергетичні витрати на видалення 1 кг води за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H ₂ O	2,73
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	755,85
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	2810,29

Показник	Значення
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / кг H ₂ O	3,74

Таблиця Г3

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння ячмінної пивної дробини у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	78
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	451,74
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	90
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	87
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_v , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г4

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння ячмінної пивної дробини у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	3,55
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	5,67
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	220

Показник	Значення
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	255,81
Кількість вологи W , кг/год	744,19
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	49,61
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	14
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,2
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	53,2
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	4806,51
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,027
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	40665,90
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1711627,91
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	71069,77
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H2O} , кДж/год	62362,79
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	23776,50
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	8646,48
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2065231,80
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	40895,68
Гідрравлічний опір барабану ΔP , Па	2294,70
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	3,08
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / кг Н ₂ О	20,95
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	2315,65
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	3,11

Таблиця Г5

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння відходів виробництва кави у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	73
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	379,99
Температура навколишнього середовища T_0 , °С	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °С	90
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °С	35
Початкова температура матеріалу t_1 , °С	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °С	33
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,76
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г6

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння відходів виробництва кави у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	2,7
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,18
Ширина стрічкового транспортеру B , м	0,5
Довжина стрічкового транспортеру L , м	8
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	0,48
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	182,39

Показник	Значення
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0125
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1030,58
Об'ємна витрата теплового агента $Q_{t.a.}$, м ³ /год	25344
Масова витрата теплового агента $G_{t.a.}$, кг/год	24659,71
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	278,26
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	323,55
Кількість вологи W , кг/год	707,03
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг Н ₂ О/ кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг Н ₂ О/ кг сух. повітря	0,03
Масова витрата теплового агента $G'_{t.a.}$, кг/год	33193,84
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1626166,42
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	2658,43
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	38511,86
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	6977,87
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	2467,37
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1844460,15
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	33203,6
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	807,15
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг Н ₂ О	1,41
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	356,72

Показник	Значення
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	1163,87
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / кг H_2O	1,65

Таблиця Г7

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння відходів виробництва кави у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	73
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	379,99
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	75
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	73
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г8

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння відходів виробництва кави у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H_2O / кг сух. мат.	2,7
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H_2O / кг сух. мат.	0,16

Показник	Значення
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	4,24
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	270
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	313,95
Кількість вологи W , кг/год	686,05
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	45,74
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	14
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,2
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	53,2
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	4043,09
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,0325
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	28825,48
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1577906,98
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	45862,21
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	57490,7
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	27603,99
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	8394,25
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1888983,93
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.'}_{t.a.}$, кг/год	28773,55
Гідравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	1614,51
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / кг Н ₂ О	2,35

Показник	Значення
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	14,74
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1629,25
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год /·кг H ₂ O	2,37

Таблиця Г9

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння бурякового жому у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	88
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	432,36
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °C	90
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °C	60
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	52
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,76
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г10

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння бурякового жому у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000

Показник	Значення
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	7,33
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,65
Ширина стрічкового транспортеру B , м	1,4
Довжина стрічкового транспортеру L , м	9
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	1,512
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	653,73
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0038
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1000,66
Об'ємна витрата теплового агента $Q_{t.a.}$, м ³ /год	79833,60
Масова витрата теплового агента $G_{t.a.}$, кг/год	77678,09
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	120,08
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	139,63
Кількість води W , кг/год	861,0360952
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг Н ₂ О/ кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг Н ₂ О/ кг сух. повітря	0,02
Масова витрата теплового агента $G'_{t.a.}$, кг/год	76197,88
Кількість теплоти на випаровування води з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1980383,02
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	43706,19
Кількість теплоти для нагрівання води у матеріалі Q_{H2O} , кДж/год	46900,64
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	13027,78
Кількість тепла для нагрівання залишкової води у матеріалі Q_{res} , кДж/год	2620,98
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2295302,46

Показник	Значення
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	75752,56
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	2542,519056
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H ₂ O	2,95
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	284,52
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	2827,04
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / ·кг H ₂ O	3,28

Таблиця Г11

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння бурякового жому у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	88
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	432,36
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	90
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	87
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г12

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння бурякового жому у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	7,33
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	6,77
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	120
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	139,53
Кількість води W , кг/год	860,47
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	57,36
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	12
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,8
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	74
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	6398,93
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,027
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	47019,96
Кількість теплоти на випаровування води з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1979069,77
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	82174,42
Кількість теплоти для нагрівання води у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	72106,98
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	29510,02
Кількість тепла для нагрівання залишкової води у матеріалі Q_{res} , кДж/год	4716,26
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2384335,19

Показник	Значення
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	47214,56
Гідрравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	2649,26
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / кг H ₂ O	3,08
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	24,18
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	2673,45
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / кг H ₂ O	3,11

Таблиця Г13

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння яблучних вичавок у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	83
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	446,47
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	90
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	75
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	64
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	1,76
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г14

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння яблучних вичавок у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H_2O /кг сух. мат.	4,88
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг H_2O /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	1,31
Ширина стрічкового транспортеру B , м	1,6
Довжина стрічкового транспортеру L , м	16
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	3,07
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	1371,56
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0034
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1045,58
Об'ємна витрата теплового агенту $Q_{t.a.}$, м ³ /год	162201,6
Масова витрата теплового агенту $G_{t.a.}$, кг/год	157822,16
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	177,75
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	206,68
Кількість вологи W , кг/год	838,9
Початковий вологовміст теплового агенту d_1 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агенту d_2 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,014
Масова витрата теплового агенту $G'_{t.a.}$, кг/год	158282,59
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1929464,76
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	66239,36
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H2O} , кДж/год	45694,76

Показник	Значення
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	27908,96
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	5334,62
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2282106,72
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	150634,11
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	5165,75
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H ₂ O	6,16
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	172,29
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	5338,05
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / ·кг H ₂ O	6,36

Таблиця Г15

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння яблучних вичавок у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	83
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	446,47
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	115
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	98

Показник	Значення
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г16

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння яблучних вичавок у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	83
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O / кг сух. мат.	14
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	6,27
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	170
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	197,67
Кількість вологи W , кг/год	802,33
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	53,49
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	12
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,8
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	74
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	6607,76
Початковий вологовміст теплового агенту d_1 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агенту d_2 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,0176
Масова витрата теплового агенту $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	90148,94
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1845348,84
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	116465,58
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H2O} , кДж/год	63873,14

Показник	Значення
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	47318,1
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	7778,32
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	2288862,37
Масова витрата теплового агентау $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	90648,01
Гідрравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агентау $N_{t.a.}$, кВт·год	18310898,95
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агентау $l_{t.a.}$, кВт·год / кг H ₂ O	6,34
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	46,43
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	5132,79
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / кг H ₂ O	6,4

Таблиця Г17

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння жолудів у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	43,37
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	466,06
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агентау φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агентау T_1 , °C	90
Кінцева температура теплового агентау T_2 , °C	41

Показник	Значення
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	39
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,76
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г18

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння жолудів у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O /кг сух. мат.	0,77
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,16
Ширина стрічкового транспортеру B , м	0,75
Довжина стрічкового транспортеру L , м	4
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	0,36
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	167,78
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0067
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1017,92
Об'ємна витрата теплового агенту $Q_{t.a.}$, м ³ /год	19008
Масова витрата теплового агенту $G_{t.a.}$, кг/год	18494,78
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	576,45
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	670,29
Кількість вологи W , кг/год	347,63
Початковий вологовміст теплового агенту d_1 , кг H ₂ O/ кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агенту d_2 , кг H ₂ O/ кг сух. повітря	0,027
Масова витрата теплового агенту $G'_{t.a.}$, кг/год	18996,2

Показник	Значення
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	799550,15
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	5228,36
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	18935,43
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	27381,2
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	7470,61
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	944422,34
Масова витрата теплового агента $G''_{t.a.}$, кг/год	19083,09
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	605,36
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H ₂ O	1,74
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	116,16
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	721,52
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / ·кг H ₂ O	2,08

Таблиця Г19

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння жолудів у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	43,37
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	466,06

Показник	Значення
Температура навколишнього середовища T_0 , °C	20
Початкова вологість теплового агента φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агента T_1 , °C	140
Кінцева температура теплового агента T_2 , °C	90
Початкова температура матеріалу t_1 , °C	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °C	87
Швидкість теплового агента v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г20

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння жолудів у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,77
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	2,14
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	566,3
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	658,49
Кількість води W , кг/год	341,51
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	22,77
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	12
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	1,8
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	30,5
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	2842,97
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг H ₂ O / кг сух. мат.	0,025
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	20951,63

Показник	Значення
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	785476,74
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	32614,36
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	28618,67
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	94855,25
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	22256,84
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1060204,05
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.'}_{t.a.}$, кг/год	20994,14
Гідрравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	1178
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H ₂ O	3,45
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	10,75
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1188,76
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / ·кг H ₂ O	3,48

Таблиця Г21

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння каштанів у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_l , кг/год	1000

Показник	Значення
Початкова вологість матеріалу ω_1 , % мас.	56,81
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , % мас.	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	276,68
Температура навколишнього середовища T_0 , °С	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °С	90
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °С	47
Початкова температура матеріалу t_1 , °С	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °С	45
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	1,81
Висота шару матеріалу H , м	0,12

Таблиця Г22

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення фільтраційного сушіння каштанів у промисловості за технологічно доцільних параметрів процесу

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початковий вологовміст матеріалу w^c_0 , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	1,63
Кінцевий вологовміст матеріалу w^c , кг Н ₂ О /кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння τ , год	0,16
Ширина стрічкового транспортеру B , м	0,75
Довжина стрічкового транспортеру L , м	7
Об'єм матеріалу на транспортері V_{mat} , м ³	0,63
Маса вологого матеріалу на транспортері G_{mat} , кг	174,31
Швидкість стрічки транспортеру v_{conv} , м/с	0,0119
Уточнена продуктивність за вологим матеріалом G'_1 , кг/год	1063,5
Об'ємна витрата теплового агенту $Q_{t.a.}$, м ³ /год	34209
Масова витрата теплового агенту $G_{t.a.}$, кг/год	33285,36

Показник	Значення
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	459,33
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	534,1
Кількість вологи W , кг/год	529,4
Початковий вологовміст теплового агенту d_1 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агенту d_2 , кг H_2O / кг сух. повітря	0,025
Масова витрата теплового агенту $G'_{t.a.}$, кг/год	32478,69
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1217626,252
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	13933,87955
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	28836,57
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	28707,98
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	7832,6
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1426631,01
Масова витрата теплового агенту $G''_{t.a.}$, кг/год	32848,98
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агенту $N_{t.a.}$, кВт·год	1089,48
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агенту $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг H_2O	2,06
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	186,25
Загальна кількість енергії необхідної для процесу фільтраційного сушіння N , кВт·год	1275,73
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу фільтраційного сушіння l , кВт·год / ·кг H_2O	2,41

Таблиця Г23

Вихідні показники для розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння каштанів у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Початкова вологість матеріалу ω_1 , %	57
Кінцева вологість матеріалу ω_2 , %	14
Насипна густина матеріалу ρ_b , кг/м ³	276,68
Температура навколишнього середовища T_0 , °С	20
Початкова вологість теплового агенту φ_0 , %	60
Початкова температура теплового агенту T_1 , °С	140
Кінцева температура теплового агенту T_2 , °С	90
Початкова температура матеріалу t_1 , °С	20
Кінцева температура матеріалу t_2 , °С	87
Швидкість теплового агенту v_0 , м/с	3
Коефіцієнт заповнення барабану вологим матеріалом β	0,2
Напруження барабану за вологою A_V , кг/ м ³ ·год	15

Таблиця Г24

Результати розрахунку питомих енергетичних витрат на проведення процесу сушіння каштанів у барабанній сушарці

Показник	Значення
Продуктивність за вихідним матеріалом G_1 , кг/год	1000
Поч. вологовміст матеріалу w^c_0 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	1,33
Кінц. вологовміст матеріалу w^c , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,16
Загальний час сушіння $\tau^{r.d.}$, год	2,02
Маса сухого матеріалу G_d , кг/год	430
Маса матеріалу на виході G_2 , кг/год	500
Кількість води W , кг/год	500
Об'єм сушильного барабану $V^{r.d.}$, м ³	33,33
Довжина барабану $L^{r.d.}$, м	12

Показник	Значення
Діаметр барабану $D^{r.d.}$, м	2,2
Дійсний об'єм сушильного простору $V^{r.d.}_2$, м ³	45,6
Маса матеріалу в сушарці $G^{r.d.}$, кг	2523,32
Початковий вологовміст теплового агента d_1 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,0087
Кінцевий вологовміст теплового агента d_2 , кг Н ₂ О / кг сух. мат.	0,026
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	28901,73
Кількість теплоти на випаровування вологи з матеріалу Q_{ev} , кДж/год	1150000,00
Кількість теплоти для утворення пари Q_v , кДж/год	47750,00
Кількість теплоти для нагрівання вологи у матеріалі Q_{H_2O} , кДж/год	41900,00
Кількість теплоти для нагрівання вологого матеріалу Q_{mat} , кДж/год	72025,00
Кількість тепла для нагрівання залишкової вологи у матеріалі Q_{res} , кДж/год	16899,95
Сумарні затрати теплоти Q , кДж/год	1461432,44
Масова витрата теплового агента $G^{r.d.}_{t.a.}$, кг/год	28939,26
Гідравлічний опір барабану ΔP , Па	1000
Кількість енергії для нагріву необхідної кількості теплового агента $N_{t.a.}$, кВт·год	1623,81
Енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи за показниками необхідної кількості теплового агента $l_{t.a.}$, кВт·год / ·кг Н ₂ О	3,25
Кількість енергії необхідна для роботи вентилятора N_{fan} , кВт·год	14,82
Загальна кількість енергії необхідної для процесу осушення N , кВт·год	1638,63
Загальні енергетичні витрати на видалення 1 кг вологи для процесу осушення l , кВт·год / ·кг Н ₂ О	3,28





ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор Національного університету
“Львівська політехніка”

проф. Павло ЖЕЖНИЧ

“ 16 ” 10 2024 р.

А К Т

“ 15 ” жовтня 2024 р.

Ми, які нижче підписалися, представники Національного університету “Львівська політехніка”, начальник навчально-методичного відділу, к.т.н., доц. Том’юк В.В., завідувач кафедри хімічної інженерії, д.т.н, проф. Атаманюк В.М., к.т.н., доц. Кіндзера Д.П., к.т.н., доц. Нагурський А.О. та к.т.н., доц. Гнатів З.Я., склали даний акт про те, що у навчальному процесі підготовки студентів зі спеціальностей 161 Хімічні технології та інженерія, 181 Харчові технології використовуються результати дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук заступника директора з науково-педагогічної роботи навчально-наукового інституту хімії та хімічних технологій, доцента кафедри хімічної інженерії Івашука Олександра Сергійовича.

Результати наукової роботи використовуються у лекційному курсі та лабораторному практикумі навчальних дисциплін “Процеси та апарати хімічної технології”, “Процеси та апарати харчових виробництв”, “Моделювання гідромеханічних процесів”, а також під час курсового та дипломного проектування.

Використання результатів дисертаційної роботи Івашука О.С. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців.

Голова комісії

Члени комісії:

Василь ТОМ’ЮК

Володимир АТАМАНЮК

Діана КІНДЗЕРА

Андрій НАГУРСЬКИЙ

Зоряна ГНАТІВ

ПОГОДЖЕНО:Проректор Національного університету
“Львівська політехніка”

проф. Іван ДЕМІДОВ

“ 26 ” 2024 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ:**

Директор ТОВ

“Вузлівський спиртовий завод”

Ігор ЦИБРІВСЬКИЙ

09 2024 р.

**А К Т**

передачі результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Атаманюк Володимир Михайлович, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Іващук Олександр Сергійович; від ТОВ “Вузлівський спиртовий завод”: директор Цибрівський Ігор Володимирович підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука О.С. передані для впровадження у виробництво на ТОВ “Вузлівський спиртовий завод”, а саме:

1. Результати експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання та узагальнення закономірностей гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди під час процесу фільтраційного сушіння.
2. Результати експериментальних досліджень та узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.
3. Принципова схема установки фільтраційного сушіння подрібненої рослинної сировини стрічкового типу.
4. Методика розрахунку основних технологічних параметрів процесу та основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.
5. Результати дослідження використання кукурудзяної післяспиртової барди як альтернативного твердого палива.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані Іващуком О.С. розрахункові залежності дозволяють прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди, а отримані узагальнення у вигляді критеріальних рівнянь дають змогу застосувати отримані залежності для інших дисперсних матеріалів рослинного походження.
2. Отримані техніко-економічні показники фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди дозволяють зробити висновок про економічну доцільність застосування даного методу.
3. Запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дає змогу розробити технічне завдання для виготовлення установки фільтраційного сушіння стрічкового типу.
4. Одержані дані використання кукурудзяної післяспиртової барди як твердого палива дають можливість раціонального використання даних відходів спиртового виробництва.
5. Результати дисертаційної роботи Іващука О.С. приймаються ТОВ "Вузлівський спиртовий завод" для впровадження у виробничому процесі.

Від ТОВ "Вузлівський спиртовий завод":

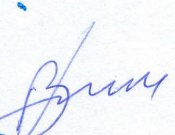
Директор



Ігор ЦИБРІВСЬКИЙ

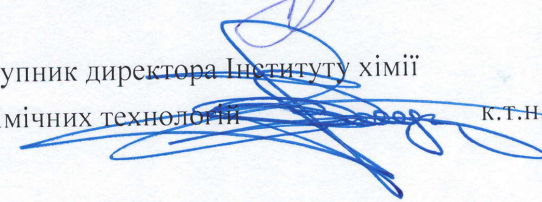
Від Національного університету "Львівська політехніка"

Завідувач кафедри
хімічної інженерії



д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК

Заступник директора Інституту хімії
та хімічних технологій



к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК

ПОГОДЖЕНО:
 Проректор Національного університету
 “Львівська політехніка”
 проф. Іван ДЕМІДОВ
 “ 20 ” 11 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:
 Директор
 ТзОВ “Пивоварня “КУМПЕЛЬ”
 Тарас ЯРОВИЙ
 “ 20 ” 11 2024 р.

А К Т

передачі результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК; від ТзОВ “Пивоварня “КУМПЕЛЬ”: директор Тарас ЯРОВИЙ, головний технолог Володимир ЛИТВИН підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука Олександра Сергійовича передані для впровадження у виробництво на ТзОВ “Пивоварня “КУМПЕЛЬ”, а саме:

1. Результати дослідження та узагальнення гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини під час процесу фільтраційного сушіння.
2. Результати дослідження та узагальнення кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.
3. Принципова схема установки фільтраційного сушіння подрібненої рослинної сировини стрічкового типу.
4. Методика розрахунку основних технологічних параметрів процесу та основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.
5. Результати дослідження використання осушеної ячмінної пивної дробини як альтернативного твердого палива.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані Іващуком О.С. розрахункові залежності дозволяють прогнозувати втрати тиску в стаціонарному шарі ячмінної пивної дробини, енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини, і на етапі проектування нового сушильного обладнання визначати його економічну ефективність.

2. Запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дає змогу розробити технічне завдання для виготовлення установки фільтраційного сушіння стрічкового типу.
3. Результати дослідження використання осушеної ячмінної пивної дробини як альтернативного твердого палива дають можливість раціонально використовувати дану вторинну сировину.
4. Результати дисертаційної роботи Іващука О.С. приймаються ТзОВ "Пивоварня "КУМПЕЛЬ" для впровадження у виробничому процесі.

Від ТзОВ "Пивоварня "КУМПЕЛЬ":

Директор

Тарас ЯРОВИЙ

Головний технолог

Володимир ЛИТВИН

Від Національного університету "Львівська політехніка":

Завідувач кафедри
хімічної інженерії

д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК

Заступник директора Інституту хімії
та хімічних технологій

к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК

ПОГОДЖЕНО:

Проректор Національного університету
“Львівська політехніка”


проф. Іван ДЕМІДОВ
“ 08 ” _____ 2024 р.


ЗАТВЕРДЖУЮ:

Генеральний Директор
СП “Галка” ЛТД


Юрій ДУБОВИЙ
“ 05 ” _____ 2024 р.


А К Т

передачі результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Володимир Атаманюк, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Олександр Іващук; від СП “Галка” ЛТД: генеральний директор Юрій Дубовий, директор технічний Орест Александер підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука Олександра Сергійовича передані для впровадження у виробництво на СП “Галка” ЛТД, а саме:

1. Результати дослідження використання осушених відходів кавового виробництва як твердого палива.
2. Результати досліджень, комп'ютерного моделювання та узагальнення закономірностей гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар відходів кавового виробництва під час процесу фільтраційного сушіння.
3. Результати досліджень та узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння відходів виробництва кави.
4. Принципова схема установки фільтраційного сушіння подрібненої рослинної сировини стрічкового типу.
5. Методика розрахунку основних технологічних параметрів процесу та основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані Іващуком О.С. дані використання осушених відходів кавового виробництва як твердого палива показують перспективність даного напрямку раціонального поводження з відходами кавового виробництва.
2. Отримані розрахункові залежності дозволяють прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння відходів кавового виробництва.
3. Розраховані техніко-економічні показники фільтраційного сушіння відходів виробництва кави дозволяють зробити висновок про економічну доцільність застосування даного методу для попереднього осушення даної вторинної сировини.
4. Запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дає змогу розробити технічне завдання для виготовлення установки фільтраційного сушіння стрічкового типу.
5. Результати дисертаційної роботи Іващука О.С. приймаються СП "Галка" ЛТД для впровадження у виробничому процесі.

Від СП "Галка" ЛТД:

Генеральний Директор

Директор технічний




Юрій ДУБОВИЙ

Орест АЛЕКСАНДЕР

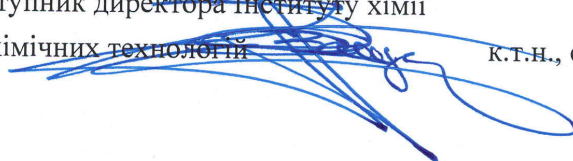
Від Національного університету "Львівська політехніка"

Завідувач кафедри
хімічної інженерії

Заступник директора Інституту хімії
та хімічних технологій



д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК



к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК

ПОГОДЖЕНО:
Проректор Національного університету
“Львівська політехніка”
проф. Іван ДЕМІДОВ

“ 11 ” 2024 р.

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Головний інженер
ТОВ “Вітагро Біо-Трейд”
Павло ТУРЧИН

12 2024 р.

А К Т

передачі результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Атаманюк Володимир Михайлович, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Іващук Олександр Сергійович; від ТОВ “Вітагро Біо-Трейд” (Марилівський спиртзавод): головний інженер Турчин Павло Володимирович, головний технолог Бабак Андрій Борисович, підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука О.С. передані для впровадження у виробництво на ТОВ “Вітагро Біо-Трейд” (Марилівський спиртзавод), а саме:

1. Результати дослідження використання осушеної фільтраційним методом кукурудзяної післяспиртової барди як альтернативного твердого палива.
2. Принципова схема установки фільтраційного сушіння подрібненої рослинної сировини стрічкового типу.
3. Алгоритм розрахунку основних технологічних параметрів процесу та основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.
4. Результати експериментальних досліджень, комп'ютерного моделювання та узагальнення закономірностей гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар кукурудзяної післяспиртової барди під час процесу фільтраційного сушіння.
5. Результати експериментальних досліджень та узагальнення закономірностей кінетики фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.
6. Результати експериментальних досліджень динаміки фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані Іващуком О.С. дані щодо використання кукурудзяної післяспиртової барди як твердого палива дають можливість раціонального використання даних відходів спиртового виробництва.
2. Одержані у дисертаційній роботі Іващука О.С. розрахункові залежності дозволяють прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди, а отримані узагальнення у вигляді критеріальних рівнянь дають змогу застосувати отримані залежності для інших дисперсних матеріалів рослинного походження.
3. Отримані техніко-економічні показники фільтраційного сушіння кукурудзяної післяспиртової барди дозволяють зробити висновок про економічну доцільність застосування даного методу.
4. Запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дає змогу розробити технічне завдання для виготовлення установки фільтраційного сушіння стрічкового типу.
5. Результати дисертаційної роботи Іващука О.С. приймаються ТОВ "Вітагро Біо-Трейд" (Марилівський спиртзавод) для впровадження у виробничому процесі та передаються для розроблення технічного завдання для виготовлення установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для осушення післяспиртової кукурудзяної барди.

Від ТОВ "Вітагро Біо-Трейд":

Головний інженер



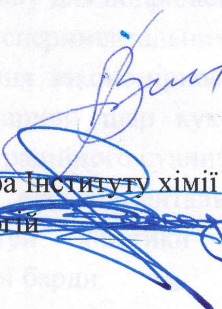
Павло ТУРЧИН

Головний технолог

Андрій БАБАК

Від Національного університету "Львівська політехніка"

Завідувач кафедри
хімічної інженерії



д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК

Заступник директора Інституту хімії
та хімічних технологій

к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК

ПОГОДЖЕНО:
Проректор Національного університету
“Львівська політехніка”


проф. Іван ДЕМІДОВ
“ 03 ” 01 2025 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор

ТОВ “Крафтове пиво”


Аліна Шаталова
“ 02 ” 01 2025 р.



А К Т

передачі результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК; від ТОВ “Крафтове пиво”: директор Аліна Шаталова, підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука Олександра Сергійовича передані для впровадження у виробництво на ТОВ “Крафтове пиво”, а саме:

1. Результати дослідження використання осушеної фільтраційним методом ячмінної пивної дробини як альтернативного твердого палива або для довготривалого зберігання як корму для тварин.
2. Принципова схема установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.
3. Алгоритм розрахунку основних технологічних параметрів процесу та основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння стрічкового типу для подрібненої рослинної сировини.
4. Результати дослідження гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар ячмінної пивної дробини під час процесу фільтраційного сушіння.
5. Результати дослідження кінетики фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.
6. Результати дослідження динаміки фільтраційного сушіння ячмінної пивної дробини.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані Іващуком О.С. результати дослідження використання осушеної ячмінної пивної дробини як альтернативного твердого палива (або

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор

ТОВ «Інтер-Синтез»

д.х.н. Михайло СТАРЧЕВСЬКИЙ /

М.П.



А К Т

Впровадження результатів дисертаційної роботи Іващука О.С.

Ми, що нижче підписалися: від Національного університету “Львівська політехніка”: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Володимир АТАМАНЮК, заступник директора Інституту хімії та хімічних технологій, доцент кафедри хімічної інженерії к.т.н., с.н.с., доц. Олександр ІВАЩУК; від ТзОВ “ІНТЕР-СИНТЕЗ”: директор д.х.н. Михайло СТАРЧЕВСЬКИЙ, головний технолог к.т.н. Сергій ГЛАДІЙ, начальник фінансового відділу Задворняк Юлія Ігорівна підтверджуємо, що результати дисертаційної роботи Іващука Олександра Сергійовича впроваджені у виробництво на ТзОВ “ІНТЕР-СИНТЕЗ” при виробництві паливних пелет з вторинної сировини рослинного походження методом фільтраційного сушіння.

При використанні методу фільтраційного сушіння вторинної сировини зменшуються енергетичні затрати на виробництво пелет, а саме на 1 кг сировини із початковим вмістом вологи 60-75% економія складає :

- по пивній дробині – 1.15 кВт або при ціні для виробників 8.5 грн/кВт 9.8

грн/кг;

- по післяспиртовій барді – 1.38 кВт або 11.7 грн/кг.

Від ТзОВ “ІНТЕР-СИНТЕЗ”:

Головний технолог

к.т.н. Сергій ГЛАДІЙ

Начальник фінансового відділу

Юлія Задворняк

Від Національного університету “Львівська політехніка”:

Завідувач кафедри
хімічної інженерії
АТАМАНЮК

д.т.н., проф. Володимир

Заступник директора Інституту хімії
та хімічних технологій
ІВАЦУК

к.т.н., с.н.с., доц. Олександр