

В. М. Атаманюк, І. Я. Матківська, І. Р. Барна
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра хімічної інженерії

СУШІННЯ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ ФІЛЬТРАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

© Атаманюк В. М., Матківська І. Я., Барна І. Р., 2015

На основі узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки, тепло-, масообміну та кінетики фільтраційного сушіння зерна пшениці розроблено установку для фільтраційного сушіння зерна пшениці, яка захищена патентом України на корисну модель. Розроблено модель руху зерна пшениці похилою поверхнею сушильної зони. Для моделювання руху зерна використано теорію суцільних середовищ.

Ключові слова: фільтраційне сушіння, зерно пшениці, механіка руху, сила тиску.

On the basis of theoretical and experimental results concerning hydrodynamics, heat-and-mass exchange and kinetics of the wheat grain filtration drying the schematic diagram of the drying unit has been developed and patented. The model of stationary layer motion along the angled surface of the drying zone and the method of unit main dimensions calculation have been developed. The theory of continuous media was used for mathematical modeling the grain.

Key words: dry filtration, grain, mechanics of motion, pressure.

Постановка проблеми. Сушіння є складним теплофізичним та масообмінним процесом, який широко застосовується на завершальних стадіях технологічного процесу і від організації якого значною мірою залежать якість та собівартість готової продукції. Цей процес є одним з найважливіших, трудомістких та енерговитратних операцій у технології післязбиральної обробки зерна пшениці. Тому, враховуючи значні обсяги виробництва зерна, на сучасному етапі розвитку зерносушіння в Україні та в світі існує потреба в створенні і розробленні високоефективних та екологічно безпечних технологій і обладнання для зневоднення зерна, які враховуватимуть складну біологічну будову зернівки.

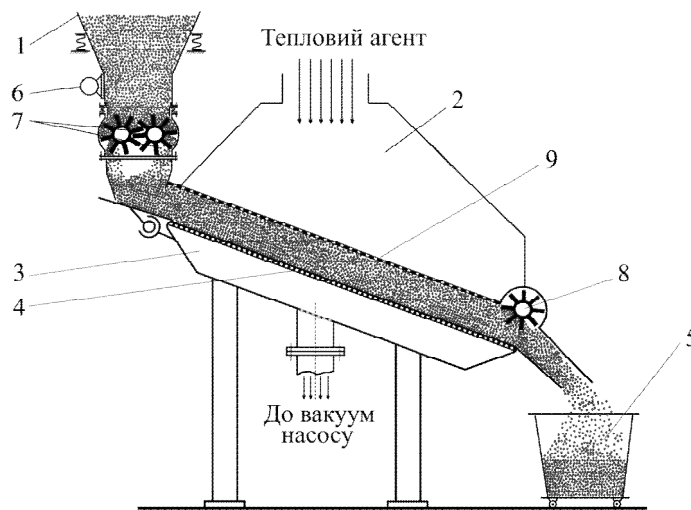
Аналіз джерел літератури. Найпоширенішим способом сушіння зерна (до 90 %) є конвективний метод [1], який характеризується простотою конструкції та обслуговування. Сьогодні поширені такі сушарки: тунельні, шахтні, барабанні, установки активного вентилявання та псевдозрідженого шару. Установки активного вентилявання використовують для низькотемпературного сушіння, коли як тепловий агент використовується атмосферне або підігріте повітря [2]. Основним недоліком є значна експозиція сушіння зерна. У тунельних зерносушильних установках тепловий агент циркулює завдяки як природній, так і вимушеній конвекції. Основний недолік цих сушильних установок – паралельний рух повітря і матеріалу, що значно зменшує теплообмін між ними. Крім того, обслуговування тунельних сушарок вимагає великих затрат, ручної праці під час завантаження і вивантаження матеріалу на сита і візки. В шахтних сушарках сушіння проводять у вертикальних шахтах, розміщених у шахматному порядку, а за всією висотою шахти розміщено короби для підведення і відведення теплового агента [3]. Для цих сушарок характерне нерівномірне розподілення теплового агента, сповільнений рух зерна біля бокових стінок шахти, тому процес проходить повільно, і можливе перегрівання зерна на окремих ділянках. До недоліків цих сушарок також належить значна тривалість процесу, висока вартість і невелика продуктивність обладнання. Основним недоліком барабанних сушарок є часткове пошкодження зерна, низьке знімання вологи за один пропуск через сушарку, громіздкість конструкції, значна витрата теплової енергії [4].

Автори роботи [5] пропонують використовувати блокову зерносушарку, яка дає змогу економії до 30 % енергії порівняно з шахтними сушарками, а в роботі [6] наведено шляхи інтенсифікації процесу в барабанній зерносушарці. Необхідно зазначити, що проблеми основних недоліків у використанні цих апаратів не вирішено. Сушарки з киплячим шаром характеризуються безперервним рухом і перемішуванням зернин в певному об'ємі за висотою та високою розвиненою поверхнею контакту матеріалу з нагрітим повітрям [7 – 8]. Однак недоліком таких сушарок є високий гідравлічний опір, пошкодження зернин та винос дрібної фракції за межі апарату.

Мета роботи. Метою роботи є дослідження особливостей переміщення шару зерна пшениці похилою поверхнею установки фільтраційного сушіння для визначення впливу висоти шару та перепаду тисків на швидкість руху вологого матеріалу в зоні сушіння.

Експериментальна частина. Нами пропонується фільтраційний метод сушіння зерна пшениці, який характеризується високою інтенсивністю та реалізує низькотемпературний режим, що є позитивним, враховуючи термолабільні властивості матеріалу. На основі узагальнення результатів експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки, тепломасобміну та кінетики фільтраційного сушіння [9, 10] запропоновано установку для фільтраційного сушіння зерна, яка захищена патентом України на корисну модель [11]. Принципову схему установки наведено на рис. 1.

Рис. 1. Схема установки фільтраційного сушіння зерна пшениці: 1 – бункер для вологого матеріалу; 2 – сушильна камера; 3 – камера розрідження; 4 – перфорована перегородка; 5 – вагонетка для сухого матеріалу; 6 – вібратор; 7, 8 – дозатори; 9 – сітчаста перегородка



Установка працює за таким принципом. До сушильної камери 2, кут нахилу якої можна регулювати, подають тепловий агент, а у камері 3 створюють розрідження за допомогою вакуумного насосу. З бункера 1 секторним живильником 7 вологий матеріал подається на верхню частину перфорованої поверхні 4, висота якого регулюється сітчастою перегородкою 9, і переміщається нею під дією сили земного тяжіння у напрямку розвантажувального патрубку. За рахунок створеного розрідження тепловий агент фільтрується крізь шар вологого матеріалу, висушуючи його. Сухий матеріал з нижньої частини перфорованої перегородки вивантажується із зони сушіння за допомогою секторного живильника 8.

Важливим етапом експериментальних досліджень розробленої установки фільтраційного сушіння є визначення закономірностей механіки руху шару зерна пшениці у сушильній камері, яка розміщена під кутом. Установка фільтраційного сушіння сипких матеріалів працює безперервно, отже, зерно пшениці безперервно подається в установку і безперервно з неї виводиться. Зерно рухається донизу поверхнею сушильної камери внаслідок сили тяжіння та сипкості матеріалу, від чого залежатиме і кут нахилу сушильної камери. Отже, на зерно, що рухається похилою поверхнею сушильної камери, яка розміщена під кутом, діють гравітаційна сила $m \cdot g \cdot \sin \alpha$ та сила тертя $f \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$. Баланс сил, що діють на елементарно виділений шар зерна на похилій площині сушильної камери, зображено на рис. 2.

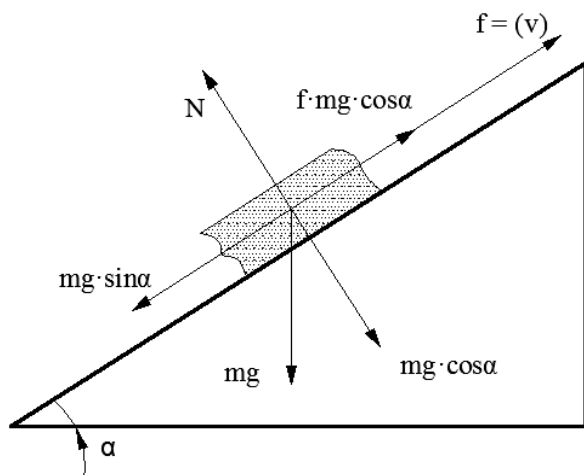


Рис. 2. Баланс сил, що діють на зерно під час руху похилою поверхнею сушильної камери

Необхідно вказати, що із збільшенням швидкості руху теплового агента u_0 та висоти шару h сила тиску F , яка діє на зерно пшениці, зростає, бо втрати тиску в шарі дисперсного матеріалу залежать від швидкості фільтрування теплового агента u_0 та висоти шару матеріалу h (рис.1). Аналіз рис. 3 показує, що зі збільшенням висоти шару та швидкості фільтрування теплового агента сила тиску також збільшується. Тому кожен елементарний шар зерна рухається з різною швидкістю, адже на кожен шар, що знаходиться нижче, діє сила тиску верхніх шарів.

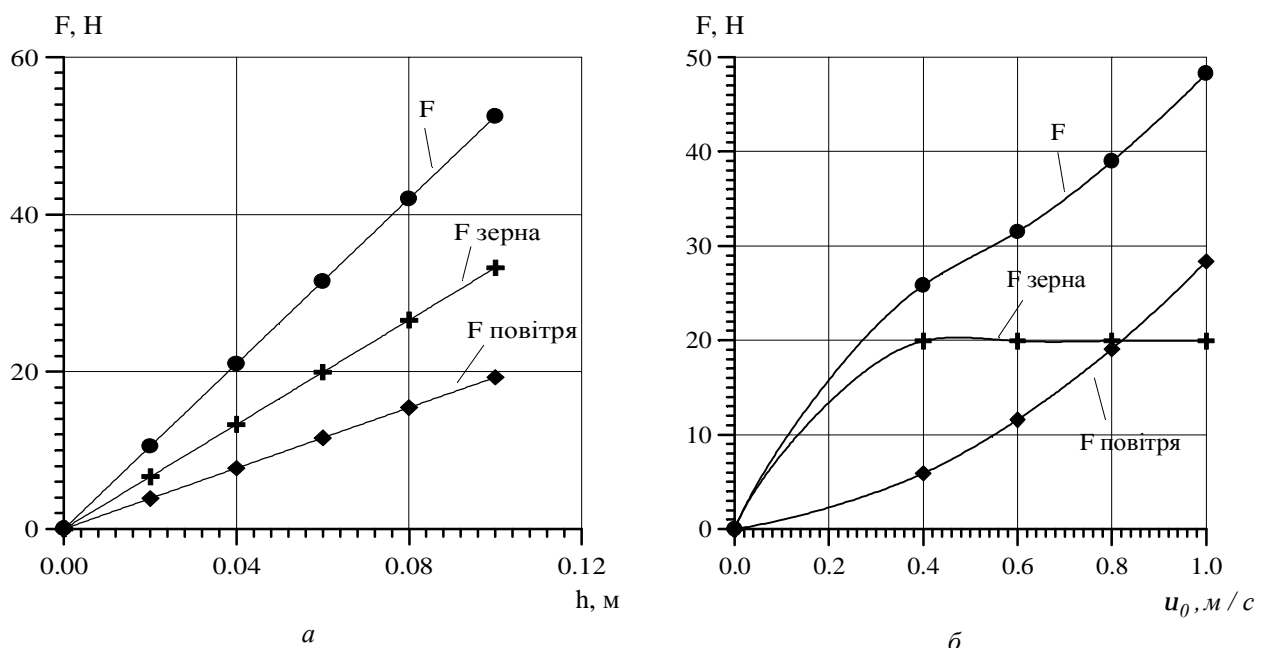


Рис. 3. Зміна сили тиску за висотою шару зерна пшениці під час фільтраційного сушіння залежно від: а – висоти шару; б – швидкості фільтрування теплового агента

Враховуючи, що температура теплового агента за висотою стаціонарного шару внаслідок тепло- і масообмінних процесів зменшується, така різниця швидкостей є позитивною, адже дає змогу забезпечити рівномірне прогрівання шару за всією висотою і, відповідно, рівномірне зневоднення матеріалу. На характер руху шару матеріалу (швидкість переміщення елементарного шару) впливатиме швидкість фільтрування теплового агента u_0 та кут нахилу перфорованої поверхні α зони сушіння. Тому для визначення швидкості руху кожного елементарного шару зерна визначали час їх перебування у сильній камері залежно від швидкості руху теплового агента, яка визначає тиск газового потоку на зернову масу, та кута нахилу перфорованої поверхні сушильної камери. Результати експериментальних досліджень наведено на рис. 4.

Візуальний аналіз пошарово зафарбованих зернин показав, що збільшення кута нахилу призводить до зменшення різниці швидкостей руху кожного елементарного шару (рис. 4, а). Це пояснюється тим, що із збільшенням кута нахилу перфорованої поверхні збільшується сила, що приводить в рух матеріал ($m \cdot g \cdot \sin \alpha$). А з рис. 4, б видно, що збільшення швидкості руху теплового агента, навпаки, збільшує різницю цих швидкостей, тобто верхній елементарний шар рухається

швидше, а нижній – повільніше. Це зумовлено тим, що із збільшенням швидкості фільтрування теплового агента збільшується сила тиску на елементарний шар i , відповідно, збільшується сила опору середовища. Проте необхідно зазначити, що середній час перебування усього шару зерна пшениці у сушильній камері визначається продуктивністю установки (частотою обертання роторів секторних живильників), а кут нахилу перфорованої поверхні та швидкість фільтрування теплового агента визначають швидкість руху окремих елементарних шарів зерна пшениці, тобто забезпечують різний час перебування цих шарів у зоні сушіння.

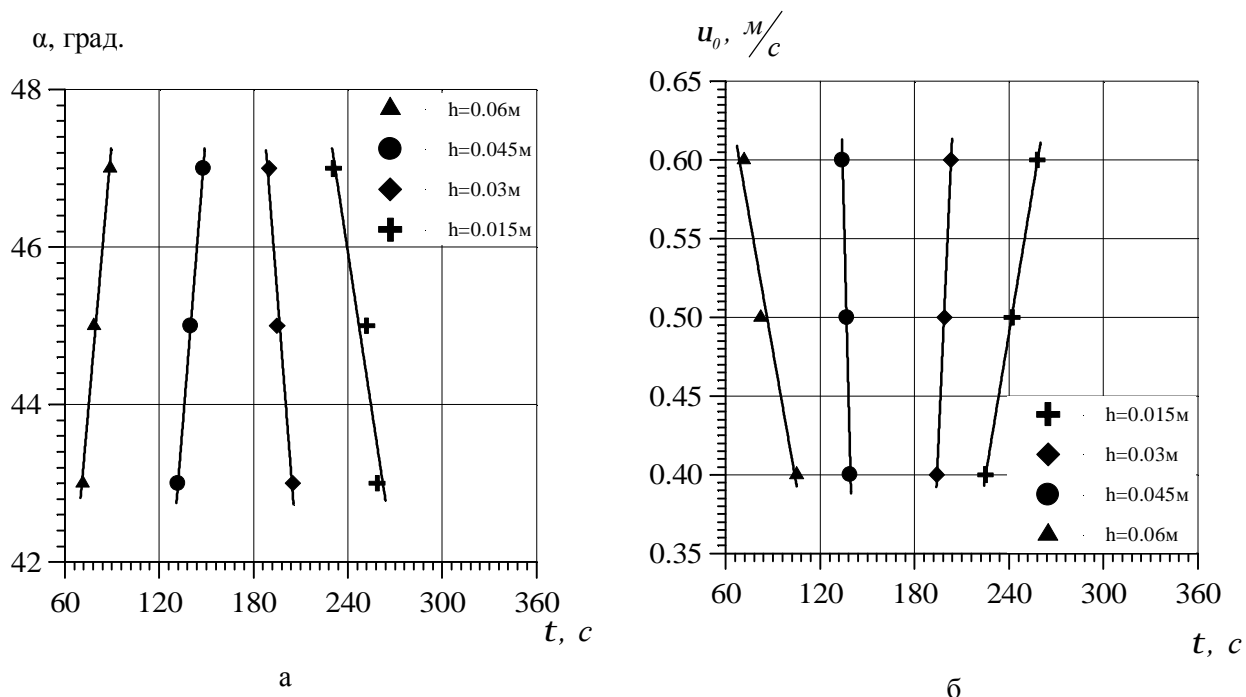


Рис. 4. Вплив кута нахилу поверхні (а) та швидкості фільтрування теплового агента (б) на час перебування кожного елементарного шару зерна пшениці

Для узагальнення експериментальних даних сили, які діють на шар, використовували теорію суцільних середовищ і подавали у вигляді диференційного рівняння руху матеріалу похилою поверхнею, враховуючи сили тертя і опору середовища [12]:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = m \cdot g \cdot \sin a - f \cdot m \cdot g \cdot \cos a - f(v) \quad (1)$$

за початкових умов: $t=0; v_0=0$, і граничних умов, де m – маса зерна, кг; v, v_n – поточна та робоча швидкості руху зернової маси похилою поверхнею; t, t_n – поточний та розрахунковий час, с; g – прискорення земного тяжіння; a – кут нахилу похилої поверхні до горизонталі; f – коефіцієнт тертя зерна пшениці похилою поверхнею; $f(v)$ – опір середовища (повітря).

Враховуючи те, що швидкість руху зерна похилою поверхнею є незначною, припустимо, що опір середовища є пропорційний швидкості руху зернової маси у першому степені, тоді:

$$f(v) = k \cdot v, \quad (2)$$

де k – коефіцієнт пропорційності, кг/с.

Введемо позначення:

$$a = \frac{m \cdot g \cdot \sin(a - j)}{\cos j},$$

де j – кут тертя, $j = \arctg(g \cdot j)$.

Тоді рівняння (1) запишеться:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = k(a - v). \quad (3)$$

Розв'язок рівняння (3) можна подати у вигляді:

$$v = \frac{a}{k} \cdot \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t} \right). \quad (4)$$

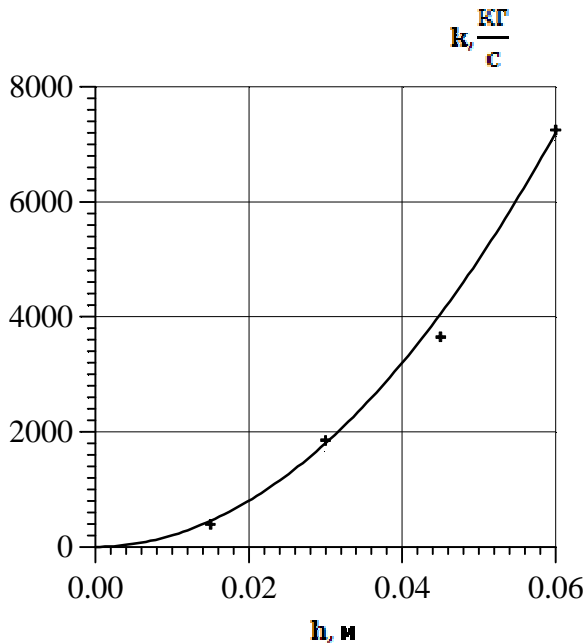


Рис. 5. Залежність коефіцієнту k від висоти шару

На основі експериментальних досліджень (рис. 4) визначили значення невідомого коефіцієнта k рівняння (3). Результати наведено у вигляді залежності коефіцієнта k від висоти шару $k = f(h)$ (рис. 5). Необхідно зауважити, що у коефіцієнті k також враховано кут нахилу перфорованої поверхні установки та опір середовища. Апроксимація результатів степеневою функцією дала змогу визначити залежність для розрахунку цього коефіцієнта:

$$k = 2 \cdot 10^6 \cdot h^2. \quad (5)$$

Подання результатів у вигляді залежностей (4) та (5) дає змогу розрахувати швидкість переміщення кожного елементарного шару зернової маси похилою поверхнею сушильної установки, і відповідно, час його перебування у зоні сушіння.

Висновок. На основі узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень розроблено принципову схему установки фільтраційного сушіння, яка враховує фізико-механічні, гідродинамічні та кінетичні особливості фільтраційного сушіння зерна пшениці і яка захищена деклараційним патентом України. Отримані розрахункові залежності (4) та (5) дають змогу розрахувати швидкість переміщення елементарних шарів зерна пшениці у сушильній зоні залежно від загальної висоти шару, швидкості фільтрування теплового агенту та кута нахилу перфорованої поверхні зони сушіння, що дасть змогу забезпечити необхідний час перебування та рівномірність прогрівання і висушування вологого матеріалу.

1. Фесенко А. В. Підвищення ефективності технологічного процесу сушки зернових культур: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.11 / А. В. Фесенко. – Луганськ, 2006. – 13 с.
2. Калініченко Р. А. Енергозберігаючі режими сушіння і активного вентилявання зерна при зберіганні в умовах господарств: дис. ... кан. тех. наук: 05.09.16 / Р. А. Калініченко. – К., 2005. – 215 с.
3. Донкглов В. І. Разработка блочной зерносушилки на основе автономных испарительно-конденсационных систем: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12 / В. И. Донкглов. – Одесса, 2010. – С. 185.
4. Данилов Д. Ю. Средства механизации тепловой обработки зерна / Д. Ю. Данилов // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 4 (11). – С. 32–40.
5. Бурдо О. Г. Кінетика сушіння пшениці в апаратах на базі термосифонів / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкглов // Наук. пр. ОНАХТ. – О.: 2009. – Вип. 36, Т.1. – С. 297–302.
5. Винокуров К. В. Пути интенсификации процесса сушки зерна в барабанной зерносушилке: Мат-лы II Междунар. науч.-практ. конф. / К. В. Винокуров, С. Н. Никоноров, В. М. Седелкин // Современные энергосберегающие тепловые технологии СЭТТ-2005 (Москва, 11–14 окт. 2005 г.). – ВИМ. – М.: 2005. – Т. 1. – С. 233–236.
6. Syahrul Husain. Heat

and Mass transfer analysis of fluidized bed grain drying / Husain Syahrul, Horibe Akihiko and Haruki Naoto // Memoirs of the Faculty of Engineering, Okayama University. – 2007. – Vol.41. – P. 52–62.

7. Фесенко А. В. Оптимизация технологических и конструктивных параметров зерносушилки в псевдосжиженном слое / А. В. Фесенко // Збірник наукових праць Луганського національного аграрного університету. Серія: Технічні науки. – Луганськ: Видавництво ЛНАУ, 2004. – №42(54). – С. 150–153.

8. Атаманюк В. М. Гідродинамічні особливості фільтраційного сушіння зерна пшениці / В. М. Атаманюк, І. Я. Матківська, М.І. Мосюк // Збірник наукових праць ОНАХТ. –2013. – Т.2, Вип.43. – С. 10–16.

9. Matkivska I. Basic regularities of the filtration drying of wheat grain / Iryna Matkivska, Volodymyr Atamanyuk, Dmytro Symak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2014. – VOL 5, NO 5(71). – P. 14–18.

10. Пат. 78453 Україна, МПК 2006.01. Установа фільтраційного сушіння сипких матеріалів / В.М. Атаманюк, І. О. Гузьова, І. Я. Матківська, Г. О. Мазяр; заявник і власник Національний університет “Львівська політехніка”. – Заявл. 2012 08120; опубл. 25.03.2013, Бюл № 6. – 4 с.

11. Василенко П. М. Теорія руху частинки по шерохватим поверхностям сельскохозйственных машин / П. М. Василенко. – К., 1960. – 283 с.