

(складова $(dT_z/dz)_{zz}$). Окрім того, показано зміну градієнту температури $(dT_z/dz)_q$, пов'язаного із втратами теплоти в оточуюче повітря. Вклад кожного з цих факторів різний та саме, як і зона їх дії. Показане на рис.1 зростання температури в передматричній зоні зумовлене градієнтом $(dT_z/dz)_w$ і викликане дією тангенціального напруження внаслідок обертання шнека. Далі вплив цієї складової поступово знижується до нуля, проте зростає роль складової $(dT_z/dz)_{rz}$, що пояснюється звуженням каналу і зростанням швидкості потоку. Вплив складової $(dT_z/dz)_{zz}$ незначний і проявляється лише при переході від передматричної до матричної зони. Встановлено, що втрати теплоти в оточуюче ще $(dT_z/dz)_q$ незначні у порівнянні з дисипативним нагрівом.

Порівняння градієнтів тиску зумовлених дією дисипативних факторів показали, що основні втрати напору в каналі викликані зсувними напруженнями внаслідок сил тертя. Найменший вплив створюють складові, пов'язані з дією нормальних напружень та напружень внаслідок звуження каналу.

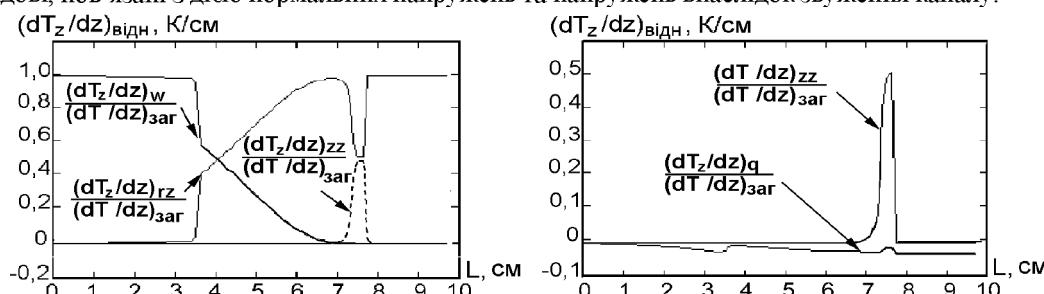


Рис. 5 – Зміна відносних значень складових градієнту температури вздовж каналу передматричної і матричної зон при $G=250$ кг/год, $W=12\%$ і $h=1,8$ мм.

Висновки

Розроблена математична модель дозволяє враховувати особливості геометрії каналу, реологічних властивостей оброблюваної сировини, вплив дисипативних факторів та визначити швидкість потоку, тиск, температуру, в'язкість вздовж всього каналу та в локальних точках. Модель може застосовуватись при проектуванні геометричних розмірів каналу передматричної і матричної зон різних типів екструдерів для переробки різного виду сировини.

Література

1. Остріков А.Н., Абрамов О.В., Рудометкін А.С. Экструзия в пищевых технологиях. – Санкт-Петербург. Гіорд, 2004.-280с.
2. Бегелев М.Ш. Основы переработки семян сои. – Москва. ДeЛи прінт, 2006. – 173с.

УДК 66.045

ГІДРОДИНАМІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ЗЕРНА ПШЕНИЦІ

Атаманюк В.М. д-р техн. наук, професор, Матківська І.Я., аспірант,
Мосюк М.І., канд. техн. наук, асистент
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

У статті представлено результати експериментальних досліджень гідродинаміки руху теплового агента крізь шар зерна пшениці. Одержано критеріальні залежності на основі внутрішньої задачі гідродинаміки, які дають змогу прогнозувати енергетичні затрати під час фільтраційного сушіння зерна пшениці та розрахувати основні конструктивні розміри під час проектування нового сушильного обладнання.

Obtained criterion depending on their internal problems of hydrodynamics, which allow predicting energy expenditure during filtration drying wheat and calculate the basic design dimensions for the design of a new drying equipment. Present criterion equations on basis of inner task of hydrodynamics which allow predicting

energy costs during filtration drying wheat and calculate the basic design dimensions for planning new drying equipment.

Ключові слова: зерно пшениці, вологість, дисперсний матеріал, стаціонарний шар, фільтраційне сушіння, гідродинаміка, коефіцієнт опору.

Постановка проблеми. Вологість - найважливіший показник якості зерна. Від вмісту води в зерні залежить його цінність, якість та стійкість під час зберігання. В сухому зерні обмінні процеси і дихання самого зерна практично зупиняються, припиняється також розвиток шкідників і мікроорганізмів, тому зерно потрібно сушити до кондіційного за вологістю стану.

Сушіння є складним тепломасообмінним і енергомістким процесом, який визначає вартість зібраного урожаю, а спосіб сушіння визначає якість зерна [1, 2]. Витрати енергії на процес сушіння складають до 40-70% загальних витрат на післязбиральну обробку. Перспективним напрямом вирішення цієї проблеми є реалізація фільтраційного методу зневоднення зерна, який є екологічно чистим та високоінтенсивним методом сушіння.

Гідродинаміка фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар зерна визначає товщину теплового і дифузійного пограничного шару, інтенсивність тепло- і масообмінних процесів, економічну доцільність процесу сушіння та якість готового продукту. Першим етапом дослідження фільтраційного сушіння є встановлення закономірностей зміни гіdraulічного опору шару сухого матеріалу, тому що ефективність даного методу в значній мірі визначається втратами тиску в стаціонарному шарі матеріалу.

Аналіз останніх публікацій. Дослідженю впливу гідродинаміки фільтрування теплового агенту на гіdraulічний опір шару матеріалу присвячено багато робіт, зокрема [3-6], у яких автори наводять основні закономірності фільтрування повітря крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу.

Більшість авторів на основі експериментальних досліджень втрат тиску представляють розрахункову залежність Дарсі-Вейсбаха

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2} \quad (1)$$

у вигляді модифікованого двочленного рівняння Ерагана [7-9]:

$$\frac{\Delta P}{H} = A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_u^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_{uu})^2}{\varepsilon_{uu}^3} \cdot v_0 + B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4} \frac{1 - \varepsilon_{uu}}{d_u \cdot \varepsilon_{uu}^3} \cdot v_0^2, \quad (2)$$

яке приводять до вигляду [10]:

$$\frac{\Delta P}{H} = \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{d_u^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{d_u} \cdot \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon^3}, \quad (3)$$

при цьому невідомі коефіцієнти "A" і "B" визначають експериментально. Інколи коефіцієнт опору шару представляють у безрозмірній формі як $\lambda = f(Re)$.

Проте, залежності, які наведені у літературі стосуються конкретних матеріалів, тому їх використання для інших матеріалів, які відрізняються формою і структурою шару є неможливе внаслідок великої похибки між експериментальними даними і розрахунковими значеннями.

Метою роботи є теоретичний аналіз і експериментальне дослідження гідродинаміки фільтрування газового потоку крізь стаціонарний шар зерна пшениці та представлення результатів експериментальних досліджень у безрозмірній формі.

Експериментальна частина. Зернина є колоїдним капілярно-пористим тілом неправильної форми із складною внутрішньою будовою. Зерно злакових культур складається з трьох частин: зародка, ендосперми та оболонки. Оболонка злакових характеризується середньою проникністю газів та пари [11].

Для оцінки технічних властивостей зерна використовують наступні показники: геометричні характеристики, насипну густину та масу 1000 зерен. Нами визначені усереднені лінійні розміри на основі аналізу 100 зернин та, користуючись цими результатами, площа геометричної поверхні та об'єм зернівки обчислено розрахунковим методом за залежністю наведеною у [12]:

$$S_3 = 4 \cdot \pi \cdot R \cdot (l + 3 \cdot R), \quad (4)$$

де, a, b, l — усереднені лінійні розміри зернівки, які розраховували як середньозважену величину,

$$R = (5 \cdot a + 6 \cdot b) / 60;$$

Об'єм зернини розраховували із залежності, отриманої І. Р. Дударевим [13]:

$$V_3 = 0.15 \cdot l \cdot [1.6 \cdot a^2 + b \cdot (b + a)]. \quad (5)$$

Результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Геометричні характеристики зерна пшениці сорту «Золотоколоса»

Усереднені лінійні розміри, м			Площа зовнішньої поверхні $S_3 \cdot 10^5, m^2$	Об'єм $V_3 \cdot 10^5, m^3$
Довжина $l \cdot 10^3, m$	Товщина $a \cdot 10^3, m$	Ширина $b \cdot 10^3, m$		
7,01	3,148	3,876	7,32	4,54

Важливою характеристикою дисперсного матеріалу є пористість шару (шпаруватість шару зерна), яку визначали пікнометричним методом. Насипну (натуру) $\rho_{\text{нас}}$ та умовну $\rho_{\text{ум}}$ густини зерна сорту «Золотоколоса» визначали за стандартною методикою згідно ГОСТ 10840 – 64.

Еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент, визначали із залежності:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a}, \quad (6)$$

де a — питома поверхня шару зерна, яку визначали із залежності:

$$a = n \cdot S_3 \cdot k / V_{\text{шару}}, \quad (7)$$

де k — коефіцієнт взаємного екронування поверхні частинок у шарі, який визначали згідно рекомендацій [14],

$V_{\text{шару}}$ — загальний об'єм шару матеріалу,

n — кількість зернин в шарі.

Основні характеристики зерна наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Основні характеристики зерна пшениці сорту «Золотоколоса»

$\rho_{\text{нас}}, \text{кг}/m^3$	$\rho_{\text{ум}}, \text{кг}/m^3$	Маса 1000 зерен $G^{1000}, \text{кг}$	$\varepsilon_w, m^3/m^3$	k	$d_e \cdot 10^3, m$	$a, m^2/m^3$
751,81	1181,3	$46,1 \cdot 10^{-3}$	0,3636	0,8	1,56	934,67

Експериментальні дослідження гідродинаміки стаціонарного шару проводили на установці та згідно методики, які наведені у роботі [15]. Зміни втрат тиску досліджували у шарі зерна висотою $40 \cdot 10^{-3}$, $60 \cdot 10^{-3}$; $80 \cdot 10^{-3}$; $100 \cdot 10^{-3}$, $100 \cdot 10^{-3}$ м. Результати експериментальних досліджень втрат тиску в шарі зерна пшениці від фіктивної швидкості фільтрування теплового агента наведені на рис. 1а. Для узагальнення дослідних даних залежність (2) лініаризують відносно фіктивної швидкості фільтрування газового потоку і представляють у вигляді:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A^* + B^* \cdot v_0 \quad (8)$$

$$A^* = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon^3} \quad B^* = B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3}$$

Для визначення невідомих коефіцієнтів “ A^* ” і “ B^* ” залежності (8) експериментальні значення (рис. 1а) представляли у вигляді залежності $\Delta P/H \cdot v_0 = f(v_0)$ (рис. 1б), яке дало змогу представити рівняння (8) у вигляді:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = 2100 + 8400 \cdot v_0 \quad (9)$$

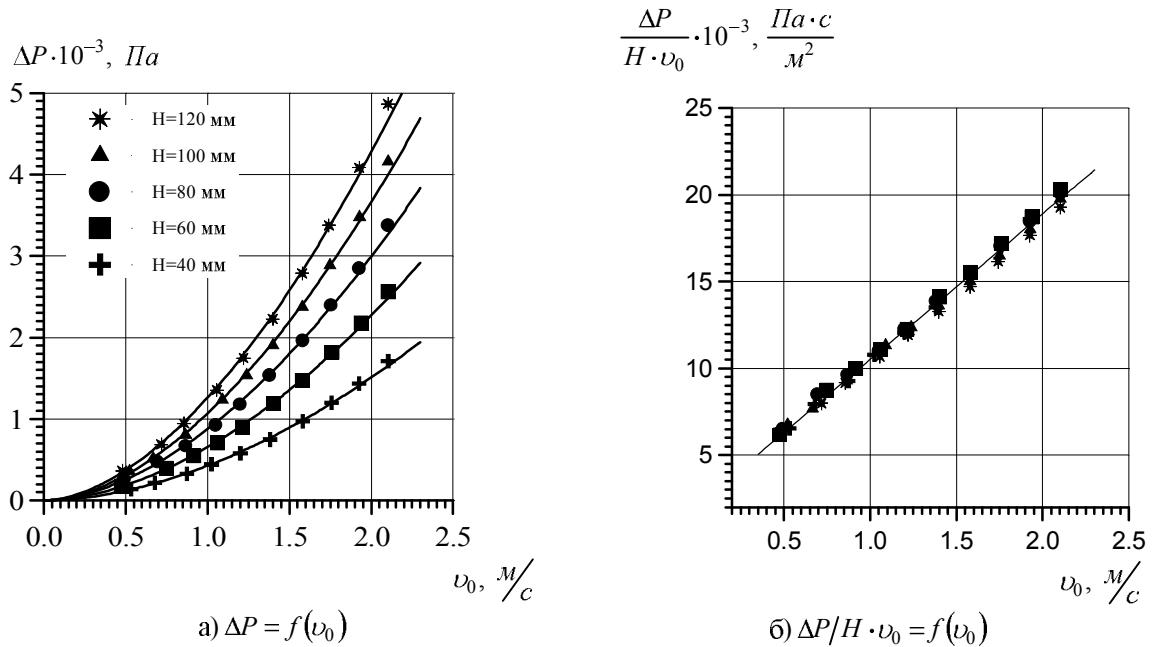


Рис. 1 – Гідродинаміка фільтрування теплового агенту крізь шар зерна пшениці

Коефіцієнт гідравлічного опору залежить від режиму фільтрування газового потоку і в багатьох випадках представляється залежністю:

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}_e} + B, \quad (10)$$

де $\text{Re}_e = \frac{\nu \cdot d_e \cdot \rho}{\mu}$ – число Рейнольдса.

Для визначення невідомих коефіцієнтів “А” і “В” рівняння (10) експериментальні дані (рис. 1) представляли у вигляді функціональної залежності $\lambda = f(\text{Re}_e)$ (рис. 2).

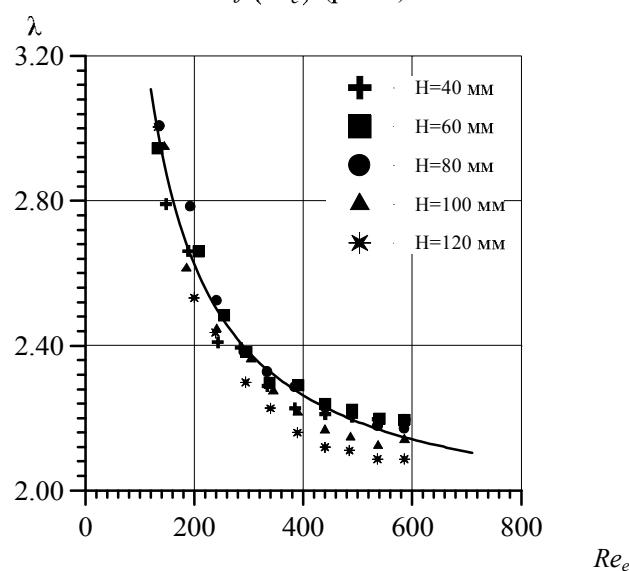


Рис. 2 – Залежність коефіцієнта гідравлічного опору λ від числа Re_e

Апроксимація експериментальних досліджень степеневою функцією дала змогу представити коефіцієнт опору у вигляді:

$$\lambda = \frac{145}{\text{Re}_e} + 1.9 \quad (11)$$

Аналіз залежності (11) вказує на деяку розбіжність між загально відомим рівнянням для визначення коефіцієнту опору шару дисперсного матеріалу сформованого із частинок правильної форми наведеною у [16]:

$$\lambda = \frac{133}{Re_e} + 2,34$$

Така розбіжність пояснюється тим, що шар зерна пшениці є полідисперсним, формується стихійно під час завантаження в установку, а також складністю визначення: еквівалентного діаметру зернин шару, усередненого фактору форми і величини взаємного екраниування поверхні зернин. Тому використання розрахункових залежностей, які наведені в літературних джерелах призводить до значних похибок під час розрахунків.

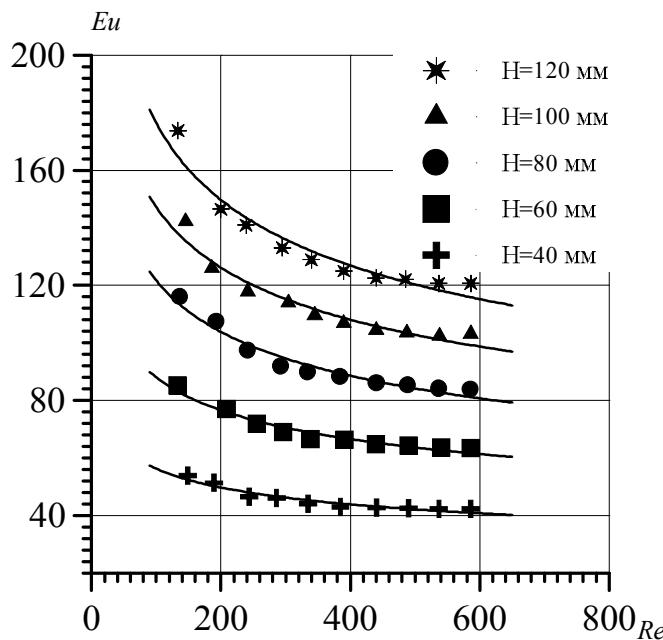


Рис. 3 – Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для зерна пшениці

Для опису гідродинаміки руху теплового агента крізь шар матеріалу використовують критеріальні рівняння [15]:

$$Eu = A \cdot Re_e^x \cdot \left(\frac{H_e}{d_e} \right)^y, \quad (12)$$

де H_e — еквівалентна довжина каналу по якому рухається тепловий агент, м: ($H_e = 1.5 \cdot H$);

H — висота шару зерна, м;

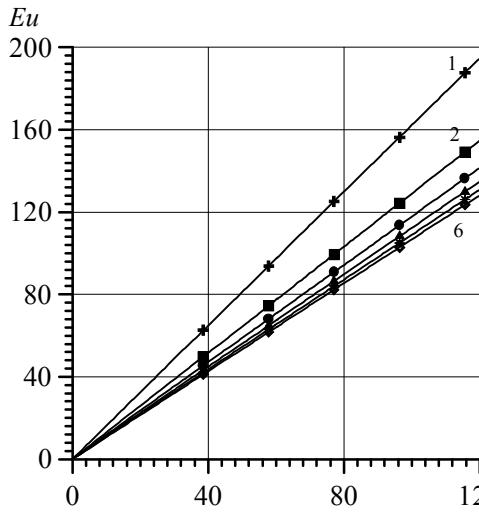
d_e — еквівалентний діаметр каналів крізь які фільтрується тепловий агент, м;

A, x, y — величини, які визначаються на основі експериментальних даних.

Така форма представлення експериментальних результатів є зручною під час застосування експериментальних результатів на практиці у випадку проектування промислових установок.

Експериментальні значення втрат тиску в шарі (рис. 1а) представляли у безрозмірній формі у вигляді залежності чисел Ейлера від чисел Рейнольдса (рис 3).

Для знаходження функціональної залежності між числом Ейлера, Рейнольдса і геометричним симплексом (H_e/d_e) використали графоаналітичний метод (рис. 4, 5).



1 – $Re=100$, 2 – $Re=200$, 3 – $Re=300$,
4 – $Re=400$, 5 – $Re=500$, 6 – $Re=600$

Рис. 4 – Залежність числа Ейлера
від геометричного симплекса H_e / d_e
для пшениці

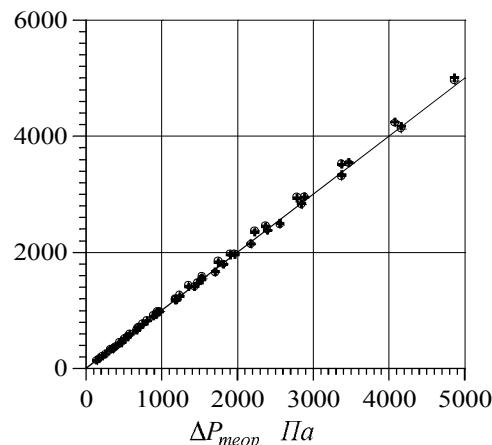
Аналізуючи (рис. 4) видно, що залежність $Eu = f(H_e/d_e)$ має лінійний характер, отже показник степеня "у" рівний одиниці. Також видно, що зростом числа Рейнольдса тангенс кута нахилу прямих зменшується, відповідно невідомі коефіцієнти "A" та "x" є функцією числа Рейнольдса (рис. 5). Апроксимація експериментальних даних степеневою залежністю (рис. 5) дала змогу визначити невідомі коефіцієнти рівняння (12):

$$A = 3.8 \cdot Re_e^{-0.2} \quad (13)$$

З врахуванням визначених коефіцієнтів "A", "x", "y", залежність (12) можна представити у вигляді:

$$Eu = 3.8 \cdot \frac{H_e}{d_e} \cdot Re_e^{-0.2} \quad (14)$$

$\Delta P_{\text{експ.}}, \text{Па}$



⊕ – згідно залежності (1);
⊕ – згідно залежності (14).

Рис. 6 – Кореляційна залежність між значеннями втрат тиску розрахованими теоретично $\Delta P_{\text{теор.}}$ Па та експериментальними значеннями $\Delta P_{\text{експ.}}$ Па

На рис. 6 наведена кореляційна залежність між теоретично розрахованими на основі залежності (1) з врахуванням (11), за рівнянням $\Delta P = Eu \cdot \rho \cdot v^2$ з врахуванням (14) та експериментальними значеннями втрат тиску в шарі зерна. Аналіз рис. 6 показує, що розраховані значення досить добре співпадають із експериментальними даними.

Висновок

На основі експериментальних даних отримані критеріальні рівняння, які дають змогу прогнозувати гідродинамічний опір шару зерна пшениці під час фільтраційного сушіння, і, відповідно, визначати енергетичні затрати на етапі проектування сушильного обладнання, та встановити економічну доцільність процесу.

З метою порівняння точності визначених залежностей (11) та (14) наведена кореляційна залежність між значеннями втрат тиску розрахованими теоретично та експериментальними даними. Аналіз рис. 6 показує, що абсолютне значення відносної похибки між теоретично розрахованими і експериментальними даними не перевищує 6,7%, отже, ці залежності можна рекомендувати для використання на практиці.

Література

1. Дрынча В.М. Сушка зерна и выбор сушилок в хозяйствах Скандинавии / В.М. Дрынча, Б.Д. Цыдендоржиев, Х. Лаури // Хранение и переработка зерна. – 2010. - №3, - С.32-38.
2. Гапонюк І.І. Удосконалення технології сушіння зерна. [Монографія] – Одеса.: Поліграф, 2009. – 182с.
3. Гузьова І.О. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / І.О. Гузьова, Я.М. Ханик // Вісник НУ “Львівська політехніка” (Хімія, технологія речовин та їх застосування) – 2000. – №414, – С.168–171.
4. Кіндзера Д.П. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару. / Д.П. Кіндзера, Я.М. Ханик, В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. –К.: –№6. 2002. –С.33-37.
5. Атаманюк В.М. Фільтраційне сушіння. Гідродинамічний опір полідисперсного шару зернистого матеріалу / В.М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. –К.: –2004. –№6, – С. 47-51.
6. Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння дисперсного матеріалу / В.М. Атаманюк // Всеукраїнський наук.-техн. журнал. Промислова гіdraulіка і пневматика. –Вінниця:–№1 (11), – 2006. –С. 12-17.
7. Дулеба В. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинаміка під час руху повітря через шар сухого зернистого поліакриламіду [Текст] / В. П. Дулеба, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 1997, № 2, – С. 16–19.
8. Гузьова І. О., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння кавової сировини для екстрагування жиру [Текст] / І. О. Гузьова, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2001, № 5, – С. 44–46.
9. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу [Текст] / Д. П. Кіндзера, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Вісник НУ “Львівська політехніка”, Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2001, № 426, – С. 204–208.
10. Аэроп М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем /М.Э. Аэроп, О.М. Тодес/- Л.: Химия, 1968. – 510 с.
11. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.І. Сушіння зерна. – К.: Либідь, 1997.-352с.
12. Воронова Е. В. Математическое моделирование технологической системы сушки и хранения зерна [Текст] : дис. ... канд. техн. наук / Е.Д. Воронова. – Воронеж , 2009. – С. 170.
13. Гросул Л.И., Дударев И.Р., Котляр Л.И. Форма поверхности и объем зерновки пшеницы. Известия вузов. Пищевая технология, 1972, № 4, с. 1720.
14. Аэроп М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем /М.Э. Аэроп, О.М. Тодес, Наринский Д.А./– Л.: Химия, 1979. – 176 с.
15. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару [Текст] / Д. П. Кіндзера, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2002, № 6, – С. 44–46
16. Касаткин Л.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии – М.: Химия, 1971. – 783 с.