

У роботі наведені результати експериментальних і теоретичних досліджень процесу теплообміну під час фільтраційного сушіння торфу та кавового шламу. Запропоновано розрахункові залежності для визначення коефіцієнта тепловіддачі від теплового агента до твердих частинок дисперсних матеріалів, що виступали об'єктами досліджень

Ключові слова: торф, кавовий шлам, дисперсний матеріал, стаціонарний шар, теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, тепловий агент, фільтраційне сушіння

В работе приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований процесса теплообмена при фильтрационной сушке торфа и шлама кофе. Предложены расчетные зависимости для определения коэффициента теплоотдачи от теплового агента к твердым частицам дисперсных материалов, которые избраны объектами исследования

Ключевые слова: торф, шлам кофе, дисперсный материал, стационарный слой, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, тепловой агент, фильтрационная сушка

Experimental and theoretical investigation of process of heat exchange during filtration drying of peat and coffee waste is shown in work. Calculative dependences for researching of heat emission coefficient from heat agent to hard particles of dispersion materials were a objects of investigation is proposed

Key words: peat, coffee waste, dispersion material, stationary layer, heat transfer, heat transfer coefficient, head agent, filtration drying

ТЕПЛООБМІН В СТАЦІОНАРНОМУ ШАРІ СУХОГО ДРІБНОДИСПЕРСНОГО КАПІЛЯРНО- ПОРИСТОГО МАТЕРІАЛУ

В.М. Атаманюк

Доктор технічних наук, доцент, професор*
Контактний тел. 067-802-80-00
E-mail: atamanyuk@ukr.net

Д.П. Кіндзера

Кандидат технічних наук, доцент, доцент*

І.О. Гузьова

Кандидат технічних наук, доцент, доцент*
Кафедра хімічної інженерії
Національний університет "Львівська політехніка"
пл. Св. Юра 9, м. Львів, 79013
Контактний тел.: (032) 258-26-57

Торф є цінною сировиною для хімічної галузі. З торфу отримують більше сотні основних хімічних продуктів, наприклад, метиловий і етиловий спирт, фенол, віск, парафін, молочну, оцтову і щавлеву кислоти, гербіциди тощо. Окрім цього брикетований торф використовують як паливо для побутового обігріву. Так, найвища теплота згоряння торфу складає 24 МДж/кг, а реальна (із врахуванням затрат на його висушування) лише – 8,4–11 МДж/кг [1]. Згідно з [2] після сушіння торфу у польових умовах середній вологовміст торфу складає 0,8 кг H₂O/кг сух.мат. Тому для подальшого використання торфу його необхідно висушувати.

Під час виробництва розчинної кави утворюється велика кількість кавового шламу. Тільки Львівська кавова фабрика "Галка" вивозить на сміттєзвалище

понад 30 т/добу кавового шламу. Однак кавовий шлам містить приблизно 15% екстрактивних речовин, які є цінною сировиною для хімічної, харчової, фармацевтичної, парфумерної промисловості [3]. Висушений кавовий шлам можна використовувати для виготовлення паливних брикетів, його теплотворна здатність складає 21 МДж/кг [4].

Постановка проблеми

Існуючі методи зневоднення дисперсних матеріалів характеризуються значними енергозатратами та тривалістю, тому інтенсифікація теплообміну процесу, зменшення питомих енергетичних затрат та техногенного навантаження на навколишнє середовище

є актуальним питанням сьогодення. Відомо, що фільтраційне сушіння належить до високоінтенсивних методів, суть якого полягає в профільтовуванні теплового агента в напрямку “шар матеріалу → перфорована перегородка”. Цей метод має ряд суттєвих переваг перед існуючими методами зневоднення, а саме: затрати енергії на організацію процесу та фазове перетворення вологи, що міститься у матеріалі, зменшуються завдяки видаленню міжзернової вологи шару рухомих тепловим агентом за рахунок механічного витіснення та винесення [5, 6]; відсутнім є винесення дрібнодисперсної фази матеріалу за межі сушильного агрегату, температура теплового агента на виході із сушильної установки є близькою до температури мокрого термометра, що дозволяє зменшити техногенне навантаження на атмосферу. Даний метод сушіння відповідає вимогам, які ставляться до сучасних новітніх технологій, тому його впровадження у виробництво сприятиме модернізації останнього.

Інтенсивність процесу теплообміну між тепловим агентом і вологим матеріалом визначає тривалість процесу та енергозатрати на його реалізацію.

Тому, **метою роботи** є вивчення особливостей теплообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Як об’єкти сушіння вибрані торф та кавовий шлам. Це складні, багатокомпонентні, гетерогенні, полідисперсні, капілярно-пористі колоїдні системи, які складаються із трьох фаз: сухої речовини (яка містить органічні та неорганічні сполуки), води і повітря. Розміри пор в окремих частинках торфу змінюються від 0,15 до $30 \cdot 10^{-6}$ м, тому його вважають мезопористою грубодисперсною системою [7]. Дослідження макропор обжарених кавових зерен методом електронної мікроскопії показало, що їх середній розмір знаходиться в межах $r = 10 \div 20 \cdot 10^{-6}$ м, шляхом поглинання CO_2 , що їх розмір становить $17 \div 33 \cdot 10^{-10}$ м, а методом ртутної порометрії $r = 10 \div 50 \cdot 10^{-9}$ м [8, 9], тому кавовий шлам також можна віднести до мезопористих матеріалів.

Аналіз останніх публікацій і досліджень

Дослідженням процесу теплообміну між твердими тілами і тепловим агентом присвячено ряд наукових робіт [10 – 13]. Зокрема, у монографії [10] наводяться узагальнення експериментальних досліджень під час руху теплового агента “перфорована перегородка – дисперсний матеріал” (знизу – вгору) до моменту псевдозрідження. Аналогічні результати наводяться і в [11]. В роботі [12], автор наводить методику розрахунку коефіцієнта тепловіддачі під час охолодження срібної кульки у рідкому середовищі на основі густини теплового потоку і температури на поверхні частинки. Результати наведені в цих роботах стосуються конкретних матеріалів і режимів теплообміну і застосувати їх для інших матеріалів є надзвичайно трудно, а в окремих випадках і неможливо через відсутність вихідних даних для результатів, наведених у літературному джерелі.

Відомо, що фільтраційне сушіння носить зональний характер і зона тепломасообміну рухається в напрямку руху теплового агента [5]. Це означає, що в шарі одночасно знаходяться сухий і вологий матеріали, причому

висота шару сухого матеріалу постійно зростає, а вологого зменшується. Під час фільтрування теплового агента крізь пористу структуру дисперсного матеріалу теплота до поверхні частинок передається конвективно, а в самих частинках – шляхом теплопровідності. Тепловий агент фільтрується крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу по криволінійних каналах, які утворюють частинки неправильної форми. Кількість і розміри таких каналів залежать від розмірів, форми і шорсткості частинок, а також методу формування шару (впорядковано чи стихійно). По висоті шару канали перехрещуються, об’єднуються і розгалужуються, поперечний переріз їх є неоднаковим, і тому не всі канали є газопроникними для конкретного перепаду тисків. Шорсткі частинки можуть утворювати замкнені зони, в яких теплообмін може відбуватися лише шляхом теплопровідності. Тому важливо дослідити процес теплообміну між сухим матеріалом і тепловим агентом, крізь який він фільтрується в першу чергу, і лише потім з вологим матеріалом.

Через складність теплообмінних процесів, що мають місце під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, є неможливими їх аналітичні описання без проведення експериментальних досліджень. Для кожного матеріалу теплообмінний процес буде мати свої особливості, зумовлені характеристиками самих частинок та шару, сформованого з даних частин.

Для інтенсифікації процесу фільтраційного сушіння, необхідним є визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агента до твердих частинок вказаних матеріалів, дослідження впливу дійсної швидкості руху теплового агента на значення цих коефіцієнтів, встановлення залежностей, які б дозволяли розрахувати коефіцієнти тепловіддачі при відомому режимі фільтрування та фізичних параметрах теплового агента.

Гранулометричний склад фрезерного торфу наведений у [2], а мелених кавових зерен, перед екстрагуванням, наведений у [8], інші параметри досліджуваних матеріалів наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Основні параметри шару фрезерного торфу та кавового шламу

Матеріал	$d_{ч} \cdot 10^3, \text{ м}$	$d_{с} \cdot 10^3, \text{ м}$	$\epsilon_{з}$	$\epsilon_{ш}$	$a, \text{ м}^2/\text{м}^3$
Торф	1,6	1,02	0,81	0,49	5860
Кавовий шлам	1,34	0,44	0,79	0,33	3300

Загальну пористість $\epsilon_{з}$ матеріалу розраховували за залежністю [14]:

$$\epsilon_{з} = 1 - \frac{\rho_{н}}{\rho_{ум}} \tag{1}$$

де $\rho_{н}$, $\rho_{ум}$ – насипна і умовна густини дисперсного матеріалу.

Пористість шару $\epsilon_{ш}$ визначали методом двох рідин, згідно рекомендацій, наведених у [14]. Усереднений розмір частинок розраховували із залежності [10]:

$$\frac{1}{d_{ч}} = \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{d_i} \tag{2}$$

X_i – масова частка фракції, що залишається на ситі з розміром отворів d_i .

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

$$d_e = \frac{2 \cdot d_v \cdot \epsilon_m}{3 \cdot (1 - \epsilon_m)} \quad (3)$$

Питома поверхня шару розраховувалась із залежності [10]:

$$a = a_0 \cdot (1 - \epsilon_m) \cdot K_n \quad (4)$$

де a_0 – питома поверхня шару розрахована на основі рекомендацій [10].

K_n – коефіцієнт взаємного екранування частинок у шарі.

На основі аналізу під мікроскопом зі збільшенням $20\times$ можливого контакту частинок між собою в шарі торфу і кавового шламу приймали $K_n = 0,6$ для торфу і $K_n = 0,72$ для кавового шламу. Для торфу коефіцієнт несферичності частинок приймали рівним $\Phi = 0,2$, а кавового шламу – $\Phi = 0,9$. Теплофізичні характеристики торфу брали із [2, 15], а кавового шламу – з [16].

Методика визначення коефіцієнтів тепловіддачі під час фільтрування теплового агенту крізь пористу структуру сухих дисперсних матеріалів

Для визначення усереднених коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до сухих частинок дисперсного матеріалу профільтрували із заданою швидкістю і температурою тепловий агент. Температуру над шаром підтримували постійною (з точністю $50 \pm 0,4^\circ\text{C}$) за допомогою термометра моделі ЦР 7701-03.

Вимірювання температури під шаром дисперсного матеріалу здійснювалося за допомогою термопар ХК і 7-канального вимірювального інтелектуального перетворювача ПВІ-0298 з виводом інформації на персональний комп'ютер. Температура вимірювалась на виході із шару дисперсного матеріалу в трьох точках: у центрі контейнера, на відстані 5 і 25 мм від його стінки та визначалась як середнє арифметичне цих трьох замірів.

Зафіксовані значення температури теплового агенту на виході із шару досліджуваних сухих матеріалів наведені на рис. 1.

Беручи до уваги результати експериментальних досліджень, наведених на рис. 1, розраховували значення коефіцієнтів тепловіддачі α згідно з рівнянням тепловіддачі [17]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (\bar{t} - \bar{T}_n) \cdot \Delta \tau} \quad (5)$$

ΔQ розраховували згідно рівняння теплового балансу для теплового агенту, \bar{t} – приймалося як середньоарифметична температура теплового агенту на вході і виході з шару.

Середня температура поверхні твердих частинок \bar{T}_n оцінювалась наступним чином. З рівнянь теп-

лового балансу визначалась середня температура частинок \bar{T} :

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0) \quad (6)$$

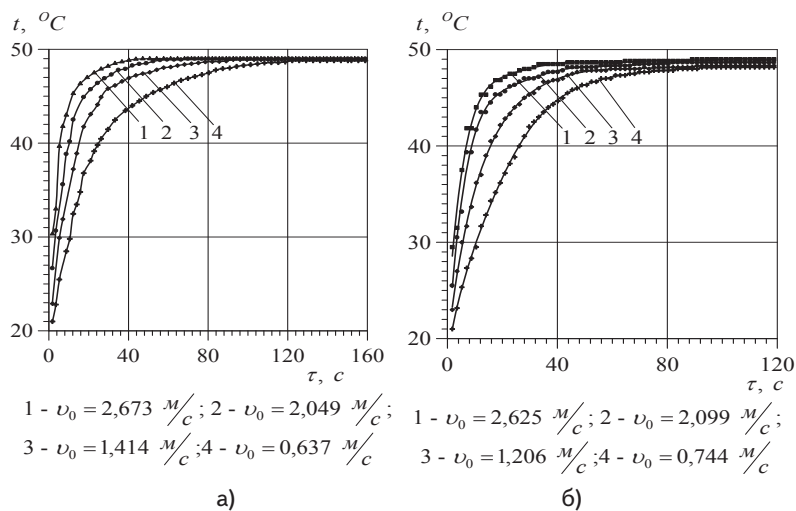


Рис. 1. Зміна температури теплового агенту на виході із шару: а) – кавового шламу; б) – торфу

Очевидно, що температура поверхні є більшою від середньої температури частинки. Однак, експериментально виміряти температуру поверхні частинок практично неможливо, тому вона оцінювалась на основі аналітичних залежностей для середньої температури та температури на поверхні твердого тіла, наведених в [17] для форми частинок, прийнятих наближеними до кулястої форми (фактор форми для частинок торфу приймався 0,2, для частинок кавового шламу – 0,9). Вважали, що температура теплового агенту однакова з усіх сторін частинки. Розподіл температурного поля по об'єму частинки має параболічний характер, а температура на поверхні частинки визначається за формулою:

$$T = t - (t - T_0 \cdot e^{-\mu_1^2 Fo}) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot e^{-\mu_1^2 Fo} \quad (7)$$

де t – температура теплового агенту;
 T_0 – початкова температура частинки;
 R, r – радіус частинки і біжучий радіус відповідно ($0 < r \leq R$);
 μ_1 – корінь характеристичного рівняння;
 Fo – критерій Фур'є.

Отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі є усередненими по шару у зв'язку з тим, що тепловий агент рухається через криволінійні канали, утворені частинками, поперечний переріз яких змінюється по висоті шару, внаслідок довільного розташування частинок неправильної форми.

Це означає, що швидкість теплового агенту по відношенню до поверхні частинки буде багаторазово змінюватися, а отже змінюватися буде і локальний коефіцієнт тепловіддачі.

Коефіцієнти тепловіддачі α від теплового агенту до шару сухих частинок торфу та кавового шламу розраховувалися за рівнянням (5) і представлені на рис. 2.

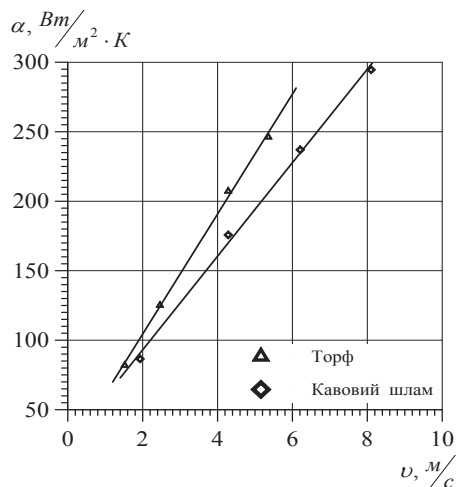


Рис. 2. Залежність коефіцієнту тепловіддачі α від дійсної швидкості v для шару сухого матеріалу

Як видно, отримані експериментальні значення коефіцієнту тепловіддачі α у залежності від дійсної швидкості фільтрування теплового агенту добре апроксимуються прямою лінією.

З графічних залежностей, представлених на рис. 2 видно, що при швидкості руху теплоносія 1,6 м/с значення коефіцієнтів α для обох матеріалів становлять близько $70 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$. Із подальшим зростанням дійсної швидкості руху теплоносія значення коефіцієнтів тепловіддачі α зростають, для обох матеріалів, і при досягненні швидкості 6 м/с становлять, відповідно, $230 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для кавового шламу та $280 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ для торфу.

Стає очевидним, що при збільшенні дійсної швидкості, на теплообмін в більшій мірі починає впливати структура шару матеріалу, а саме через канали між більшими частинками матеріалу (для торфу $d_e = 1,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, пористість шару $\epsilon_m = 0,49$) профільтровується більша кількість теплового агенту, ніж крізь канали, утворені частинками матеріалу менших розмірів (для кавового шламу $d_e = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, а пористість шару $\epsilon_m = 0,33$).

Для узагальнення експериментальних результатів наведених на рис. 2 та 3. представимо їх у безрозмірному вигляді:

$$Nu = A \cdot Re^n \cdot Pr^m \tag{8}$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$ – критерій Нусельта;

$Pr = \frac{v}{a}$ – критерій Прандтля;

v – коефіцієнт кінематичної в'язкості;

a – коефіцієнт температуропровідності.

Для узагальнення отриманих результатів, як основний лінійний розмір прийемо еквівалентний діаметр d_e каналів, через які фільтрується тепловий агент, і який є найбільш характерним для процесів у стаціонарному шарі і, у який входить усереднений діаметр частинки.

Враховуючи, те, що фізичні параметри повітря змінювалися у вузькому діапазоні, згідно рекомендацій [18] приймаємо $Nu \sim Pr^{0,33}$.

Для визначення невідомих коефіцієнтів “А” та “n” експериментальні значення представлялись залежністю $\frac{Nu}{Pr^{0,33}} = f(Re)$ у логарифмічній системі координат (рис. 3). Кожна точка одержана як середньоарифметичне значення мінімум трьох експериментів.

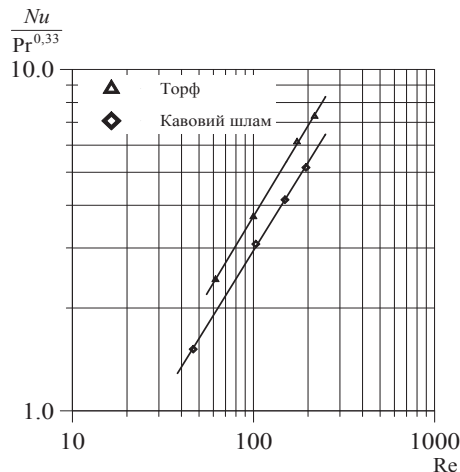


Рис. 3. Узагальнення результатів експериментального визначення коефіцієнтів тепловіддачі α у шарі сухого матеріалу

Як бачимо з рис. 3, експериментальні точки для даних матеріалів можна апроксимувати майже паралельними прямими, що означає, що показник степеня біля числа Рейнольдса буде однаковим для досліджуваних матеріалів. Розташування прямих ліній по вертикалі вказує на вплив гранулометричного складу матеріалу на коефіцієнт тепловіддачі. Результати розрахунків наведемо у вигляді табл. 2.

Таблиці 2

Значення коефіцієнтів “А” і “n” у залежності (8)

Матеріал	$d_c \cdot 10^3, \text{ м}$	$d_e \cdot 10^3, \text{ м}$	A	n
Торф	1,6	1,02	0,064	0,9
Кавовий шлам	1,34	0,44	0,057	

Щоби визначити вплив гранулометричного складу досліджуваних нами матеріалів на число Нусельта, доповнимо залежність (8) геометричним симлексом:

$$Nu = A^* \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_c}{D_a} \right)^k \tag{9}$$

де D_a – діаметр контейнера ($D_a = 0,1 \text{ м}$).

Показник степеня “k” прийемо рівним $k=0,67$, такий самий, який ми отримали для кам'яного вугілля, подвійного суперфосфату і амофосу [19]. З врахуванням геометричного симплекса $\left(\frac{d_c}{D_a} \right)^k$, який показує вплив усередненого діаметра частинки і діаметра апарату на процес теплообміну та з врахуванням показника степеня $k=0,67$, знайдене значення коефіцієнта $A^* = 1,0$. Тоді залежність (9) для сухого торфу і кавового шламу можна записати у вигляді:

$$Nu = 1,0 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,33} \cdot \left(\frac{d_c}{D_0} \right)^{0,67} \quad (10)$$

Максимальна відносна похибка між експериментальними значеннями і розрахованими за залежністю (10) не перевищує 13,7%. Залежність числа Нусельта аналогічно як і коефіцієнта тепловіддачі залежить від режиму фільтрування теплового агенту і розмірів частинок матеріалу, що корелюється із даними наведеними у роботі [20, 21] для різних за розмірами скляних і пластмасових кульок.

Висновок

Отримана розрахункова залежність (10) дозволяє визначити з достатньою точністю коефіцієнти тепло-віддачі під час профільовування теплоносія крізь шар сухого торфу або кавового шламу і дає змогу прогнозувати необхідні затрати теплової енергії на етапі проектування сушильного обладнання і вибору раціональних параметрів процесу фільтраційного сушіння.

Література

1. Федотов А.Ц. Водно-физические свойства торфа – Мн.: Наука и техника, 1977. – 120 с.
2. Справочник по торфу / Под редак. канд. техн. наук А.В. Лазарева и д-ра техн. наук С.С. Корчунова. – М.: Недра, 1982. – 760 с.
3. Massini R. Study on physical and physicochemical changes of coffee beans during roasting. Note 1. Ital. / R. Massini, M.C. Nicoli, A. Cassara, C.R. Lericci // J. Food Science. – 1990. – №2. – P. 123-130.
4. Нахмедов Ф.Г. Технология кофепродуктов – М.: Легкая промышленность, 1984. – 184 с.
5. Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі: Автореф. дис...канд. техн. наук – Львів, 2003. – 20с.
6. Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури: Автореф. дис. ... канд. техн. наук – Львів, 2001. – 18 с.
7. Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения – Мн.: Наука и техника, 1975. – 320с.
8. Schenker S. Pore structure of coffee beans affected by roasting conditions / S. Schenker S. Handschin, B. Frey, R. Perren, F. Escher / J. Food Sci. – 2000. – 65. – № 3. – P. 452-457.
9. Saleeb F.Z. Adsorption of carbon dioxide on roast and ground coffees // 7th Int. Colloquium on the Chemistry of Coffee. – Hamburg, 1975. – P. 335-339.
10. Аэров М.Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М.Э. Аэров, О.М. Тодес / – Л.: Химия, 1968. – 510 с.
11. Федосов С.В. Теплообмен между газом и дисперсным материалом / С.В. Федосов // Реология, процессы и аппараты химической технологии: Сб. науч. Трудов – Волгоград: ВПИ, 1984, –С. 23-38.
12. Зотов Е.Н. Методика определения коэффициента теплоотдачи охлаждающих сред в условиях нестационарного теплообмена / Е.Н. Зотов, А.А. Москаленко, Л.Н. Проценко, О.В. Разумцева // Промышленная теплотехника. –К.: –2003, Т. 25, –№4, –С.315-317.
13. Атаманюк В.М. Дисперсні матеріали Механізм і кінетика фільтраційного сушіння // В.М. Атаманюк / Хімічна промисловість України. К.: –2007. –№4, –С.24-29.
14. Плачевов Т.Г. Пирометрия // Т.Г. Плачевов, С.Д. Колоденцев / – Ленинград: Химия, Ленинградское отделение. –1988. – 175с.
15. Васильев Л.Л. Теплофизические свойства пористых материалов // Л.Л. Васильев, С.А. Танаева / – Мн.: Наука и техника, 1971. – 268 с.
16. Гинсбург А.С., Громов М.А., Красовская Г.И. Теплофизические характеристики пищевых продуктов // А.С. Гинсбург, М.А. Громов, Г.И. Красовская / [Справочник] –М.: Агропромиздат, 1990. – 287с.
17. Лыков А.В., Михайлов Ю.А. Теория тепло- и массопереноса –М.: ГЭИ, 1963. – 353с.
18. Гельперин Н.И. Основные процессы и аппараты химической технологии // Н.И. Гельперин / – М.: Химия, 1981. – 812 с.
19. Atamanyuk V. Heat-and-mass exchange during filtration drying of dispersion materials // Materialy XIX Ogulnopolskiej konferencji inzynierii chemicznej i procesowej. –Rzeszow: –2007. T1. –S.23-26.
20. Членов В.А. Виброкипящий слой // В.А. Членов, Н.В. Михайлов / – М.: Наука, 1972. – 343 с.
21. Кунин Д. Промышленное псевдооживление // Д. Кунин, О. Левеншпиль / США, 1969. Пер. с англ. / Под ред. М.Г. Слинько и Г.С. Яблонского. – М.: Химия, 1976. – 448с.