ХІМІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОМИСЛОВА ЕКОЛОГІЯ

УДК 66.045

І.Р. Барна, В.М. Атаманюк

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра хімічної інженерії

ГІДРОДИНАМІКА ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБНИЦТВА ШЛАКОВОГО ГРАВІЮ

© Барна І.Р., Атаманюк В.М., 2012

In article present results of experimental and theoretical researches of air filtration hydrodynamics through polygrained layer of raw materials of slag gravel. Present criterion equations which allow using these results for planning an apparatus with stationary layer of dispersed material.

Key words: slag, clay, source granules, dispersion material, stationary layer, filtration drying, hydrodynamic, resistance coefficient.

Наведено результати експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки руху повітря крізь полідисперсний шар сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію. Одержано критеріальні залежності, які дають змогу використовувати результати під час проектування апаратів зі стаціонарним шаром дисперсного матеріалу.

Ключові слова: шлак, глина, сирцеві гранули, дисперсний матеріал, стаціонарний шар, фільтраційне сушіння, гідродинаміка, коефіцієнт опору.

Постановка проблеми

Золошлакові відходи теплоелектростанцій (ТЕС) належать до таких забруднювачів навколишнього природного середовища, які не тільки спотворюють ландшафти, впливаючи на підземні води та біосферу і відповідно на здоров'я населення, а й одночасно відчужують великі масиви українських чорноземів [1]. Водночас у сучасних умовах нестачі енергоносіїв та природних ресурсів золошлаки потенційно можуть використовуватися як вторинна сировина у промисловості будівельних матеріалів. Тому вдосконалення технології отримання будівельних виробів на основі золошлакових матеріалів є актуальним завданням.

Золошлакові відходи ТЕС використовують як сировину для виготовлення шлакового гравію, який отримують методом випалювання сирцевих гранул, виготовлених з шихти (суміші шлаку – 86 % і глини – 14 %). Одним з найбільш затратних етапів виробництва є сушіння сировини, для чого в промисловості використовують барабанні сушарки. Своєю чергою, барабанні сушарки є великогабаритними, енергозатратними, потребують високих капітальних затрат та забруднюють довкілля внаслідок винесення дрібнодисперсної фракції. А також тепловий агент на виході з сушарок цього типу має високу температуру та не насичений повністю вологою. Для усунення цих недоліків нами пропонується фільтраційний метод сушіння сировини для виробництва шлакового гравію, який належить до екологічно чистих та високоінтенсивних методів сушіння.

Гідродинаміка фільтраційного сушіння тісно пов'язана з інтенсивністю сушіння, адже режим руху повітря визначає товщину ламінарного пограничного шару навколо частинки, який лімітує

процес як тепло-, так і масоперенесення вологи. Тому одним з перших етапів дослідження фільтраційного сушіння є експериментальне дослідження закономірностей зміни гідравлічного опору шару сухого матеріалу (ΔP) від фіктивної швидкості руху теплоносія (υ 0) та структурних особливостей шару (H, ε , de), адже відомо [2], що втрати тиску в стаціонарному шарі дисперсного матеріалу є функцією гранулометричного складу шару, його висоти, структурної будови та форми частинок, густини та в'язкості теплового агенту.

Аналіз останніх публікацій

Вплив гідродинаміки фільтрування теплоносія на гідравлічний опір шару зернистого матеріалу досліджено у роботах [3–7]. У цих роботах наведено основні закономірності фільтрування повітря крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу в напрямку "дисперсний матеріал – перфорована перегородка". Такий напрям газового потоку не порушує стаціонарності шару і дає змогу проводити технологічні процеси у широкому діапазоні швидкостей.

Існує ряд розрахункових залежностей, що дають змогу прогнозувати втрати тиску в шарі дисперсного матеріалу під час фільтраційного сушіння, які відрізняються між собою точністю і параметрами, які взяті за визначальні. Більшість авторів використовують залежність Дарсі–Вейсбаха [3–6] або модифіковане двочленне рівняння Ергана, яке враховує втрати на тертя і місцеві опори:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot v_0} = A \cdot \frac{9 \cdot \mu}{8 \cdot d_g^2} \cdot \frac{(1 - \varepsilon_w)^2}{\varepsilon_w^3} + B \cdot \frac{3 \cdot \rho}{4} \frac{1 - \varepsilon_w}{d_g \cdot \varepsilon_w^3} \cdot v_0 \tag{1}$$

Проте розрахункові залежності, які наведено у технічній літературі, стосуються окремих конкретних випадків, тому їх неможливо застосувати для подібних за структурною будовою матеріалів або за інших режимів руху та в апаратах з іншими геометричними розмірами.

Мета досліджень

Метою роботи є дослідження гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар шлаку, глини та сирцевих гранул і подання результатів експериментальних досліджень у безрозмірній формі, зручній для використання в інженерній практиці для проектування нового сушильного обладнання.

Експериментальна частина

Шлак – це полідисперсна суміш частинок неправильної форми. Як об'єкт сушіння шлак являє собою пористий матеріал з системою пор і капілярів, які відрізняються між собою за розмірами та взаємним розташуванням. Пори у шлаку є переважно закритими, тому волога є переважно зовнішньою і становить приблизно 10–20 %.

З погляду гідродинаміки та згідно з класифікацією, наведеною у [8], частинки шлаку належать до подрібнених, кутастих та крупнозернистих матеріалів. Структура шлаку кристалічної та склоподібної будови.

Хімічний склад досліджуваного шлаку Бурштинської ТЕС подано у табл. 1 [9].

Таблиця 1

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
55,74%	22,28%	23,82%	0,8%	3,33%	1,73%	0,32%	0,7%	1,5%

Хімічний склад шлаку

Глина є колоїдним пластичним матеріалом вторинного походження, що утворився в результаті розпаду і розкладання деяких видів первинних порід [10].

Важливими технологічними властивостями цих природних полімінеральних сумішей є: пластичність, вогнетривкість, спікливість, спучування, а також набухання, чутливість до сушіння, повітряне "сідання", вогневе "сідання", сорбційна та в'яжуча здатність, покривна властивість, властивість утворювати стійкі суспензії з надлишком води, хімічна інертність [11].

Глину, що використовують у складі шихти для виробництва сирцевих гранул, видобувають з Калуського родовища (Івано-Франківської області), яка має характеристики, наведені в табл. 2 [12].

Початкова вологість глини становить 19–20 %. Вода в глині знаходиться у механічній суміші і хімічному зв'язку з глиною.

Частинки глини мають округлу форму різних геометричних розмірів.

Хімічний склад досліджуваної глини подано у табл. 2 [9].

Таблиця 2

SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
67,5%	12,77%	7,54%	0,42%	11,0%	2,9%	0,48%	1,0%	2,96%

Хімічний склад глини

Сирцеві гранули виготовляють у вигляді капіляропористої пластичної маси кулястої форми. Виробництво шлакового гравію має такі стадії: сушіння глини та шлаку, подрібнення сировини, грануляція, сушіння гранул, випікання гранул у печі та охолодження готового продукту. Попередньо висушену глину і шлак подрібнюють до розміру 140 мкм, а отриману шихту подають на тарілчастий гранулятор у співвідношенні: глина 86 % та шлак 14 %. Вологість утворених сирцевих гранул приблизно 13–15 %, тому згідно з технологічною схемою процесу їх необхідно сушити до вологості 2 % перед поданням у піч.

Шлаковий гравій випускають трьох марок, які відрізняються насипною густиною та розміром фракцій. Досліджували гідродинаміку стаціонарного шару сирцевих гранул для фракції 10–20 мм, яка користується найбільшим попитом. Характеристику шлакового гравію наведено в табл. 3 [13].

Таблиця 3

		- I	I. I. I.	
Розмір фракції, мм	Насипна густина, кг/м ³	Міцність при здавлюванні в циліндрі, МПа	Коефіцієнт форми зерна	Коефіцієнт теплопровідності W/MK
10 - 20	350 - 400	0,8 – 2,0	1 – 1,2	0,112
5 - 10	450 - 500	2,0-3,0	1 – 1,1	0,162
2,5-5	500	-	1 – 1,1	-

Характеристика шлакового гравію

Гранулометричний склад матеріалів визначався ситовим аналізом і наведений відповідно для шлаку на рис. 1, для глини рис. 2 та сирцевих гранул рис. 3.

Масова частка



Рис. 1. Гранулометричний склад шлаку

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua



Рис. 2. Гранулометричний склад глини



Масова частка

Рис. 3. Гранулометричний склад сирцевих гранул

Усереднений діаметр частинок полідисперсного шлаку та глини визначали на основі ситового аналізу без врахування їх кількісного складу, згідно з рекомендаціями [14], за розрахунковими залежностями (2)–(5) подано у табл. 4 для шлаку та табл. 5 для глини:

- як середньоарифметичне

$$\overline{d}_{y} = \frac{\mathbf{d}_{\max} + \mathbf{d}_{\min}}{2}; \tag{2}$$

- як середньогармонічне

$$\overline{d}_{u} = \frac{2 \cdot d_{\max} \cdot d_{\min}}{d_{\max} + d_{\min}};$$
(3)

- як середньогеометричне

$$\overline{d}_{u} = \sqrt{\mathbf{d}_{\max} \cdot \mathbf{d}_{\min}} ; \qquad (4)$$

- як середнє за формою

$$\overline{d}_{y} = \frac{4}{5} \cdot \frac{d_{\text{max}}^{5} - d_{\text{min}}^{5}}{d_{\text{max}}^{4} - d_{\text{min}}^{4}}.$$
(5)

d_{min}, *d_{max}* – мінімальний і максимальний розмір частинок, що пройшли через отвори верхнього сита і не пройшли через отвори нижнього сита.

204

Усереднений діаметр частинок шлаку та глини з врахуванням масової частки кожної фракції (*X_i*) визначали із залежності [14]:

$$\frac{1}{d_{y}} = \sum_{i=1}^{N} \frac{X_{i}}{d_{yi}},$$
(6)

де X_i – масова частка фракції з розміром частинок d_i .

Таблиця 4

Фракція,		Розрахункова залежність					
$\times 10^3$, <i>M</i>	Масова частка	(2)	(3)	(4)	(5)		
0,14-0,315	0,014199	0,2265	0,193846	0,21	0,257684		
0,315-0,63	0,035875	0,4724	0,42	0,445477	0,5208		
0,63-1,25	0,113557	0,94	0,837766	0,887412	1,034211		
1,25-2,5	0,155142	1,875	1,666667	1,767767	2,066667		
2,5-5,0	0,348962	3,75	3,333333	3,535534	4,133333		
5-10,0	0,332265	7,5	6,666667	7,071068	8,266667		
$d_{_{y}}^{*}$		2,08362	1,845615	1,962474	2,306942		

Усереднений діаметр частинок шлаку, $d_{y} \cdot 10^{3}$, м

* – усереднений діаметр частинок шлаку, розрахований за залежністю (6)

Враховуючи незначну різницю між розрахованими значеннями діаметра частинки шлаку за залежностями (2)–(5), доцільно використовувати залежність (2), яка є найпростішою для обрахунків.

Таблиця 5

Фракція		Розрахункова залежність					
$\times 10^{3}, M$	Масова частка	(2)	(3)	(4)	(5)		
0,315-0,63	0,029609	0,4725	0,54548	0,42	0,5208		
0,63-1,25	0,073357	0,94	0,88741	0,837766	1,034211		
1,25-2,5	0,074214	1,875	1,86777	1,666667	2,066667		
2,5-5,0	0,220262	3,75	3,83553	3,333333	4,133333		
5-10,0	0,293201	7,5	7,47107	6,666667	8,266667		
10,0-20,0	0,309358	15	14,4421	13,33333	16,53333		
$d_{_{y}}^{*}$		3,347422	2,977539	3,157069	3,687854		

Усереднений діаметр частинок глини, *d*₄ · 10³, *м*

* – усереднений діаметр частинок глини, розрахований за залежністю (6)

Аналогічно, як і для шлаку, усереднений діаметр полідисперсної глини визначають за залежністю (2), яка є найпростішою для розрахунків та з врахуванням масової частки кожної фракції (X_i) за залежністю (6).

Усереднений діаметр сирцевих гранул визначали безпосереднім вимірюванням лінійних розмірів 300 гранул штангенциркулем та узагальненням отриманих результатів за залежністю (6).

Загальну пористість досліджуваних матеріалів (\mathcal{E}) визначали пікнометричним методом, а внутрішню пористість і пористість шару – за допомогою двох рідин, які не змішуються між собою (наприклад, вода – бензол). Еквівалентний діаметр каналів (d_e) крізь які фільтрується тепловий агент, визначали із залежності:

$$d_e = \frac{2d_u}{3} \cdot \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \,. \tag{7}$$

Щоб розрахувати значення питомої поверхні шару, яка омивається потоком повітря, користувалися усередненими значеннями розмірів частинок, допускаючи, що форма частинки є сферичною, при цьому враховується коефіцієнт сферичності (φ_c) [15].

$$f_{yM.} = \frac{6 \cdot (1 - \mathcal{E}_{uu})}{d_u \cdot \varphi_c}, \qquad (8)$$

де d_u – усереднений діаметр частинки, ε_u – порізність шару та φ_c – коефіцієнт сферичності.

- Коефіцієнт сферичності обирали згідно з рекомендаціями [16]:
- для кутастих і шорстких $\varphi_c = 0, 4 0, 65$;
- округлі з різкими виступами $\varphi_c = 0,65 0,8$.

Для шлаку згідно з процентним співвідношенням кутастих та округлих частинок коефіцієнт сферичності приймаємо $\varphi_c = 0,6$, для глини $\varphi_c = 0,75$ та сирцевих гранул $\varphi_c = 0,99$.

Активну питому поверхню розраховували за формулою [17]:

$$a = f_{VM} \cdot \mathbf{k}_{\mathrm{e}},\tag{9}$$

де f_{yM} – питома поверхня шару дисперсного матеріалу, k_e – коефіцієнт взаємного екранування визначали візуальним методом згідно з рекомендаціями [17].

Результати розрахунків наведено у табл. 6.

Таблиця б

Матеріал	$d_{y} \cdot 10^{3}, m$	$d_e \cdot 10^4$, m	$ ho_{_{hac.,}}$ кг / м 3	$\mathcal{E}, \frac{M^3}{M^3}$	φ_c	$f_{y_M}, \frac{m^2}{m^3}$	K _n	$a, \frac{m^2}{m^3}$
Шлак	2,08	7,47	1350	0,35	0,6	3125	0,72	2250
Глина	3,35	12,03	1170	0,35	0,75	1552	0,76	1180
Сирцеві гранули	12,68	51,81	1220	0,39	0,99	292	0,99	289

Основні характеристики досліджуваних матеріалів

Експериментальні дослідження гідродинаміки стаціонарного шару досліджуваних матеріалів проводили на установці за методикою, яку описано у роботі [6].

Результати експериментальних досліджень втрат тиску як функції фіктивної швидкості для шлаку, глини та сирцевих гранул наведено на рис. 4–6 відповідно.



206



Рис. 6. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі сирцевих гранул від фіктивної швидкості

Для опису гідродинаміки руху теплового агенту крізь шар дисперсного матеріалу використовують критеріальні рівняння [18]:

$$Eu = A \cdot \operatorname{Re}^{-x} \left(\frac{H_e}{d_e} \right)^{y}, \tag{10}$$

де H_e – еквівалентна довжина каналу, по якому рухається тепловий агент, згідно з рекомендаціями [17], м;

$$H_{\rho} = 1, 5 \cdot H$$
,

де *H* – висота шару дисперсного матеріалу, м; *d_e* – еквівалентний діаметр пор і каналів, крізь які фільтрується тепловий агент, м; *A*, *x*, *y* – коефіцієнти, які визначаються на основі експериментальних даних.

Наведено результати експериментальних досліджень у безрозмірній формі, у вигляді залежності критерію Ейлера від критерію Рейнольдса, що дає змогу поширювати знайдені залежності, отримані на експериментальному обладнанні для проектування нового сушильного обладнання, за умови, що визначальні критерії в обох випадках будуть подібними.

Щоб знайти функціональну залежність між числом Ейлера, Рейнольдса і геометричним симплексом, використаємо графоаналітичний метод, тобто представимо залежність числа Ейлера від геометричного симплексу $Eu = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$ для різних значень числа Рейнольдса (рис. 7, 8, 9).

За тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис визначали невідомі коефіцієнти A, x i y.

3 рис. 7, 9, 11 видно, що значення показника степеня "у" дорівнює одиниці, про що свідчить лінійна залежність $Eu = f\left(\frac{H_e}{d_e}\right)$.



2

1

0

A



Рис 8. Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса для шлаку

40

80

120

Re



Рис. 9. Залежність числа Ейлера від геометричного симплекса H_e / d_e для глини для 1-Re=40, 2-Re=65, 3-Re=90, 4-Re=115, 5-Re=140, 6-Re=165, 7-Re=190



Рис 10. Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса для глини





Рис 11. Залежність числа Ейлера від геометричного симплекса H_e / d_e для сирцевих гранул для 1-Re=220, 2-Re=315, 3-Re=410, 4-Re=505, 5-Re=600, 6-Re=695, 7-Re=790

Рис 12. Залежність коефіцієнта А від числа Рейнольдса для сирцевих гранул

Коефіцієнт А, який є функцією числа Рейнольдса, визначаємо з рис. 8, 10, 12 (табл. 7).

Таблиця 7

Коефіцієнт «А» та рівняння для розрахунку числа Ейлера для досліджуваних матеріалів

Матеріал	A = f(Re)	$Eu=f(Re, \Gamma)$
Шлак	$19 \cdot {\rm Re}^{-0,55}$	$Eu = 19 \cdot \mathrm{Re}^{-0.55} \cdot \frac{H_e}{d_e}$
Глина	$10 \cdot \mathrm{Re}^{-0.50}$	$Eu = 10 \cdot \mathrm{Re}^{-0.50} \cdot \frac{H_e}{d_e}$
Сирцеві гранули	$5 \cdot \mathrm{Re}^{-0.23}$	$Eu = 5 \cdot \mathrm{Re}^{-0.23} \cdot \frac{H_e}{d_e}$

Також важливо визначити коефіцієнт гідравлічного опору стаціонарного шару дисперсного матеріалу. Адже визначення цього коефіцієнта дає змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння в широких межах швидкості фільтрування теплового агента.

$$\lambda = 2 \cdot \frac{Eu \cdot d_e}{H_e} \tag{11}$$



Рис. 13. Залежність числа Ейлера від чисел Рейнольдса для шлаку



Рис. 14. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для шлаку (позначення відповідають рис. 13)



Рис. 15. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для глини

Рис. 16. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для глини (позначення відповідають рис. 15)



Рис. 17. Залежність числа Ейлера від числа Рейнольдса для сирцевих гранул

Рис. 18. Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від числа Рейнольдса для сирцевих гранул (позначення відповідають рис. 17)

Із графічної залежності рис. 14, 16, 18 визначаємо коефіцієнт гідравлічного опору досліджуваних матеріалів:

Таблиця 8

Матеріал	$\lambda = f(Re)$
Шлак	$\lambda = 38 \cdot \mathrm{Re}_e^{-0.55}$
Глина	$\lambda = 20 \cdot \mathrm{Re}_e^{-0.50}$
Сирцеві гранули	$\lambda = 10 \cdot \mathrm{Re}_e^{-0.23}$

Коефіцієнт гідравлічного опору для досліджуваних матеріалів

Отримані залежності добре узгоджуються із експериментальними значеннями, а максимальна відносна похибка не є більшою за 12 %, що є цілком прийнятним для проектних розрахунків технологічного обладнання. Ця величина похибки обумовлена стихійністю утворення структури шару зернистого матеріалу та неправильною формою частинок.

Висновок

Отримані критеріальні рівняння дають змогу визначити енергетичні затрати на створення перепаду тисків під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію та сирцевих гранул, на етапі проектування сушильного обладнання без проведення додаткових експериментальних досліджень у визначених межах критерію Рейнольдса, з достатньою точністю для проектних розрахунків.

1. Ігнатьєва І. П. Стан використання ЗШВ теплових електростанцій в Україні / І. П. Ігнатьєва / Енергетика та електрифікація. – 2008, № 3, – С. 34–36. 2. Кіндзера Д. П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу в щільному шарі [Текст] : автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.17.08 / Д. П. Кіндзера, НУ «Львівська політехніка». – Л., 2003. – 20 с. З. Дулеба В. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинаміка під час руху повітря через шар сухого зернистого поліакриламіду / В. П. Дулеба, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 1997, № 2, – С. 16–19. 4. Гузьова І. О., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння кавової сировини для екстрагування жиру / І. О. Гузьова, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2001, № 5, – С. 44–46. 5. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Гідродинаміка фільтраційного сушіння торфу / Д. П. Кіндзера, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування. – 2001, № 426, – С. 204–208. 6. Кіндзера Д.П., Ханик Я.М., Атаманюк В.М. Зернистий матеріал. Гідродинаміка полідисперсного шару / Д. П. Кіндзера, Я. М. Ханик, В. М. Атаманюк // Хімічна промисловість України. – 2002, № 6, – С. 44–46 7. Атаманюк В. М., Ходорівський Р. В, Барна І. Р. Гідравлічні закономірності роботи апаратів зі стаціонарним шаром дисперсного матеріалу / В. М. Атаманюк, Р. В. Ходорівський, І. Р. Барна // Вісник Нац. ун-ту "Львівська політехніка", Хімія, технологія речовин та їх застосування.– 2010, № 667, – С. 257–261. 8. Атаманюк В.М., Ханик Я.М. Класифікація дисперсних матеріалів як об'єктів сушіння фільтраційним методом В. М. Атаманюк, Я. М. Ханик // Хімічна промисловість України. – 2007, № 3, – С. 37–45. 9. Регламент заводу утилізації відходів виробництва Бурштинської ТЕС. 10. Мельник Л. Глина в производстве. Промышленный взгляд на керамические изделия / Л. Мельник // Стекло и керамика. Строительные материалы в Украине. – 2006, № 1–2, – С. 32–37. 11. Осипов, В. І. Мікроструктура глинистих порід / В. І. Осипов, В. Н. Соколов, Н. А. Румянцева – М.: Надра, 1989. – 211 с. 12. Государственный геологический комитет СССР. Строительные материалы Украины. Ивано-Франковска область. – К.: "Будівельник" – 1965. – 325 с. 13.Шлаковий гравій, – аналог керамзиту [Електронний ресурс]. — Режим доступу : \WWW/ URL: http://www.butes.if.ua/keramzit.hmtl . 14. Лукьянов П. И. . Annapamы с движущимся зернистым слоем. Теория и расчет [Текст] / П. И. Лукьянов. – М.: Машиностроение, 1974. – 184 с. 15. Врагов А. П. Гідромеханічні процеси та обладнання хімічних і нафтопереробних виробниитв / А. П. Врагов. – Суми: Алан-Екс, 2003. – 232 с. 16. Муштаев В. И., Ульянов В. М. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: "Химия", 1988. – 352 с. 17. Аэров М. Э., Тодес О. М., Наринский Д. А. Аппараты со стационарным зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес, Д. А. Наринский – Л.: Химия, 1979. – 176 с. 18. Мосюк М. І., Атаманюк В. М., Кіндзера Д. П. Гідродинаміка стаціонарного шару подрібненої «енергетичної» верби під час фільтраційного сушіння / М. І. Мосюк, В. М. Атаманюк, Д. П. Кіндзера // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – № 40 (1). – С.197–202.