

- агрегатів синтезу аміаку [Текст] / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський // Восточно – европейский журнал передовых технологий. – Харьков: Технологический центр, 2008. – № 3/4. – С. 23 – 27.
9. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкости [Текст] / Н.Б. Варгафтик. – М.: наука, 1972. – 720 с.
10. Соколов, Е.Я. Струйные аппараты [Текст] / Е.Я. Соколов, Н.М. Зингер. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 350 с.
11. Ефимов, В.Т. Повышение эффективности работы абсорбционных холодильных установок в агрегатах синтеза аммиака большой мощности [Текст] / В.Т. Ефимов, С.А. Ерещенков, А.К. Бабіченко // Холодильная техника. – М.: «Пищевая промышленность», 1979. – № 2. – С. 23 – 26.
12. Патент на корисну модель № 42161. Україна. МПК F25B 15/00, F25B 49/00, C01C 1/00. Установа для виробництва аміаку / Бабіченко А.К., Тошинський В.І., Красніков І.Л., Деменкова С.Д.; заявник і власник НТУ «ХПІ». №U200900599; заявл. 27.01.2009; опубл. 25.06.2009, Бюл. № 12.

*У статті представлено результати експериментальних та теоретичних досліджень кінетики та динаміки фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію. Обґрунтовано існування періоду часткового та повного насичення теплового агента під час фільтраційного сушіння. Проаналізовано залежність фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента і висоти шару матеріалу*

*Ключові слова: кінетика, динаміка, глина, сирцеві гранули, швидкість фільтраційного сушіння*

*В статье представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований кинетики и динамики фильтрационной сушки сырьевых материалов производства шлакового гравия. Обосновано существование периода частичного и полного насыщения теплового агента при фильтрационной сушке. Проанализирована зависимость фильтрационной сушки от технологических параметров теплового агента и высоты слоя материала*

*Ключевые слова: кинетика, динамика, глина, сырцовые гранулы, скорость фильтрационной сушки*

УДК 66.047.45

# КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ СИРОВИННИХ МАТЕРІАЛІВ ВИРОБНИЦТВА ШЛАКОВОГО ГРАВІЮ

**В. М. Атаманюк**

Доктор технічних наук, професор\*

E-mail: atamanyuk@ukr.net

**І. Р. Барна**

Аспірант\*

E-mail: barnairuna@ukr.net

**Д. М. Симак**

Кандидат технічних наук\*

E-mail: dsmak3@gmail.com

\*Кафедра хімічної інженерії

Національний університет "Львівська політехніка"

вул. С.Бандери, 12, м. Львів, Україна, 79013

## 1. Вступ

За сучасних світових тенденцій до зростання споживання продукції будівельної промисловості та кризової екологічної ситуації актуальною є проблема раціонального використання вторинних сировинних ресурсів, зокрема золошлакових відходів теплових електростанцій (ТЕС) для одержання будівельної продукції необхідної кількості та заданої якості. Ці відходи доцільно застосовувати у виробництві шлакового гравію, який використовується у виробництві легких теплоізоляційних, конструкційних, хімічностійких бетонів, як дрібнозернистий фільтр (адсорбент) в газоочисних установках, системах аспірації житло-

вих приміщень тощо. Одним з найбільш затратних етапів виробництва шлакового гравію є процес попереднього висушування сировини (шлаку та глини) та сирцевих гранул.

На даний час в промисловості для реалізації процесу сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію використовують барабанні сушарки, які характеризуються громіздкістю конструкції, тривалим часом висушування, забрудненням навколишнього середовища дрібнодисперсними частинками, які виносяться з тепловим агентом. З метою зменшення винесення дрібнодисперсних частинок тепловим агентом швидкість теплового агента в сушарках цього типу не перевищує

1 м/с. Внаслідок цього коефіцієнти тепло- і масообміну є невисокими, а температура теплового агента на виході із сушильного барабану становить приблизно 70 – 140 °С. Крім цього тепловий агент лише частково насичується парами вологи, що в свою чергу також призводить до збільшення енергетичних затрат на процес висушування та відповідно впливає на собівартість готової продукції. Тому дослідження процесу висушування сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію з метою зменшення енергетичних затрат є актуальною проблемою.

## 2. Аналіз джерел літератури та постановка проблеми

Дослідженню кінетики фільтраційного сушіння присвячено ряд наукових праць, зокрема [1 – 9]. В роботах [1 – 5], авторами досліджена кінетика фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, та на основі експериментальних даних зроблені висновки про вплив висоти шару, швидкості руху, температури теплового агента, розміру частин на швидкість сушіння. Проте, отримані авторами залежності можна використовувати лише для прогнозування кінетики фільтраційного сушіння досліджуваних у цих роботах матеріалів, які характеризуються певними певною формою та структурою частинок.

Автором [6], наведено результати досліджень кінетики сушіння кускової полідисперсної глини та глини, сформованої у вигляді частинок циліндричної форми у стаціонарному шарі конвективним і радіаційним методами. Автором встановлено, що сушіння відбувається у першому та другому періодах, а тривалість першого періоду є меншою, ніж другого, однак у першому періоді видаляється ~ 50 % вологи. Визначено тривалість першого та другого періоду сушіння та отримано розрахункову залежність для визначення вологості матеріалу у періоді падаючої швидкості сушіння. Проте, автором не досліджено впливу параметрів теплового агента на динаміку та швидкість видалення вологи по висоті шару досліджуваного матеріалу.

Авторами робіт [7 – 9] досліджено кінетику та динаміку фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів та проаналізовано залежність зміни швидкості фільтраційного сушіння від технологічних параметрів теплового агента (сушильного потенціалу) і висоти шару матеріалу. Проте, наведені в цих роботах дослідження стосуються конкретних матеріалів і застосувати їх для інших матеріалів, відмінних за структурною будовою і формою частинок є неможливо внаслідок великої похибки між експериментальними і теоретично розрахованими значеннями. Тому, дослідження кінетики та динаміки фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію є актуальною задачею.

## 3. Мета та завдання досліджень

Дослідження кінетики фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію.

## 4. Експериментальні дані та їх опрацювання

У попередній роботі [9], нами вже досліджено кінетику фільтраційного сушіння шлаку ТЕС, як сировин-

ного матеріалу для виробництва шлакового гравію, тому в даній роботі наводимо результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння глини та сирцевих гранул.

Природна вологість глини складає 20-40%, та залежить від багатьох факторів, зокрема пори року, погодних умов, місця розташування родовища тощо [10]. Згідно регламенту технологічного процесу виробництва шлакового гравію, глину перед подрібненням потрібно сушити до вологості 2%. Вологість сирцевих гранул після процесу грануляції становить 13 – 15%, та згідно з цим же регламентом їх перед випалом у печі також необхідно сушити до вологості 2%

Експериментальні дослідження кінетики фільтраційного сушіння вказаних матеріалів проводили на установці та за методикою наведеною в [9].

Нами досліджено вплив температури  $T$ , швидкості фільтрування теплового агента  $v_0$  і висоти шару матеріалу  $H$  на кінетику фільтраційного сушіння. Отримані експериментальні дослідження наведені в табл. 1 для глини та табл. 2 для сирцевих гранул.

Відомо, що під час фільтраційного сушіння масообмін відбувається не по всій висоті шару [1], а лише на деякій висоті (фронті масоперенесення). У багатьох працях, що присвячені фільтраційному сушінню, зокрема [1-6, 11], для опису кінетики використовували поняття – сушіння у першому та другому періодах за аналогією з конвективним сушінням, проте механізм видалення вологи під час фільтраційного сушіння суттєво відрізняється від цих методів. Тому автором [8], для опису кінетики фільтраційного сушіння введено поняття періоду повного насичення теплового агента та періоду часткового насичення теплового агента (табл. 1, 2), що більш точно відповідає фізичній суті процесу. Період повного насичення теплового агента парами вологи існує до моменту досягнення фронту масообміну перфорованої перегородки. На кінетичній кривій (рис. 1, 2), цьому періоду відповідає пряма лінія, тангенс кута нахилу якої визначає швидкість переміщення зони масообміну. Період часткового насичення настає після досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки, при цьому кількість вологого матеріалу в шарі зменшується, і тепловий агент лише частково насичується парами вологи, а його температура на виході із шару зростає.

Аналіз табл. 1 показує, що за однакової висоти шару глини та швидкості фільтрації теплового агента, інтенсивність видалення вологи залежить від температури теплового агента та з її ростом зростає. Це пояснюється тим, що збільшення температури теплового агента приводить до зростання його сушильного потенціалу.

Аналогічно, як і у випадку із глиною, зростання температури теплового агента, приводить до інтенсифікації процесу фільтраційного сушіння сирцевих гранул (за однакової висоти шару і швидкості фільтрування теплового агента). На основі отриманих експериментальних даних поданих у табл. 1 та 2, на рис. 1,а показана графічна залежність зміни вологовмісту в часі для глини та рис. 1,б для сирцевих гранул, за різної температури теплового агента. Окрім цього, нами було зроблено експериментальні дослідження зміни вологовмісту в часі для глини та сирцевих гранул, за різних швидкостей фільтрування теплового агента крізь шар досліджуваних матеріалів, та різних висот шару матеріалу (рис. 2).

Таблиця 1

Вплив зміни температури теплового агента на кінетику фільтраційного сушіння глини

Період	$\tau, c$	$w^c,$ кгH <sub>2</sub> O/кг сух.м.	$dw^c/d\tau \cdot 10^4,$ (кг H <sub>2</sub> O/(кг сух.м))/с
T=333K, $v_0=1,33m/c, H=0,12m$			
Період повного насичення теплового агента	90	0,3152	2,67
	150	0,2997	
	210	0,2833	
	300	0,2599	
Період часткового насичення теплового агента	990	0,1186	1,68
	1140	0,0976	1,40
	1290	0,0796	1,20
	1440	0,0658	0,92
	1590	0,0556	0,68
T=353K, $v_0=1,33m/c, H=0,12m$			
Період повного насичення теплового агента	90	0,3202	3,56
	150	0,2992	
	210	0,2773	
	300	0,2454	
Період часткового насичення теплового агента	900	0,0816	2,02
	1020	0,0616	1,66
	1140	0,0461	1,29
	1260	0,0345	0,97
	1350	0,0280	0,72
T=373K, $v_0=1,33m/c, H=0,12m$			
Період повного насичення теплового агента	90	0,3121	4,76
	150	0,2832	
	210	0,2549	
	300	0,2155	
Період часткового насичення теплового агента	960	0,0305	1,27
	1050	0,0228	0,86
	1110	0,0191	0,62
	1170	0,0155	0,60
	1230	0,0134	0,35

Таблиця 2

Вплив зміни температури теплового агента на кінетику фільтраційного сушіння сирцевих гранул

Період	$\tau, c$	$w^c,$ кгH <sub>2</sub> O/кг сух.м.	$dw^c/d\tau \cdot 10^4,$ (кг H <sub>2</sub> O/(кг сух.м))/с
T=333K, $v_0=1,45m/c, H=0,15m$			
Період повного насичення теплового агента	120	0,1317	4,91
	210	0,1269	
	330	0,1211	
	450	0,1154	
Період часткового насичення теплового агента	1290	0,0769	4,06
	1530	0,0676	3,90
	1770	0,0588	3,65
	2010	0,0507	3,36
	2250	0,0437	2,93
T=353K, $v_0=1,45m/c, H=0,15m$			
Період повного насичення теплового агента	120	0,1354	6,85
	210	0,1294	
	300	0,1228	
	420	0,1142	
Період часткового насичення теплового агента	1320	0,0587	5,43
	1560	0,0470	4,89
	1800	0,0375	3,96
	2040	0,0299	3,15
	2280	0,0243	2,37
T=373K, $v_0=1,45m/c, H=0,15m$			
Період повного насичення теплового агента	120	0,1287	8,29
	210	0,1211	
	300	0,1132	
	420	0,1029	
Період часткового насичення теплового агента	1200	0,0477	6,16
	1440	0,0354	5,12
	1680	0,0268	3,56
	1920	0,0205	2,62
	2160	0,0162	1,80

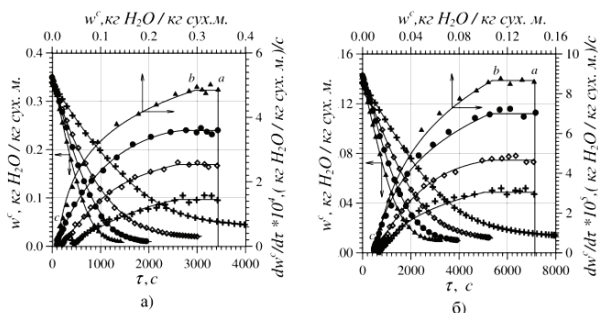


Рис. 1. Зміна вологовмісту в часі та швидкості фільтраційного сушіння від вологовмісту за різної температури теплового агента: а) глина  $v_0=1,33\text{м/с}, H=0,12\text{м}$ ; б) сирцеві гранули  $v_0=1,45\text{м/с}, H=0,15\text{м}$

Швидкість сушіння вологого матеріалу визначає енергетичні затрати на процес та продуктивність сушильного обладнання. Тому, важливо є встановити залежність швидкості сушіння від його середнього вологовмісту, з метою встановлення основних закономірностей фільтраційного сушіння. У теорії сушіння експериментальні дані представляють у вигляді залежності  $dw^c/d\tau = f(w^c)$ , які дають змогу встановити швидкість сушіння залежно від вологовмісту матеріалу та характер її зміни [8]. На рис. 1, 2 показана залежність швидкості сушіння глини (а) та сирцевих гранул (б) залежно від їх вологовмісту за різної температури теплового агента, за різної швидкості фільтрування теплового агента та висоти шару матеріалу відповідно.

На рис. 1, 2 горизонтальна лінія "а – б" відповідає періоду повного насичення теплового агента парами вологи, а точка б завершенню цього періоду, тобто досягненню фронту масообміну перфорованої перегородки і переходу процесу фільтраційного сушіння до періоду часткового насичення теплового агента (лінія "б – с"). Внаслідок того, що глина та сирцеві гранули є капілярно-пористими матеріалами, поверхнева волога міститься тут у меншій мірі та як видно із рис. 1, 2 період часткового насичення теплового агента парами вологи є більш вираженим для цих матеріалів (лінія "б – с"). Як видно з рис. 1, швидкість фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів зростає із ростом температури теплового агента.

Аналіз рис. 2,а, 2,б показує, що зростання швидкості теплового агента втричі приводить до зростання швидкості сушіння глини в 2,5 рази та сирцевих гранул у 3 рази, адже із ростом швидкості теплового агента зростає кількість тепла що підводиться до вологого матеріалу та зростають коефіцієнти тепло- й масовіддачі. З рис. 2,в, 2,г видно, що зростання висоти шару матеріалу (глина, сирцеві гранули) у 4 рази призводить до зменшення швидкості сушіння цих матеріалів у 3 рази. Наведені на рис. 2,в, 2,г значення вологовмісту  $w^c$  отримані по відношенні до маси сухого матеріалу і, відповідно, ці дані є різними, проте кількість випареної вологи  $G$  за одиницю часу не залежить від висоти і є однаковою, що підтверджується дослідженням динаміки видалення вологи під час фільтраційного сушіння.

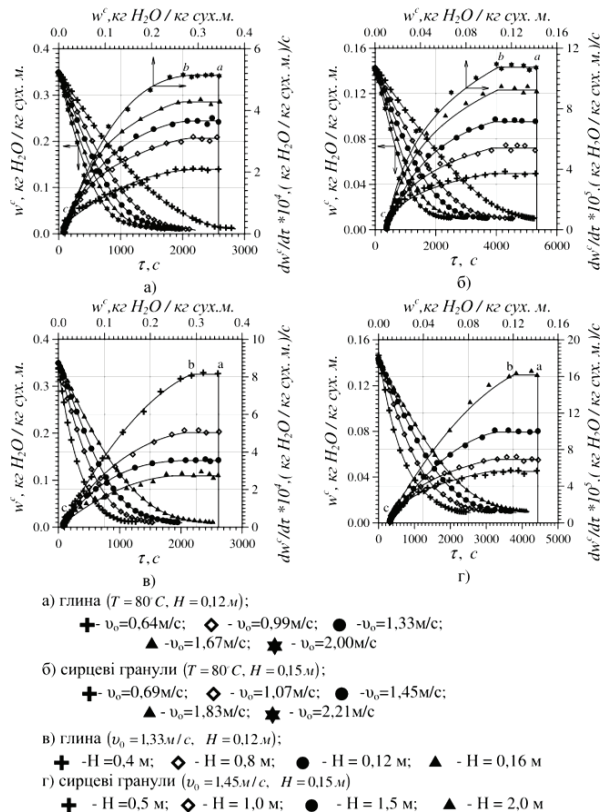


Рис. 2. Зміна вологовмісту в часі та швидкості фільтраційного сушіння від вологовмісту за різної швидкості фільтрування теплового агента та змінної висоти шару матеріалу

Динаміка видалення вологи наведена у вигляді графічної залежності залишкової кількості вологи у шарі  $G=f(\tau)$  залежно від висоти шару (рис. 3).

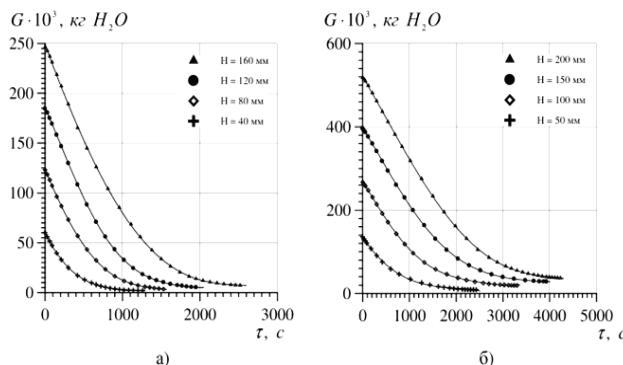


Рис. 3. Динаміка видалення вологи за різних висот шару: а) глина  $v_0=1,33\text{м/с}, T=535\text{K}$ ; б) сирцеві гранули  $v_0=1,45\text{м/с}, T=535\text{K}$

Як бачимо з рис. 3, у випадку постійної швидкості фільтрування теплового агента крізь шар матеріалу різної висоти маємо однакову інтенсивність видалення вологи, яка визначається тангенсом кута нахилу прямолінійної частини кривої до осі абсцис, що пояснюється однаковим сушильним потенціалом теплового агента за однакової температури і швидкості фільтрування.

На рис. 4 подано графічну залежність потоку вологи  $dG/dt$  від вологовмісту  $w^c$ , кг  $H_2O$  / кг сух.м. для умов, зображених на рис. 3.

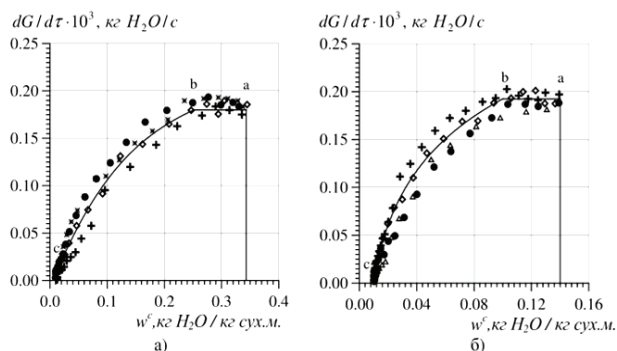


Рис. 4. Залежність масового потоку вологи від вологовмісту під час фільтраційного сушіння: а) глина  $v_0=1,33$ м/с,  $T=535$ К; б) сирцеві гранули  $v_0=1,45$ м/с,  $T=535$ К

Аналіз рис. 4 показує, що швидкість видалення вологи у період повного та часткового насичення теплового агента парами вологи не залежить від висоти шару, а залежить лише від сушильного потенціалу теплового агента (швидкості, температури), що підтверджує зональний характер фільтраційного сушіння.

Лінія "a-b" характеризує інтенсивність видалення вологи у період повного насичення теплового агента, під час

якого видалення вологи визначається сушильним потенціалом теплового агента. Для всіх досліджуваних матеріалів потік вологи, що висушується у цьому періоді, буде однаковим. Це підтверджується експериментальними значеннями наведеними на рис. 4, адже усі точки апроксимуються однією лінією, що паралельна осі абсцис.

На рис. 4 лінія "b-c" характеризує період часткового насичення теплового агента. Як бачимо, усі експериментальні точки апроксимуються також однією лінією.

Окрім цього, проведено дослідження залежності динаміки виділення вологи із шару досліджуваних матеріалів за різної швидкості фільтрування теплового агента та температури. Встановлено, що динаміка видалення вологи визначається величиною сушильного потенціалу теплового агента, який залежить від температури і об'ємної витрати теплового агента, та відповідно з їх ростом кількість вологи, що видаляється з шару зростає.

## 5. Висновки

Досліджено кінетику та динаміку фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію (глини та сирцевих гранул). Проаналізовано залежність потоку вологи  $dG/dt$  від вологовмісту  $w^c$ , кг  $H_2O$  / кг сух. м. та доказано, що інтенсивність видалення вологи у період повного та часткового насичення теплового агента не залежить від висоти шару матеріалу, а визначається сушильним потенціалом теплового агента.

## Література

1. Атаманюк, В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів [Текст]: Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.17.08. / В.М. Атаманюк; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2007. – 36с.
2. Ханик, Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов [Текст]: Автореф. дис...докт. техн. наук: 05.17.08. / Я.Н. Ханик; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 1992. – 36с.
3. Гузьова, І.О. Гідродинаміка та тепломасообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / І.О. Гузьова; [НУ Львівська політехніка]. – Львів: 2001, - 19 с.
4. Кіндзера, Д.П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / Д.П. Кіндзера; [НУ Львівська політехніка]. – Львів: 2003, - 20 с.
5. Дулеба, В.П. Фільтраційне сушіння осадженого поліакриламід у [Текст]: автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08 / В.П. Дулеба; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 1997. – 20с.
6. Римар, Т.І. Сушіння глини у нерухомому шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08. / Т.І. Римар; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2008. – 19с.
7. Атаманюк, В.М. Масовідача у першому періоді фільтраційного сушіння дрібнодисперсних матеріалів [Текст] /Д.М. Симак, В.М. Атаманюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий // Харків: –2011, – 6/6 (54), – С. 14-22.
8. Мосюк, М.І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі [Текст]: Автореф. дис...канд. техн. наук: 05.17.08. / М.І. Мосюк; [НУ Львівська політехніка]. – Львів, 2012. – 22с.
9. Атаманюк, В.М. Кінетика фільтраційного сушіння шлаку теплових електростанцій [Текст] / В.М. Атаманюк, І.Р. Барна // Збірник наукових праць ОНАХТ. – Одеса. – 2012, – Т.2, Вип.41, – С. 89-93.
10. Овчаренко, Ф.Д. Гідрофільність глини і глинистих мінералів [Текст] /Ф.Д. Овчаренко. – Киев: Издательство Академии наук УССР, 1961. – 291 с.
11. Ханик, Я.М. Гідродинаміка та кінетика процесу сушіння глини у щільному шарі під час ІЧ-нагрівання [Текст] / Я.М. Ханик, Т.І. Римар, О.М. Креховецький // Науковий вісник. Збірник науково-технічних праць НЛТУУ. – 2006, – Вип. 16.5. – С.74-78.