

ВНУТРІШНЬОДИФУЗІЙНЕ МАСОПЕРЕНЕСЕННЯ ПІД ЧАС ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ШЛАКУ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Барна І. Р., канд. техн. наук, Атаманюк В. М., д-р техн. наук, професор,
Матківська І. Р., канд. тех. наук
Національний університет «Львівська політехніка», м. Львів

В статті представлені теоретичні та експериментальні дослідження щодо визначення ефективного коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи із шару шлаку теплових електростанцій (ТЕС) під час фільтраційного сушіння. Визначено ефективний коефіцієнт внутрішньої дифузії вологи із шару шлаку на основі розв'язку диференційного рівняння внутрішньої дифузії за граничних умов першого роду. Встановлено залежність коефіцієнтів внутрішньої дифузії від температури теплового агента.

The work presents theoretical and experimental studies to determine effective diffusion coefficient of moisture from the inner layer of slag thermal power plants (TPP) during filtration drying. Defined effective rate of diffusion of moisture from the layer of slag on the basis of the solution of differential equations of internal diffusion boundary conditions of the first kind. The dependence of the diffusion coefficients of the internal temperature of the thermal agent.

Ключові слова: ефективний коефіцієнт внутрішньої дифузії, кінетика сушіння, вологовміст, шлак ТЕС.

Постановка проблеми. Виробництво електроенергії у світі посідає передове місце серед усіх галузей виробництва. Теплові електростанції (ТЕС) виробляють приблизно 63 % електроенергії [1 – 3]. Негативним аспектом роботи ТЕС є забруднення доквілля як газоподібними домішками, так і твердими відходами у вигляді золи та шлаку.

Під час спалювання твердих видів палива в печах теплових електростанцій утворюються зола у вигляді пилоподібних залишків, кусковий шлак, а також золошлакові суміші. Вони є продуктами високотемпературної обробки мінеральної частини палива за температур 1200...1700 °С. Золошлаки, що утворюються від спалювання вугілля на ТЕС, є багатотоннажними відходами. Для їх транспортування застосовуються системи гідрозоловидалення. При цьому більша частина золошлаків транспортується у вигляді пульпи низької концентрації для розміщення в шлакозоловідвалах, які є одним з головних джерел забруднення навколишнього середовища [2 – 5].

Вищевказане призводить до порушення екологічної ситуації і в регіонах і в країні в цілому. На даний час в країні немає комплексної переробки золошлакових відходів, лише незначна їх кількість (10...15%) використовується у будівельній галузі, як сировина при виробництві цегли, шлакогісбетону, золосилікатної цегли, фасадної керамічної плитки та шлакового гравію [4].

Одним з перспективних методів утилізації шлаку ТЕС є виробництво шлакового гравію. Аналіз технологічної схеми виробництва якого, показав, що найбільш енергоємною стадією є сушіння сировинних матеріалів (шлаку та глини), а також сирцевих гранул, що відповідно впливає на собівартість готової продукції. Адже в промисловості для сушіння цих матеріалів широко використовуються барабанні сушарки, що є великогабаритними та енергозатратними, тому нами пропонується фільтраційне сушіння, яке є одним із високо-інтенсивних, низькотемпературних та екологічно безпечних методів. Суть фільтраційного сушіння полягає у профільтовуванні теплового агента в напрямку “вологий матеріал – перфорована перегородка” за рахунок перепаду тисків.

Як відомо, під час сушіння дисперсних матеріалів, у тому числі і шлаку ТЕС, найважче видалити внутрішню вологу, що лімітує процес сушіння. Адже значна частина вологи знаходиться безпосередньо в окремих порах і капілярах дисперсних матеріалів, тому дослідження внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння шлаку ТЕС з метою зменшення енергетичних затрат та створення високопродуктивних сушильних установок є актуальною науково-технічною задачею.

Метою роботи є дослідження внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння шлаку ТЕС та визначення ефективного коефіцієнту дифузії залежно від температури теплового агента.

Аналіз джерел літератури. Для аналізу внутрішньодифузійних процесів необхідним є визначення ефективного коефіцієнта внутрішньої дифузії вологи до поверхні матеріалу, що враховує не лише молекулярну дифузію, але і інші методи переміщення вологи, у тому числі переведення її у пароподібний

стан. Важливо також визначити зміну даного коефіцієнта залежно від температури, оскільки це підвищує точність розрахунків [6].

У наукових працях [6 – 12] досліджено внутрішньодифузійні процеси перенесення вологи для різних дисперсних матеріалів.

В роботі [7], для опису внутрішнього масоперенесення в гранулі полімеру автором зроблено певні допущення, а саме: температура матеріалу приймається рівною температурі теплового агента навколо гранули; не враховується термовологопровідність; перенесення вологи в матеріалі існує за рахунок молекулярної дифузії; за малих значень ефективного коефіцієнта дифузії вологи в матеріалі (10^{-11} – 10^{-9} м²/с) відбувається суто внутрішньодифузійний режим сушіння.

Залежність ефективного коефіцієнта дифузії від вологовмісту $D_e = f(u)_t$ для досліджуваних матеріалів апроксимується наступною формулою [7]:

$$D_e = D_0 \cdot \exp \left[-b \cdot u - \frac{E_{D_0}^* \cdot (1 - d \cdot u)}{R^* \cdot T} \right]$$

де D_0 - формальне значення ефективного коефіцієнта дифузії за $T \rightarrow \infty$, м²/с;

b, d – константи: $b > 0$; $0 < d < 1$.

Наведена в роботі [7] математична модель містить невідомі величини, що входять в нелінійні диференціальні рівняння, розв'язання яких можуть бути отримані лише в частковому випадку та мають громіздкий вигляд, що ускладнює їх практичне застосування.

Автором роботи [8] досліджено кінетику фільтраційного сушіння зерна пшениці сорту «Золотоколо-са» за різних температур та встановлено, що процес сушіння відбувається у другому періоді. Аналітично описано процес внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння зерна пшениці, який базується на розв'язку диференціального рівняння внутрішньої дифузії

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} + \frac{\partial^2 w^c}{\partial z^2} \right) \quad (1)$$

Автором досліджено залежність ефективного коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури та отримано наступну залежність

$$D_w^t = D_w^{293} + 0,39 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293)^2 \quad (2)$$

Автором [9], досліджено внутрішньодифузійне масоперенесення під час фільтраційного сушіння “енергетичної” верби. Отримано залежність коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури для подрібненої “енергетичної” верби:

$$D_w^t = D_w^{293} + 0,427 \cdot 10^{-10} \cdot (T - 293) \quad (3)$$

Досліджено, що значення ефективного коефіцієнта дифузії вологи в навколишнє середовище під час сушіння подрібненої “енергетичної” верби залежить від структурної будови частинок, вологовмісту та температури теплового агента.

Авторами [6 – 12], для розроблення математичних моделей внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння приймалися певні спрощення, що впливають на точність отриманих результатів, тому теоретичні та експериментальні дослідження внутрішнього вологоперенесення є актуальною задачею.

Експериментальна частина. Шлак ТЕС це полідисперсна суміш термічно та механічно подрібнених склистих зерен неправильної форми чорного або бурого кольору з розміром частинок 0,16 – 15 мм. У звалищах спостерігається значна неоднорідність властивостей шлаку за зерновим складом, насипною густиною, кількістю незгорілих частинок вугілля тощо. Крупніші зерна містяться в малій кількості. Шлаки мають скловидну структуру з переважанням полімерно-кристалічних уламків мулітового складу. Як об'єкт сушіння шлак представляє собою пористий матеріал із складною системою пор, які відрізняються між собою за формою, розмірами та взаємним розташуванням.

На більшості діючих ТЕС застосовують систему гідротранспорту золошлакових сумішей у відвали. Початкова вологість шлаку є не високою та становить приблизно 7 – 10 %, що пояснюється склоподібною будовою шлаку і невеликою кількістю відкритих пор.

Згідно регламенту технологічного процесу виробництва шлакового гравію вологість шлаку перед подрібненням повинна становити не більше 2 %. Основні характеристики шлаку наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Основні характеристики шлаку ТЕС

$d_{\text{ш}} \cdot 10^3, \text{м}$	$d_e \cdot 10^4, \text{м}$	$\rho_{\text{нас.}}, \text{кг/м}^3$	$\varepsilon, \frac{\text{м}^3}{\text{м}^3}$	$\varphi_{\text{с}}$	$f_{\text{ум}}, \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$	Кп	$a, \frac{\text{м}^2}{\text{м}^3}$
2,08	7,47	1350	0,35	0,6	3125	0,72	2250

Дослідження проводили на установці і за методикою наведеною у роботі [13], за наступних параметрів процесу: висоти шару $H=120\text{мм}$, температур теплового агента в діапазоні від 313К до 373К та швидкості його фільтрування $v = 1,33 \text{ м/с}$.

Отримані результати експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння шлаку ТЕС наведені в таблиці 2.

Аналіз табл. 2 показує, що за однакової висоти шару шлаку 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.

На основі отриманих експериментальних даних поданих у табл. 2, показана графічна залежність зміни вологовмісту в часі для шлаку за різної температури теплового агента (рис. 1).

Наведені графічні залежності (рис. 1) підтверджують проаналізовану у табл. 2 залежність зміни вологовмісту в часі за різної температури теплового агента для досліджуваних матеріалів. Для частинок кулястої форми ефективний коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w^* визначався на основі математичного розв'язку диференціального рівняння [14], з відповідними початковими та граничними умовами:

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D_w \cdot \left(\frac{\partial^2 c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial c}{\partial r} \right), \quad (4)$$

або враховуючи, що $c = w^c \cdot \rho_{\text{с.м.}}$ залежність набуде вигляду:

$$\frac{\partial w^c}{\partial \tau} = D_w^* \cdot \left(\frac{\partial^2 w^c}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \cdot \frac{\partial w^c}{\partial r} \right) \quad (5)$$

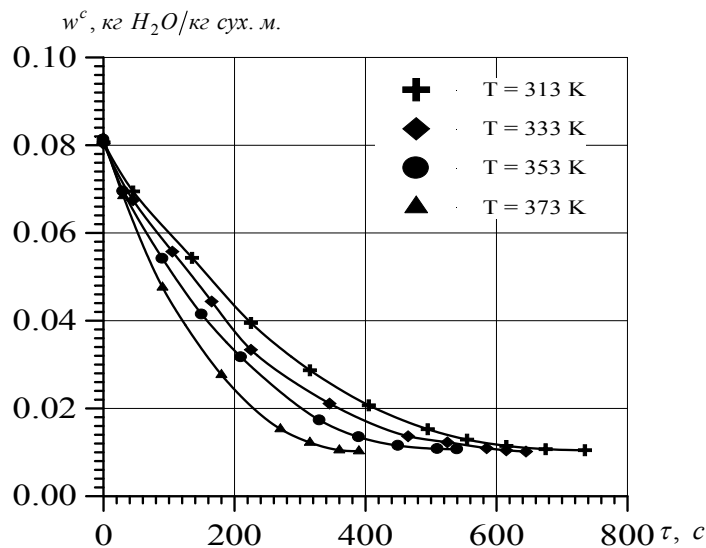


Рис. 1 – Кінетика фільтраційного сушіння шлаку ТЕС за різних температур теплового агента

Таблиця 2 – Вплив зміни температури теплового агента на кінетику фільтраційного сушіння шлаку ТЕС

Період	τ, c	$w^c,$ $кг\ H_2O/кг\ сух.\ м.$	$dw^c/d\tau * 10^4,$ $(кг\ H_2O/(кг\ сух.\ м.))/c$
$t = 60^\circ C, \nu_o = 1,33 м/с, H = 0,12 м$			
Період повного насичення теплового агента	50	0,067	1,82
	100	0,058	
	200	0,039	
Період часткового насичення теплового агента	345	0,021	1,02
	465	0,014	0,61
	525	0,012	0,23
	585	0,011	0,18
	615	0,010	0,16
$t = 80^\circ C, \nu_o = 1,33 м/с, H = 0,12 м$			
Період повного насичення теплового агента	50	0,062	2,23
	100	0,054	
	150	0,043	
Період часткового насичення теплового агента	330	0,017	1,21
	390	0,013	0,62
	450	0,011	0,33
	510	0,010	0,11
	540	0,090	0,03
$t = 100^\circ C, \nu_o = 1,33 м/с, H = 0,12 м$			
Період повного насичення теплового агента	50	0,060	2,83
	80	0,052	
	120	0,044	
Період часткового насичення теплового агента	240	0,019	1,42
	270	0,015	0,81
	300	0,012	0,42
	330	0,010	0,10
	430	0,092	0,07

Відмітимо, що диференціальне рівняння (5) є аналогічним диференціальному рівнянню теплопровідності, у якому коефіцієнт D_w^* аналогічний коефіцієнту температуропровідності a . Створення математичної моделі передбачає наступні допущення:

- зернина шлаку має форму кулі;
- зернина шлаку рівномірно омивається тепловим агентом;
- всі пори зернини є кінетично рівноцінні, тобто волога рівномірно розподілена в об'ємі зернини;

вологівміст теплового агента x_1 не змінюється під час висушування зернини, очевидно, що його значення відповідатиме вологовмісту теплового агента на поверхні зернини.

Враховуючи те, що в шарі міститься: волога яка утримується силами поверхневого натягу, поверхнева волога змочування, зв'язана волога, яка міститься в капілярах зернини шлаку та випаровується у другому періоді.

Рівняння (5) доповнюємо граничними умовами:

$$\begin{cases} w^c(r, \tau = 0) = w_n^c, & w^c(r = R, \tau) = w_p^c, \\ \left(\frac{\partial w^c}{\partial r} \right)_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (6)$$

де D_w^* – ефективний коефіцієнт внутрішньої дифузії, m^2/c ;

r, R – радіус біжучий і частинки, м;

w^c, w_p^c, w_n^c – біжучий, рівноважний та початковий вологовміст шлаку, $kg H_2O/kg \text{ сух. мат.}$

З врахуванням вищенаведених допущень, розв'язок системи (5) – (6) можна представити у вигляді:

$$\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} = \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo_{\partial}} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \cdot n^2 \cdot D_w^* \cdot \tau}{R^2}}, \quad (7)$$

де $\mu_n = \pi \cdot n$ – корені характеристичного рівняння;

τ – час, с;

$Fo_{\partial} = D_w^* \cdot \tau / R^2$ – дифузійне число Фур'є;

$$B_n = 6 / \mu_n^2.$$

За великих чисел Fo_{∂} (великі значення τ , регулярний режим) членами суми $n > 1$ можна знехтувати, а розв'язок (7) з першим членом після логарифмування буде мати вигляд:

$$\ln \left(\frac{\bar{w}^c - w_p}{w_n^c - w_p} \right) = \ln \frac{6}{\pi^2} - \pi^2 \cdot \frac{D_w^* \cdot \tau}{R^2}. \quad (8)$$

На рис. 2 наведено графічну залежність $\ln \left(\left(\bar{w}^c - w_p \right) / \left(w_n^c - w_p \right) \right)$ від τ . Як бачимо з рис. 2 графічна

залежність $\ln \left(\left(\bar{w}^c - w_p \right) / \left(w_n^c - w_p \right) \right) = f(\tau)$ має лінійний характер і за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис можна визначити коефіцієнт внутрішньої дифузії D_w^* (рис. 3):

$$D_w^* = \frac{tg \alpha \cdot R^2}{\mu^2}. \quad (9)$$

В таблиці 3 наведено значення коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи з шлаку ТЕС за різних температур.

Таблиця 3 – Значення коефіцієнта внутрішньої дифузії залежно від температури

T, K	313	333	353	373
$D_w^* \cdot 10^{10}, m^2/c$	6,53	7,59	8,84	10,5

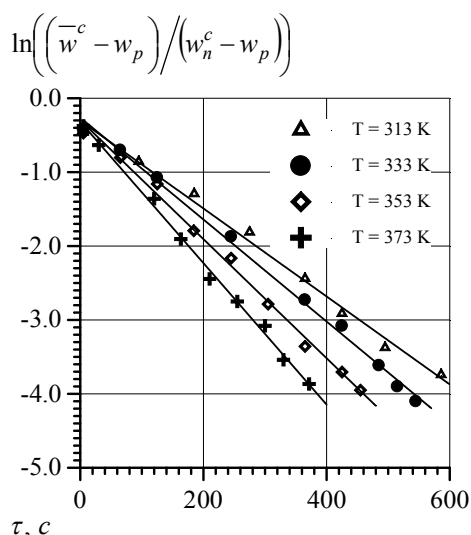


Рис. 2 – Залежність від часу сушіння шлаку ТЕС

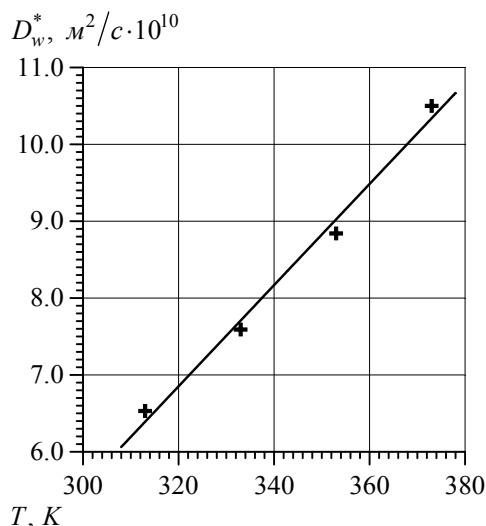


Рис. 3 – Залежність коефіцієнту внутрішньої дифузії від температури для шлаку ТЕС

З рис. 3 бачимо, що з ростом температури теплового агента значення ефективного коефіцієнту внутрішньої дифузії D_w^* води з зернини шлаку ТЕС в навколишнє середовище зростає лінійно, тому її можна апроксимувати залежністю:

$$D_w^t = D_w^{293} + 4,5 \cdot 10^{-12} \cdot (T - 293) \quad (10)$$

Як відомо, значення ефективного коефіцієнта дифузії води в навколишнє середовище під час сушіння різних вологих матеріалів знаходяться в межах від 10-6 (капілярно пористі матеріали) до 10-12 м/с (мало пористі матеріали) [15 – 18], та залежать від структурної будови частинок, температури та вологості матеріалу. Отримані значення ефективного коефіцієнта внутрішньої дифузії корелюються із результатами отриманими іншими авторами наведеними у технічній літературі.

Висновки. Досліджено кінетику фільтраційного сушіння шлаку ТЕС зерна за різних температур та встановлено, що процес сушіння відбувається першому та другому періоді. Аналітично описано процес внутрішньодифузійного масоперенесення під час фільтраційного сушіння шлаку ТЕС, який базується на розв'язку диференціального рівняння внутрішньої дифузії (5). Досліджено залежність ефективного коефіцієнта внутрішньої дифузії від температури. Отримано залежність (10) для визначення ефективного коефіцієнту внутрішньої дифузії шлаку ТЕС під час фільтраційного сушіння. Розраховані значення за залежністю (10) добре узгоджуються із експериментально визначеними за температур (313 – 353K) значеннями, а максимальна відносна похибка не перевищує 8%.

Література

1. Хлопицький О.О. Перспективи розвитку переробки твердих шлакових відходів теплових електростанцій у готові продукти [Текст] / О.О. Хлопицький, Н.П. Макаренко // Праці Одеського політехнічного університету. – 2013. – Вип. 3(42). – С. 91 – 93.
2. Asokan P. Coal combustion residues environmental implications and recycling potentials / Asokan P., Saxena M., Asolekar SR. // Resources, Conservation & Recycling. – 2005. – №43. – pp. 239-262.
3. Mónica Aineto. Production of lightweight aggregates from coal gasification fly ash and slag / Mónica Aineto, Anselmo Acosta et al. // World of coal ash (WOCA), Lexington, Kentucky, USA. – April 11-15, 2005.
4. Lahtinen P. New methods for the renovation of gravel roads / P. Lahtinen, H. Jyrä // Suni Paper for IRF Regional Conference, European Transport and Roads. – Lahti, 1999. – p.7.
5. Shi Qing. To take a clean technology as a strategy for pollution control in industry / Shi Qing // Journal of environmental sciences (China). – 1993 – Vol.5, No 1. – pp. 90-98.
6. Микичак Б.М. Закономірності фільтраційного сушіння лушеного березового шпону у пакеті : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.06 / Б. М. Микичак; ДВНЗ Нац. лісотехн. ун-т України. – Л., 2013. – 20 с.

7. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов / С.П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705-714.
8. Matkivska I. Kinetics of diffusion mass transfer during filtration drying of grain materials / Iryna Matkivska, Yaroslav Gumnytskyi and Volodymyr Atamanyuk // Chemistry & Chemical Technology, 2014, 8(3), 359-363.
9. Мосюк М.І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / М.І. Мосюк. – Львів, 2012. – 22 с.
10. Долинский А.А. Эффективные методы управления кинетикой сушки// Труды 1-й Международной научно-практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». Москва. Россия. 28 – 31 мая 2002 г. Т.1. Пленарные доклады. С. 26 – 35.
11. Mujumdar A.S. and Kudra T. Progress in drying technologies. 2001. V. 7. 459 P.
12. Midilli A., Kucuk H., Vapar Z. A new model for single-layer drying // Drying Technology. 2002. Vol. 20, N7. Pp. 1503–1513.
13. Barna I. Intradiffusion mass transfer during drying of slag gravel raw granule / Barna I., Gumnytsky Ya, Atamanyuk V. // Chemistry & Chemical Technology // - Lviv: Vol. 7, No 4, 2013. P.461-465.
14. Kang S. Moisture diffusion coefficients of single wheat kernels with assumed simplified geometries: analytical approach / S. Kang, S. R. Delwiche. // Transactions of the American Society of Agricultural Engineers. -2000 Vol 43(6): 1653-1659.
15. Матківська І.Я. Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.06. "Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика" / І.Я. Матківська. – Львів, 2015. – 20 с.
16. Атаманюк В. М. Внутрішньодифузійне масоперенесення під час сушіння кам'яного вугілля / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – 2009. – Том 31, № 2. – С. 36 – 41.
17. Рудобашта С.П. Роль гідродинаміки потоків в неперервно діючих сушилках с дисперсною твердою фазой / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитрієв // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. научно-практическая конференция, 11 – 14 октября 2005 г.: тезисы докл. – М., 2005. – Т. 1. – С. 51-58.
18. Рудобашта, С.П. Кинетика низкотемпературной сушки озонированным воздухом [Текст]/ С.П. Рудобашта, Н.Н. Нуриев // Труды первой международной научно- практической конференции «Современные энергосберегающие тепловые технологи (сушка и термовлажностная обработка материалов)»: тр. междунаро. науч -практич. конф. / МГАУ. - М., 2002. - Т. 4.- С. 56-59.